

NACIONES UNIDAS

CONSEJO
ECONOMICO
Y SOCIAL



CATALOGO

LIMITADO

ST/ECLA/CONF.7/L.2.8
2 de diciembre de 1960

ESPAÑOL
ORIGINAL: INGLES

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 de agosto 1961

EMPLEO ECONOMICO DE LA ENERGIA GENERADA POR MEDIOS
HIDRAULICOS, DE LA ENERGIA GENERADA A VAPOR Y
DE LAS INTERCONEXIONES DE SISTEMAS

Por

Ross N. Brudenell y Jack H. Gilbreath

NOTA: Este texto será revisado editorialmente.

I N D I C E

	<u>Página</u>
1. Introducción	1
a) El sistema de la AVT	1
b) Problema fundamental	2
c) Régimen de caudales	2
d) Cargas a firme y de suspensión	3
2. Empleo complementario de la energía hidráulica almacenada y de la energía térmica	3
a) Curva de regualción básica	3
b) Valor del incremento de abastecimiento ..	4
c) Curvas económicas guías	8
3. Coordinación complementaria de las capacidades de generación hidráulica, a vapor y por interconexion	9
a) Características de los diferentes tipos de capacidad	9
b) Explotación de la capacidad hidráulica y térmica	12
c) Empleo complementario de la capacidad hidráulica y a vapor	13
4. Despacho económico	15
5. Empleo de las interconexiones por la combinación económica de los sistemas	18
a) Intercambios de energía	18
b) Intercambios de capacidad	19
6. Conclusiones	20
RESUMEN	27

1. Introducción

El objetivo fundamental en la explotación de un sistema eléctrico de utilidad pública es proporcionar servicio seguro a todos los clientes en la forma más económica posible. Algunos de los medios para lograr este fin son comunes a todo sistema. Otros son propios de un sistema determinado, especialmente cuando en él influyen las fuentes de energía específicas disponibles. Muchas de las consideraciones de seguridad y economía en la explotación de un sistema compuesto íntegramente de plantas térmicas, son en esencia diferentes de aquellas con que se tropieza en la explotación de un sistema dotado sólo de plantas hidráulicas. Para los sistemas servidos por fuentes tanto hidráulicas como térmicas, deben tomarse en consideración los factores peculiares a ambos tipos y también muchos otros factores. Por supuesto, el empleo óptimo de las transmisiones de interconexión entre sistemas es también un requisito de primera importancia para alcanzar el objetivo básico.

Este documento se limita principalmente a estudiar la integración económica de las fuentes hidráulicas y térmicas existentes en el suministro de energía en bloque a la red de transmisión de alto voltaje. También está comprendido en este estudio, el empleo económico de las interconexiones de sistemas para el intercambio de energía. Las experiencias de la Autoridad del Valle del Tennessee (AVT) en la explotación de un sistema de este tipo constituyen la base de gran parte del contenido del presente documento.

a) El sistema de la AVT

Las actuales centrales generadoras de la AVT, conjuntamente con las principales líneas de transmisión e interconexiones, están ilustradas en el gráfico I. La combinación de centrales hidráulicas y a vapor no es nueva, ya que se ha puesto en práctica durante toda la existencia de la AVT. No obstante, las proporciones y características de estas dos fuentes generadoras han variado considerablemente a través de los años. En la cuarta década del presente siglo y a comienzos de la quinta, el sistema era predominantemente hidráulico, con centrales a vapor de costos de generación muy variables. En los últimos años dicho sistema ha llegado a ser fundamentalmente térmico, con una fluctuación en cierto grado estrecha de costos de generación de las unidades a vapor que funcionan normalmente. Con la

/introducción de

introducción de cambios en el sistema, la importancia de diversos factores para elevar, a un nivel óptimo la economía de explotación ha sufrido también variaciones. Ciertos factores requieren una consideración sólo general, en tanto que otros exigen una apreciación más detallada.

b) Problema fundamental

Aunque la importancia de los diversos factores cambie según las variaciones del sistema, existe un problema fundamental para todos los sistemas mixtos, o sea, compuestos de centrales hidráulicas con almacenamiento considerable y de centrales térmicas. El problema reside en la elección entre la energía hidráulica y la térmica para atender la carga actual del sistema, y adquiere características de particular dificultad en razón de que la disponibilidad hidráulica futura es, por lo común, de difícil pronóstico, ya que depende de fenómenos hidrológicos asociados con factores climáticos variables. Pese a este inconveniente, la explotación óptima del sistema consiste en la complementación recíproca entre ambos tipos de suministro, de manera que los costos medios anuales de producción sean mínimos.

c) Régimen de caudales

Puesto que los futuros caudales tendrán un efecto significativo sobre la explotación de los sistemas de energía del tipo que estamos estudiando, se debe señalar que el plan que aquí se sigue supone la imposibilidad de hacer conjeturas sobre los caudales reales. A excepción de la predicción del escurrimiento desde los campos nevados u otros almacenamientos naturales, es la experiencia universal la que indica que las precipitaciones, de modalidad estacional o diaria, son tan variables en cualquier escala de tiempo importante para nuestro estudio, que las predicciones sobre el escurrimiento no pasan de ser simples opiniones. Esto es especialmente cierto si se tiene presente que el escurrimiento es el residuo marginal después de descontadas las pérdidas de agua. En esta forma, aun cuando se conozcan las tendencias generales y las cantidades medias, el empresario del sistema encara una fuente básica de recursos energéticos ampliamente variable y caprichosa. La única clave fidedigna la proporcionan las estadísticas de las estaciones de aforo a través de un período suficiente que permita tener una idea adecuada del escurrimiento resultante de la hidrología de la región.

/d) Cargas

d) Cargas a firme y de suspensión

Las cargas suministradas por los sistemas de energía se clasifican habitualmente en cargas a firme y en cargas de suspensión. Las primeras son características de la mayor parte de las cargas de los sistemas de servicio público, pero las últimas no son infrecuentes en aquellos lugares donde la energía hidroeléctrica constituye una fuente substancial de abastecimiento o donde se atienden grandes cargas industriales. Existen muchas clases de cargas del tipo de suspensión por reflejar ellas corrientemente las condiciones peculiares que rodean el proceso de suministro de energía. Por espacio de más o menos 25 años, la AVT ha estado suministrando energía de este tipo de acuerdo a diversas modalidades de contratos. Los contratos primitivos tenían por objeto reducir al mínimo el suministro de energía durante los años de sequías graves. En cambio, el objetivo de los más recientes es permitir la suspensión durante las horas de las "puntas de carga" sólo por un máximo de 500 horas en un año determinado. Cualquier tipo de abastecimiento, o ambos a la vez, pueden ser empleados para suministrar energía a otro sistema, a través de transmisiones de interconexión.

2. Empleo complementario de la energía hidráulica almacenada y de la energía térmica

La mayor parte de la generación hidráulica en el sistema AVT procede del agua almacenable en represas tributarias de objetivos múltiples y, por consiguiente, sujetas a control por períodos de muchos meses, bajo ciertas restricciones únicas relativas principalmente a la vigilancia de las inundaciones. En razón de estas condiciones, la generación hidráulica puede tratarse como una entidad y no como un conjunto de piezas inconexas que representan a cada planta. Este tipo estacional de almacenamiento integrado se estudia en el presente capítulo de este documento. Se supone además, que ninguna limitación de transmisión que tenga importancia práctica impide el intercambio de generación en bloque para el suministro de la carga al sistema.

a) Curva de regulación básica

En el presente capítulo, la seguridad del servicio se relaciona con la capacidad del sistema de energía para atender las necesidades del cliente durante períodos de sequía grave. La curva de regulación básica ha sido

la guía principal empleada por la AVT en su tarea de garantizar la disponibilidad de energía durante estos períodos. Esta curva, con diversas denominaciones, se ha usado por muchos años en el estudio y explotación de sistemas con sustancial almacenamiento hidráulico.

La curva de regulación básica indica los niveles mínimos de almacenamiento del sistema, a lo largo de un año, necesarios para garantizar la entrega a firme de energía. El suministro de cargas susceptibles de suspensión no es tan seguro, ya que la posibilidad de interrumpir las cargas durante períodos de caudal desfavorable es una de las razones principales que abonan la venta de este tipo de energía.

La determinación de la curva de regulación básica se puede dividir en dos partes. Primero, es necesario calcular la generación hidráulica media indispensable para el suministro de cargas a firme si todas las fuentes térmicas son explotadas al máximo de su capacidad. Estos promedios serán necesarios normalmente para cada semana, o mes, durante el año siguiente. Segundo, habrá que hacer el cómputo del almacenamiento necesario en el sistema para consolidar estos requerimientos hidráulicos si se presentan caudales de agua en extremo adversos.

Normalmente, la AVT ha usado las peores sequías de que haya memoria como criterio en la determinación de las curvas de regulación básica.^{1/} No obstante, es del caso señalar que la curva de regulación básica puede determinarse por métodos estadísticos y que la AVT y otras empresas de servicio público han usado tales métodos en diversos grados.^{2/}

b) Valor del incremento de almacenamiento

Es de prever que se hará pleno uso de la totalidad de las fuentes térmicas cada vez que el almacenamiento del sistema quede por debajo de la curva de regulación básica. También será del caso programar, en tales ocasiones, interrupciones de la carga susceptible de suspensión.

Cuando el almacenamiento del sistema excede de la curva de regulación básica, como ocurre normalmente, se cuenta con un excedente para sustituir

1/ R.N. Brudenall y J.H. Gilbreath: "Economic Complementary Operation of Hydro Storage and Steam Power in the Integrated TVA System", AIEE Transactions, 1959, vol. 78, pt. III-A, pp. 136-156.

2/ S. Stage, Y. Larsson: "Utilization of Long Term Storage in Combined Hydro and Thermal Power System", World Power Conference, junio, 1960, IIB/3.

la energía térmica, que es más costosa, o para suministrar carga del tipo de suspensión. Surgen preguntas respecto a cuánta energía térmica y de qué costo habrá que sustituir y cuándo suministrar carga de suspensión. En la AVT, esta decisión está posibilitada por la determinación del valor futuro del aumento máximo de almacenamiento, si éste es retenido más bien que usado corrientemente. Este valor computado futuro se compara entonces con el valor del incremento inmediato, sea para sustitución de la energía térmica o para la venta de energía susceptible de suspensión.

Es evidente que el valor futuro de un aumento de almacenamiento no será siempre el mismo por las variadas condiciones que se pueden presentar en el caudal. De tal manera, los valores deben ser determinados para cada año en base a una muestra representativa de años del caudal. Este registro es la mejor muestra disponible y debe usarse como tal. Se supone que cada año de caudal ofrece iguales probabilidades. Por consiguiente, usando el principio del seguro de grupo, el valor del aumento máximo de almacenamiento en la fecha en cuestión es el promedio de los valores anuales por separado.

La determinación de los valores anuales de almacenamiento es bastante compleja, especialmente para los grandes sistemas de energía. Ciertas simplificaciones se han hecho necesarias. Una suposición muy útil es que cada año el caudal se conoce con antelación y que para cada año el valor del incremento de almacenamiento será óptimo dentro de una explotación ideal, es decir, explotación previsoras.

En el siguiente análisis de la explotación y de los valores ideales del incremento de almacenamiento se hacen presunciones simplificadoras en orden a que los principios teóricos sean mejor comprendidos. Se supone que el mercado semanal para la energía susceptible de suspensión es constante, como lo es la disponibilidad de cada escalón de costo de la energía térmica. Se supone, también, que la energía susceptible de suspensión produce una renta definida por kilovatio-hora al ser suministrada, pero no hay restricción en lo que respecta a derechos de rebaja. Bajo esta última condición, si se considera en términos de carga a firme, la suma de estas cargas y las de tipo de suspensión, los períodos de interrupción de la carga restringible pueden considerarse como períodos de abastecimiento de energía térmica, con un costo por kilovatio-hora igual a la pérdida en renta por efecto de la energía susceptible de suspensión.

Dos factores son probablemente de suma importancia en la explotación ideal. El empleo de la energía térmica económica debe llevarse al máximo, y, el de la energía térmica antieconómica, al mínimo. Algo contradictorio, la generación hidráulica debe ser baja durante la primera parte de un período de escurrimiento y más alta posteriormente a fin de aumentar al máximo las alturas de caída en los embalses.

Con un determinado contenido de almacenamiento en una fecha dada, una primera aproximación a la explotación ideal es un nivel constante de energía térmica para un futuro "período de regulación". Este período termina cuando, para determinado año de caudal, los requerimientos hidroeléctricos resultantes hacen que el almacenamiento del sistema eléctrico sea tangente tanto al nivel mínimo de la curva de regulación básica como al nivel máximo permisible de almacenamiento. Si el punto de tangencia está en la curva de regulación básica, cualquier disminución en el uso de la energía térmica durante el período de regulación significaría que el almacenamiento del sistema quedaría por debajo de la curva de regulación básica y, en esta forma, haría peligrar el suministro de energía a firme. Por el contrario, cuando el punto de tangencia es el nivel máximo permisible de almacenamiento, cualquier mayor uso de la energía térmica se traduciría en desperdicio de agua. El período de regulación correcto es el período más prolongado sin causar derrames ni violar la curva de regulación básica.

Siendo iguales los demás factores, este nivel constante de empleo de la energía térmica se traducirá en el costo mínimo de producción durante el período de regulación para el año de caudal de que se trate. Cualquier otra operación en que una producción térmica inferior en una parte del período deba compensarse por una mayor producción térmica en otra parte del período, se traducirá en mayor costo de producción. Puesto que los costos unitarios de la energía térmica aumentan con la producción, la curva de costo total es cóncava hacia arriba; y sólo una producción constante es capaz de dar un costo total mínimo.

La explotación ideal sin modificar de que hemos hablado, está ilustrada en el gráfico II por la curva de almacenamiento O C G y por la producción constante de energía térmica C' G'. El primer progreso en esta explotación consistiría en hacer pleno uso de la fuente 4-mills/kWh en la primera parte del período de regulación y no en la última parte, en lugar de hacer uso parcial de ella durante todo el período de regulación. Esto daría por resultado niveles más altos del embalse durante todo el período y, en esta forma, un empleo más eficiente del abastecimiento de agua existente. Si el escalón de energía térmica que sigue en

orden descendente en cuanto a costo (el escalón de 3.5 mills/kWh en la ilustración) tiene un valor por unidad bastante cercano al costo de 4 mills/kWh primitivamente calculado con exactitud, podría ser beneficioso reemplazar parte de esta energía al término del período de regulación, prolongando el empleo total de la fuente de 4 mills/kWh más allá de lo normalmente conveniente. Esto es cierto siempre y mientras que en función del aumento de los valores la energía hidráulica adicional resultante del aumento de la altura de caída aplicado al caudal natural en lo restante del período de bajo costo de generación tenga un mayor valor que el diferencial en los dos costos térmicos. Existe una rápida convergencia hacia cero de esta economía neta, porque cada aumento sucesivo tanto en altura de caída como en caudal, es menor que la ganancia precedente. Esta explotación ideal modificada está también ilustrada en el gráfico II por la curva de almacenamiento O'D'QK'G" y la de empleo de energía térmica O'D'QK'G".

La próxima interrogante que surge es si es económico o no aumentar, la altura de caída mediante el uso de energía térmica de un más alto costo. Considérese un kWh de almacenamiento adicional ganado mediante el empleo inicial de energía térmica más costosa, representado por la zona achurada en P', de manera que la curva de almacenamiento OPHDG resulte de la del empleo de la energía térmica P'H'RK'G". El almacenamiento adicional más el efecto de la altura de caída adicional da por resultado que la reducción de energía de 4 mill, H'D'QR, es equivalente en esta ilustración a 1.3 kWh. En consecuencia, $4 \times 1.3 = 5.2$ mills por kWh constituye una aproximación cercana del valor del kWh inicial de almacenamiento; y el bloque de 5 mill de energía térmica quedaría inicialmente justificado. La medida del uso de la energía de 5 mill al comienzo del período de regulación y el reemplazo de la energía de 4 mill al término de su período de uso, habría de ser determinada por incremento, como se establece con anterioridad, en el empleo continuado de la energía de 4 mill para el posterior reemplazo de la energía de 3.5 mill.

La evaluación final del incremento máximo de almacenamiento inicial, para determinado año de caudal, se determina en función de su valor al reemplazar la energía térmica más costosa previamente calculada. La época de reemplazo es al final del período de uso de esta energía térmica. Para el ejemplo de más arriba, esto podría ser $5.0 \times 1.02 = 5.1$ mills por kWh.

Como se dijo anteriormente, tales determinaciones se requieren para cada año de una muestra representativa de caudales anuales. El siguiente cuadro ilustra la forma en que los valores para los niveles de almacenamiento de dos sistemas podrían variar con las condiciones de caudal.

VALOR DEL ALMACENAMIENTO EL 1° DE JUNIO (MILLS POR KWH)

Muestras anuales de caudal	Almacenamiento (a) 1 000 000 mwh	Almacenamiento (b) 2 000 000 mwh
1910	3.3	2.1
1911	4.5	3.2
1912	2.2	0
1913	5.9	3.4
1914	4.7	3.3
1915	8.9	6.7
1916	11.5	9.1
1917	2.2	0
1918	4.9	2.3
1919	<u>3.6</u>	<u>2.2</u>
Promedio	5.2	3.2

Son los valores medios del cuadro-tipo que antecede los que indican los grados en que se debe emplear la energía térmica para conservar el empleo del almacenamiento hidráulico. Lo mismo es efectivo respecto al empleo de la energía disponible a través de las transmisiones de interconexión. Estos promedios indican también cuándo debe emplearse el almacenamiento hidráulico para suministrar energía susceptible de suspensión.

A fin de que los valores medios de más arriba sean conocidos para una gama de niveles de almacenamiento en una fecha dada, es necesario determinarlos para varios niveles adecuados y luego preparar una curva de "valor de almacenamiento". El gráfico III ilustra una curva de esta naturaleza.

c) Curvas económicas guías

Desde el momento en que se pueden preparar curvas de valor de almacenamiento de la naturaleza indicada para todas las fechas que se desee, es posible trazar una familia de curvas sobre un gráfico que contenga los embalses del sistema en relación a la época del año, y donde los puntos de igual valor del incremento de almacenamiento están sobre la misma curva. Una familia de curvas de esta especie para el sistema de la AVT está ilustrada en el gráfico IV. Estas curvas, que reciben la denominación de

/"curvas económicas

"curvas económicas guías", son útiles a través de un período en la misma forma en que la curva anteriormente descrita es útil para una fecha determinada.

Muchos sistemas hidráulico-térmicos son tan grandes y complejos, que sería muy difícil determinar curvas económicas guías exactamente en la forma descrita. Esto sucede especialmente cuando el sistema hidráulico abarca centrales sin almacenamiento que están ubicadas aguas abajo de las centrales con almacenamiento y que derraman cantidades variables de agua en los diferentes años de caudal. El procedimiento también se complica por la existencia de muchos escalones de costos diferentes de energía térmica, incluso la energía que se puede obtener de las interconexiones.

El sistema de la AVT pertenece a esta clase. Particularmente inconveniente es el derrame ocasional de agua en las centrales sin almacenamiento situadas aguas abajo. Esta consideración reduce el valor del incremento máximo de almacenamiento, pero más notoriamente agrega una nueva dimensión al problema general. En el gráfico V se muestra el sistema de control de agua de la AVT, de ambas centrales, con y sin almacenamiento.

La AVT emplea un método gráfico, para obtener una solución práctica al problema del valor de almacenamiento. Los detalles de este método están descritos en otro documento.^{3/}

3. Coordinación complementaria de las capacidades de generación hidráulica, a vapor y por interconexión

La elección entre la energía térmica y la energía hidráulica almacenada, descritas anteriormente, está ligada con la satisfacción de las necesidades totales de energía del sistema. En concomitancia con ese problema se halla el empleo de las diversas fuentes para suministrar las variaciones en la carga, particularmente las demandas máximas. Las diversas fuentes tienen, a este respecto, características muy disímiles y sería del caso analizar esta materia.

a) Características de los diferentes tipos de capacidad

Generación hidráulica. La característica dominante de este tipo es su flexibilidad. Puesto que el efecto fundamental es la conversión de la presión de un fluido en un movimiento mecánico, sin los problemas de

^{3/} Véase la nota 1/.

transferencia de calor de altas velocidades, las variaciones en la producción de un equipo de turbinas hidráulicas son comparativamente sencillas de obtener. En el sistema de la AVT es posible poner en carga con su plena capacidad nominal, en un tiempo de dos a tres minutos, una unidad hidroeléctrica de gran tamaño, que ha estado fuera de servicio. Los procesos de abrir los álabes directrices, imprimir velocidad a la unidad, sincronizarla con el sistema y hacerla tomar carga, son programas precisos y ordenados con poca interrelación complicada para perturbar su funcionamiento. Una vez que el equipo hidroeléctrico está sobre la línea, la velocidad de rotación comparativamente lenta junto con el gran WR^2 de los elementos rotatorios, dan a la unidad hidráulica una característica intrínsecamente estable. Las características de regulación son favorables para las necesidades de la mayor parte de los sistemas eléctricos. Los sistemas reguladores hidráulicos que accionan los álabes o la válvula de control del caudal del agua proporcionan un control rápido y positivo sobre una amplia gama de potencia. En las centrales con acueductos largos, sin embargo, los efectos del oleaje pueden adquirir importancia.

La variación de la eficiencia con los cambios en la carga y alturas de caída depende del tipo de la turbina. Las turbinas Francis, ruedas de impulsión y hélices de paletas fijas tienen más agudas disminuciones en los puntos óptimos que las de tipo ajustable. En aquellos casos en que se emplean unidades múltiples, su efecto es producir una amplia gama de rendimiento con cambios relativamente pequeños en la eficiencia, mediante la selección del número conveniente de unidades para transportar la carga.

Una de las ventajas de las unidades hidráulicas es su adaptabilidad para emplearlas como condensadores sincrónicos en el suministro de potencia reactiva al sistema. Con una pequeña inversión en equipo para supresión del agua de salida, las unidades pueden conectarse perfectamente a la línea, a fin de hacerlas funcionar como motores, operación que se puede ejecutar con tanta prontitud como sea necesario. En el sistema de la AVT éste ha sido uno de los métodos corrientes en el control del voltaje.

La seguridad de los equipos hidroeléctricos es elevada. Tanto el equipo mecánico como el eléctrico de las instalaciones modernas son capaces de prestar servicios ininterrumpidos por períodos prolongados bajo la

/mayoría de

mayoría de las condiciones de conservación adecuada. Un factor de disponibilidad de 96 a 97 por ciento es lo que se prevé normalmente en el sistema de la AVT.

Generación a vapor. La central de generación de fuerza eléctrica a vapor es una combinación compleja de varios sistemas, que convierte - mediante un proceso controlado - la energía latente en el combustible suelto en energía mecánica, valiéndose de las propiedades termodinámicas del vapor y, luego, en energía eléctrica por medio de la maquinaria rotatoria convencional. Debe existir un sistema para la recolección, preparación y entrega del combustible a la caldera. Esta, que consiste en una combinación de sistemas, debe convertir un torrente de llamas de alta temperatura en una corriente controlada de vapor supercalentado a alta presión y alta temperatura al sistema siguiente, consistente en la turbina y el condensador. Esta máquina de precisión transforma eficientemente el vapor en energía mecánica rotatoria utilizable, que impulsa el generador eléctrico y que representa el sistema final. Los complejos problemas de la transferencia del calor y su control en los sistemas caldera-turbina son evidentes. Además, está claro que cualquier ruptura en la sucesión de estos rápidos procesos es capaz de suspender la producción de energía de aquella unidad.

Por otra parte, es evidente que el tiempo necesario para poner en marcha semejante máquina de calor será muchas veces mayor que el tiempo requerido por una central hidroeléctrica. En el sistema de la AVT el período que normalmente se calcula para la puesta en marcha, sobre la base de una caldera fría, es de cuatro a seis horas. Una vez que la unidad está entregando energía a la tasa conveniente, los problemas de variación de la tasa de calor emitido y transferido son grandes. Esto dependerá de las disposiciones que se tomaron para el diseño, estimándose comúnmente poco práctico reducir la carga por debajo de una cuarta parte del total calculado. Es de la responsabilidad de los diseñadores de equipo que las variaciones dentro de esta gama puedan ser hechas dentro de escasos minutos, aun cuando esto no se aproxime a la tasa de las unidades hidráulicas. Para variaciones pequeñas de producción, la regulación y el resultado de un equipo moderno de generación de fuerza eléctrica a vapor es satisfactorio cuando está asociado con controles coordinados de caldera.

/En razón

En razón de la gran significación del costo del combustible, es muy importante conocer que el funcionamiento óptimo de una unidad generadora de fuerza eléctrica a vapor está en la producción constante en un punto en que las condiciones de diseño se cumplen casi en su totalidad. Esto estará ordinariamente cerca del rendimiento nominal del equipo.

Por la naturaleza y número de los elementos críticos que entran en juego, la seguridad de las unidades a vapor no es tan alta como la de las instalaciones hidroeléctricas. La experiencia de la AVT ha acusado una disponibilidad media de 87 por ciento.

Otra capacidad térmica. Los motores diesel, las turbinas a gas y las plantas nucleares no son unidades generadoras comunes en la experiencia de la AVT, y cada una posee características especiales, incluso ventajas y desventajas. Las dos primeras están más cercanas a las hidráulicas en su flexibilidad para seguir los cambios de carga, en tanto que las características de la última están particularmente relacionadas con el tipo de energía nuclear que se utilice.

Capacidad por interconexión. La seguridad de la capacidad procedente de otros sistemas a través de la interconexión de líneas de transmisión, depende tanto de la naturaleza de la línea, incluso su explotación, y del tipo y clase de explotación de la capacidad en el sistema vecino. En la experiencia de la AVT, los resultados más favorables se han obtenido mediante la explotación paralela de los sistemas a través de la línea con equipo adecuado de telemetría y control de carga de cada sistema. La estabilidad mejora corrientemente con interconexiones múltiples de esta clase. Se concertará contractualmente una capacidad a firme, la que podrá estar sometida a ciertos convenios determinados respecto a su empleo.

b) Explotación de la capacidad hidráulica y térmica

Carga a suministrar. Una de las consideraciones básicas es la característica de la carga del sistema. Los factores de carga diaria, semanal y mensual varían de un sistema a otro; pueden presentarse variaciones estacionales pronunciadas, y la relación de carga mínima a demanda máxima varía considerablemente. Estas modalidades serán determinantes en el empleo de las fuentes disponibles de capacidad para responder a las variaciones de carga. Los factores de carga diaria en el sistema de la AVT sobrepasan el

85 por ciento y, a veces, llegan al 90 por ciento; los factores de carga semanal promedian 85 por ciento y habitualmente sobrepasan el 83 por ciento. Los factores de carga mensual son sólo ligeramente más bajos; sin embargo, existe una gran variación estacional debida en lo principal a la calefacción eléctrica, que es en la actualidad superior a dos millones de kW dentro de una demanda anual de diez millones de kW.

Como se ha señalado, la AVT vende energía a ciertos clientes industriales que pueden sufrir interrupciones durante las horas de máxima. Esto equivale a disponer de una capacidad a corto plazo y a un costo determinado por el contrato. Tiene un efecto casi similar al de la capacidad generadora por turbina a gas para periodos cortos. La AVT no tiene turbinas a gas.

c) Empleo complementario de la capacidad hidráulica y a vapor

Cualquiera que sea la variación diaria y semanal, si se contase solamente con la capacidad a vapor los cambios de carga deberían ser necesariamente atendidos por medio de los complicados cambios termodinámicos inherentes a este tipo de capacidad. Aunque este es un requisito corriente en muchos sistemas accionados a vapor, no es tan eficiente como una producción constante a la capacidad diseñada; por lo común exige poner en marcha y detener diariamente algunas unidades junto con la aplicación de cargas mínimas en otras. Además, sólo se cuenta con capacidad hidráulica, la carga fundamental es llevada por unidades que, de otro modo, están bien adaptadas a las variaciones de carga. Por otra parte, durante periodos de bajo caudal de aguas, es posible que puntos de carga ineficientes se hagan necesarios en orden a ajustar el agua disponible a los requisitos de carga. También pueden aparecer limitaciones de almacenamiento que actúen en esta forma desfavorable en cada ciclo de almacenamiento.

Cuando se cuenta con ambos tipos de capacidad, existen oportunidades para adaptar cada tipo a su empleo de máxima eficiencia, como lo ilustra el gráfico VI.

Las plantas a vapor más económicas se utilizan en mejor forma mediante funcionamiento a carga fundamental, como lo indica el gráfico VI (A). Todas las unidades a vapor que están económicamente justificadas dentro de las condiciones actuales de almacenamiento hidráulico, deben funcionar a su plena carga de eficiencia y con tanta continuidad como lo permitan sus necesidades de conservación.

/Las centrales

Las centrales hidráulicas con sus características favorables para su puesta en marcha y detención, y para conducir cargas variables, están colocadas en el punto más alto de la curva de carga. Esto ordinariamente no significa operación en puntos de carga ineficientes. Por razones del menor tamaño promedio de las unidades hidráulicas, ellas pueden ajustarse a un programa en virtud del cual cada una es operada en su punto de máxima eficiencia, próximo a él, durante un tiempo en horas de acuerdo al agua disponible, ascendiendo o descendiendo en la curva de carga a medida que el abastecimiento de agua varía. Cuando los caudales son altos, es posible que algunas plantas necesiten funcionar continuamente, como lo ilustra el gráfico VI (B).

La capacidad de reserva conectada y lista para carga exigida por el sistema, es proporcionada con grandes ventajas por las centrales hidráulicas. En tanto que una unidad a vapor necesita cierta generación mínima a un consumo ineficiente de carbón, el equipo hidráulico es capaz de funcionar como condensador sincrónico sin emplear agua. Además, un equipo de esta naturaleza puede ser detenido y, sin embargo es capaz de ser puesto en marcha y tomar carga del sistema dentro de unos tres minutos. Para acercarse siquiera a esto, una unidad a vapor necesitaría un uso improductivo de combustible para mantener la caldera encendida y lista, así como abundante dotación de instrumentos en la turbina para permitirle adquirir carga con prontitud y sin consecuencias desastrosas originadas por los fuertes gradientes de temperatura.

Aun en casos en que se deba emplear capacidades de puntas generadas a vapor con el objeto de suplementar una insuficiencia de disponibilidad de capacidad hidráulica para responder a la demanda máxima del sistema, las variaciones más costosas en estas plantas a vapor pueden reducirse a un mínimo como lo ilustra el gráfico VI (B). En aquellos casos en que las demandas máximas son estacionales, están sujetas a una corta duración anual, es posible emplear turbinas a gas u otras fuentes de gran flexibilidad; pero tienen el inconveniente de consumir combustible relativamente caro por un servicio de pocas horas. Las cargas susceptibles de suspensión de la AVT sirven más o menos para lo mismo.

La capacidad por generación nuclear, con sus grandes costos fijos que abarcan una inversión también fija en combustible, es la que ofrece mejores

posibilidades económicas como planta de carga fundamental con un pequeño aumento en los costos. La primera central de esta naturaleza que será operada como parte del sistema de la AVT, es una unidad relativamente pequeña con una capacidad de 25 mw; será puesta en servicio a fines de 1962, por la Comisión de Energía Atómica.

Para fines de regulación, es económicamente ventajosa la coordinación de los diferentes tipos de capacidad para aprovechar las características de cada una de ellas. En ciertos casos, el tamaño de una sola central hidráulica puede ser tal, que sus excelentes características reguladoras basten para atender económicamente la regulación de todo el sistema. En otros casos dicha regulación debe dividirse entre las diferentes centrales, presentándose un problema complejo en el cual el buen comportamiento de las unidades hidráulicas a cambios relativamente grandes de cargas está enlazado con la respuesta satisfactoria de las unidades a vapor a cambios relativamente pequeños. En el sistema de la AVT, ambos han sido empleados. La mayor porción fue tomada por unas pocas grandes centrales hidráulicas, y, la regulación "marginal", por las unidades a vapor.

4. Despacho económico

En los últimos años, con el advenimiento de los computadores electrónicos de gran campo, ha sobrevenido un considerable adelanto en el campo de la carga económica, o despacho económico. Primordialmente, este campo de actividad permite la consideración refinada de las pérdidas por aumento de transmisión en la selección de fuentes generadoras. También permite a las empresas de servicio público interconectadas, determinar con mayor exactitud los márgenes de utilidad en la venta o intercambio de energía en los puntos de interconexión.

Los principios y procedimientos han sido perfeccionados hasta tal punto que tanto los computadores análogos como los digitales se emplean en diversas empresas de servicio público para un despacho económico de energía horario y aún continuo. La AVT adquirió recientemente un computador digital IBM 704, que se está usando para despacho económico, así como para muchos otros fines científicos y de elaboración de datos.

El principio fundamental de la carga económica consiste en entregar energía a los clientes, al más bajo costo general, desde las fuentes

/abastecedoras de

abastecedora de energía en funcionamiento efectivo, en el momento de que se trate. Esto se logra cuando el aumento de costo de la energía que se entrega es el mismo para todos los proyectos que no están operando a niveles máximos o mínimos.

La ecuación general de carga económica puede expresarse matemáticamente como una ecuación diferencial parcial no lineal:

$$\frac{df_n}{dP_n} + \lambda \frac{L_T}{P_n} = \lambda \quad \text{en donde}$$

$$\frac{df_n}{dP_n} = \text{el aumento en el costo de generación en la central "u"}$$

$$\lambda \frac{L_T}{P_n} = \text{la pérdida en el aumento del costo de transmisión debida a la planta "u"}$$

$$\text{y } \lambda = \text{el aumento en el costo de la energía entregada.}$$

Desde que la pérdida por el aumento de los costos de transmisión asociada con la generación en determinada central está interrelacionada con la generación en todas las centrales, es casi innecesario decir que la solución de esta ecuación para numerosas centrales es el empleo de un computador electrónico.

En la ecuación que antecede, se observará que los aumentos de los costos de generación en todas las centrales son necesarios como información básica. En el caso de las centrales térmicas, su determinación es aproximativa, por ser una función de los aumentos de las tasas de calor y de los costos de combustible. Para las centrales hidráulicas, estos costos deben reflejar los aumentos de eficiencia de turbina y generador, así como los valores del agua empleada. Los aumentos de los costos de generación en las centrales hidráulicas sin almacenamiento son particularmente difíciles de obtener, puesto que el empleo de agua, aún por un corto período, es una variable dependiente.

Al parecer, ninguna empresa de servicio público ha determinado los costos de generación en centrales hidráulicas de manera completamente satisfactoria para su empleo en las ecuaciones de carga económica. En la AVT, el valor del aumento de los sistemas de almacenamiento ha sido empleado en

las diversas centrales hidráulicas como costo medio de generación. Más recientemente, los principios tratados en el presente documento para la determinación de estos valores de almacenamiento de los sistemas han sido ampliados de modo que los valores del aumento de almacenamiento se obtienen ahora en almacenamientos individuales. (Esto se ha visto posibilitado por el empleo del computador 704). Estos valores se han utilizado en las centrales de almacenamiento junto con los valores de los sistemas vigentes en las centrales sin almacenamiento.

La última respuesta para el trazado de pautas horarias económicas de generación en las centrales hidráulicas, como parte de las ecuaciones de carga económica, no se conoce en este momento. En la AVT, se lleva a cabo una tentativa de elaboración de un programa de trabajo de computador que pronosticará con anticipación la pauta generadora de las centrales para períodos cortos, sobre la base de las descargas totales previstas. Los principios básicos en uso son los elaborados por la Comisión de Energía Hidroeléctrica de Ontario y la General Electric Company.^{4/} Si este método se perfecciona en grado satisfactorio por el sistema de la AVT, probablemente se podrán emplear las pautas anticipadas de generación en las centrales sin almacenamiento. Esto dejaría libres las obras de almacenamiento, centrales térmicas y, probablemente, las interconexiones para uso en la carga económica horaria, en la forma determinada coincidentemente por el computador 704.

Como ya se ha dicho, los principios de la carga económica rigen para las fuentes de energía en funcionamiento real en un momento dado. La selección de unidades o centrales térmicas para funcionamiento sobre la línea, es en gran parte una función de los costos relativos de explotación en comparación con los valores de almacenamiento. Asimismo, cuando las necesidades máximas no pueden ser atendidas de otro modo, la selección de la energía térmica adicional requerida se basa en los costos relativos de explotación. Mediante el empleo del computador 704, la AVT está en condiciones de proceder a las selecciones sobre la base de los costos de la energía entregada, más bien que de los costos de generación. Esto, por supuesto, mejora aún más la economía de explotación.

^{4/} A.F. Glimm y L.K. Kirchmayer: "Economic Operation of Variable-Head Hydroelectric Plants", AIEE Transactions, 1958, vol. 77, pt. III, pp. 1070-1078.

5. Empleo de las interconexiones por la combinación económica de los sistemas

Los estudios anteriores han señalado las economías que se introducen por la coordinación de los diversos tipos de fuentes de energía y capacidad en un mismo sistema. En forma semejante, las explotaciones de dos o más sistemas pueden combinarse económicamente por medio del empleo de líneas de transmisión interconectadas, a través de las cuales es posible efectuar el intercambio necesario o venta de energía. Estos enlaces pueden tener lugar entre sistemas que emplean diferentes voltajes, mediante el uso de autotransformadores, corrientemente colocados en el sistema de voltaje inferior.

a) Intercambios de energía

Combinaciones de energía hidráulica con vapor. Pese a la circunstancia de que dos sistemas independientes interconectados pueden tener entre sí una limitada capacidad de transmisión, ello resultaría útil en la introducción de economías tales como la conservación de la energía hidráulica almacenada sobre un sistema mediante el excedente de energía de vapor procedente de otro sistema. Un sistema con predominio del vapor siempre tendrá un excedente de capacidad y energía en las horas fuera de máxima. Durante este mismo período, un sistema predominantemente hidráulico con almacenamiento puede, a menudo, estar en condiciones de reducir el empleo de la energía almacenada mediante la importación de la energía excedente de vapor del otro sistema. Cuando el valor del agua almacenada es mayor que el costo de producción y transmisión de la energía generada por combustible, pueden resultar de tales transferencias ciertas economías entre los dos sistemas. En algunos casos será asunto de sustitución de una energía más económica producida a vapor en el sistema hidráulico con almacenamiento; en otros, puede ser una conversión de energía exterior de máxima a energía de máxima por medio de los embalses del sistema hidráulico. Las transacciones del sistema de la AVT con otros sistemas interconectados han sido, en el pasado, principalmente de la primera categoría.

Combinaciones de vapor con vapor. En razón de la diversidad existente entre los costos de combustible y energía de dos sistemas interconectados, es muy posible usar económicamente las líneas interconectadas para transferir coincidentemente el excedente de la energía más económica desde un sistema en reemplazo de la energía de combustible, más cara, en el otro sistema,

/mientras la

mientras la diferencia en costo sea mayor que las pérdidas por transmisión del sistema suministrante. Las transferencias de energía más recientes entre la AVT y sistemas vecinos han sido de este carácter.

b) Intercambio de capacidad

Reserva de capacidad. Uno de los grandes problemas de un sistema aislado consiste en la provisión de una capacidad de reserva. En todo momento es conveniente tener por lo menos capacidad de reserva suficiente para emplearla en la mayor interrupción posible que pueda ocurrir en el sistema. Dos o más sistemas de esta clase pueden, mediante suficientes interconexiones, compartir esta tarea con reservas combinadas más pequeñas que la suma de las que serían necesarias individualmente. Esto se debe a la circunstancia de que la probabilidad de que ocurran grandes interrupciones simultáneas en ambos sistemas es mucho menor, lo que se justifica progresivamente a medida que el número de sistemas aumenta. Con sus muchas interconexiones con otros sistemas, la AVT deposita gran confianza en sus reservas de interconexión. Con funcionamiento paralelo de los muchos enlaces de transmisión y sistemas de control coordinado de carga, una falla súbita en cualquier sistema es subsanada inmediata y automáticamente por la afluencia de energía desde los otros sistemas.

Diversidad. Existen otras modalidades capaces de contribuir a la explotación económica de los sistemas interconectados. Un sistema de esta clase puede tener una punta de carga en las primeras o en las últimas horas de la tarde, en tanto que el otro la puede tener en las primeras horas de la mañana. Si esto es efectivo, es posible que exista un intercambio diario de capacidad, en el cual la capacidad necesaria total de ambos sistemas, es menor que la que se usaría de otro modo al funcionar individualmente. De manera similar, un sistema puede tener su mayor demanda en una estación del año, y otro sistema en una estación diferente. Combinando sus sistemas para atender estas necesidades diferentes, se requiere menos capacidad en cada uno de ellos, debido a que se extrae energía del otro durante su período crítico.

Una de las grandes economías que resulta de estas operaciones combinadas de sistemas mediante interconexiones, es el ahorro de costos fijos, lo que hace posible las reducciones en la capacidad de producción que, de otro modo, sería necesaria al funcionar aisladamente.

6. Conclusiones

Muchas oportunidades para economía de explotación están al alcance de sistemas de energía compuestos de centrales hidráulicas (con almacenamiento), centrales a vapor e interconexiones con otros sistemas. Los medios para obtener algunas de estas economías son determinaciones bastante aproximativas. Otros son tan complejos y particulares que desafían los esfuerzos combinados del grupo de explotación de los sistemas.

RESUMEN

El objetivo fundamental en la explotación de un sistema eléctrico de servicio público es suministrar a todos los clientes un servicio seguro y de la manera más económica posible. Aunque muchos de los medios para lograrlo son comunes a todos los sistemas, otros están intrincadamente relacionados con las fuentes específicas de suministro de energía disponibles. Esto es especialmente exacto cuando el sistema cuenta con centrales hidráulicas (con almacenamiento), centrales a vapor e interconexiones adecuadas, de modo que existe con frecuencia cierto margen para escoger entre las fuentes de suministro de la energía a emplear.

Este documento trata de aquellas consideraciones especiales que afectan a la economía de la explotación y que son peculiares a los sistemas de tipo mixto en cuanto a fuentes de suministro. La materia está tratada en forma más bien general, desde el momento en que muchos de los procedimientos y requisitos de explotación de un sistema son necesariamente de carácter individual. La experiencia de la Autoridad del Valle del Tennessee (AVT) en la explotación de un sistema de energía de este tipo, constituye la base en que se apoyará gran parte de lo tratado en este estudio.

El documento está dividido en cinco partes, cada una de las cuales se trata someramente.

La Introducción presenta el problema fundamental de escoger entre la energía generada a base de almacenamiento hidráulico y la energía generada a vapor para el suministro de cargas al sistema en determinado momento. Se analiza el carácter variable e imprevisible de los caudales. En el caso de los sistemas con una provisión hidráulica sustancial, esto a menudo se traduce en la venta de energía susceptible de ser interrumpida y de la más típica energía a firme. Se describen los diferentes tipos de energía susceptible de ser interrumpida, suministrados por la AVT.

La segunda parte del documento versa sobre Empleo complementario de la energía hidráulica almacenada y de la energía térmica. Se explica aquí el uso de una curva de regulación básica para la entrega de energía a firme. La elección entre la energía generada por fuerza hidráulica y aquella otra por vapor para la satisfacción de las necesidades de energía de un sistema, se hace comparando el probable valor futuro del aumento máximo del almacenamiento, si éste es retenido, con su valor actual de sustitución por vapor,

si se usa. El valor futuro probable entraña la determinación del funcionamiento ideal para un "período de regulación" futuro, con una repetición de cada año de caudal para un muestreo representativo de los años (obtenido del registro histórico de caudales). Se ilustra el producto final, en las curvas económicas guías del sistema.

La tercera parte del documento versa sobre Coordinación complementaria de las capacidades de generación hidráulica, a vapor y por interconexión. Se analizan las características y el empleo de cada una de estas diferentes fuentes de energía para atender las demandas máximas del sistema, así como las variaciones horarias de carga por intervalos cortos. Se estudia e ilustra la economía resultante del empleo complementario de todas las fuentes.

La cuarta parte se refiere al Despacho económico. Se explican aquí los principios generales de la carga económica, o despacho económico, que permite la consideración detallada de las pérdidas progresivas de transmisión en la selección de las fuentes generadoras. La aplicación de estos principios a los sistemas accionados totalmente por vapor es sencilla. Sin embargo, en el caso de los sistemas con centrales hidráulicas, la aplicación es mucho más compleja. Se estudian estos problemas de aplicación.

La última parte del documento trata del Empleo de las interconexiones para la combinación económica de los sistemas. Se pasa revista al empleo de las interconexiones para el intercambio de energía entre un sistema que utiliza de preferencia el vapor y otro que hace lo propio con la fuerza hidráulica. También se presta atención al empleo de las interconexiones para aumentar al máximo, la generación desde las fuentes a vapor más económicas de ambos sistemas. Los intercambios de capacidad son muy importantes en la reducción de las necesidades de reserva de los sistemas considerados separadamente. Esto está analizado nuntamente con el empleo de las interconexiones para aprovechar la diversidad en las demandas de los sistemas de energía conectados.

FIGURE 11
GRAFICO 11

IDEAL OPERATION AND VALUE OF STORAGE
EXPLOTACION Y VALOR IDEALES DEL ALMACENAMIENTO

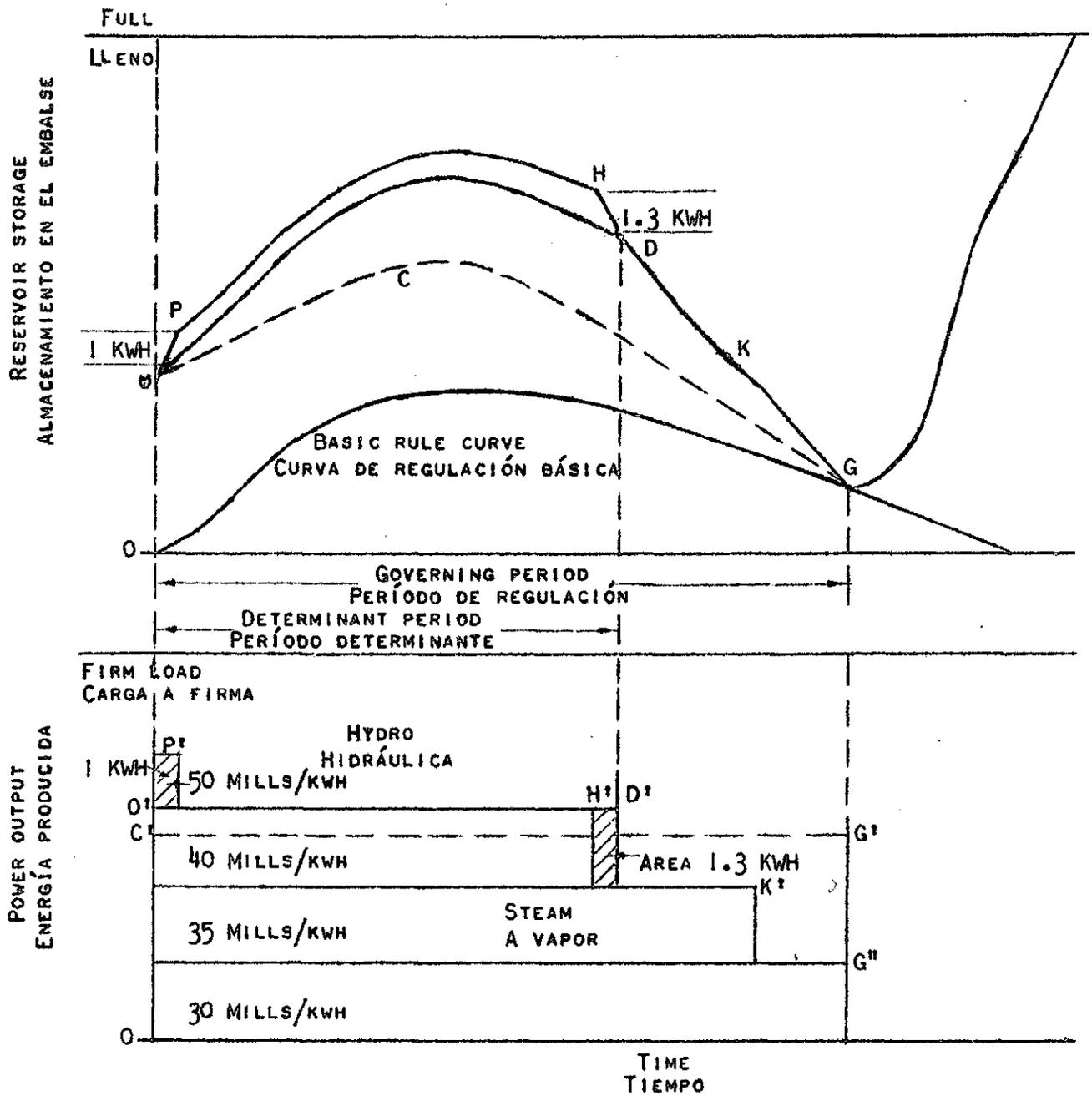
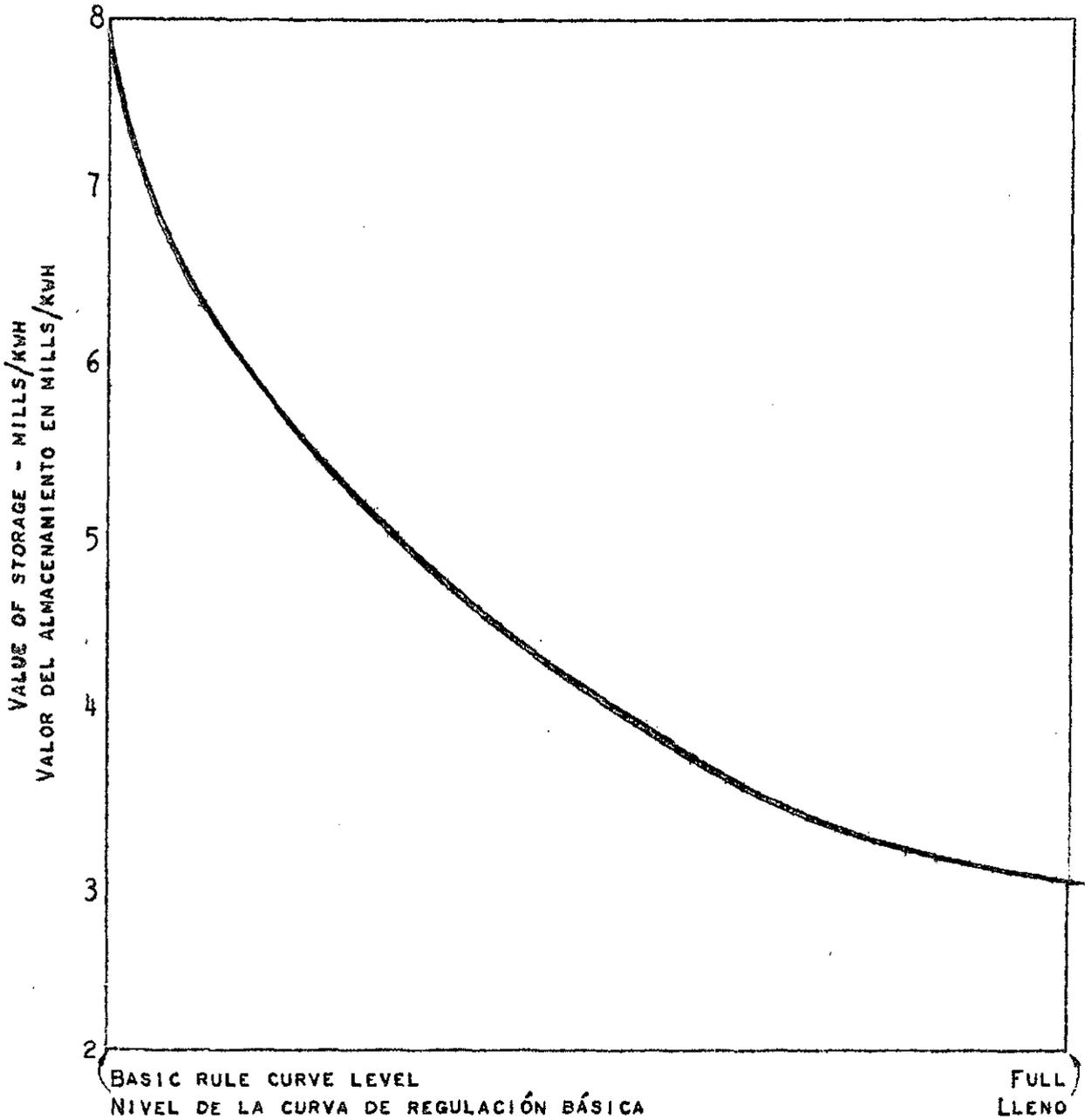




FIGURE III
GRAFICO III

RELATIONSHIP OF VALUE OF STORAGE TO RESERVOIR CONTENT ON A GIVEN DATE

RELACION DEL VALOR DEL ALMACENAMIENTO CON EL CONTENIDO
DEL EMBALSE EN UNA FECHA DADA



RESERVOIR STORAGE - JUNE 1
ALMACENAMIENTO EN EL EMBALSE AL 1 DE JUNIO

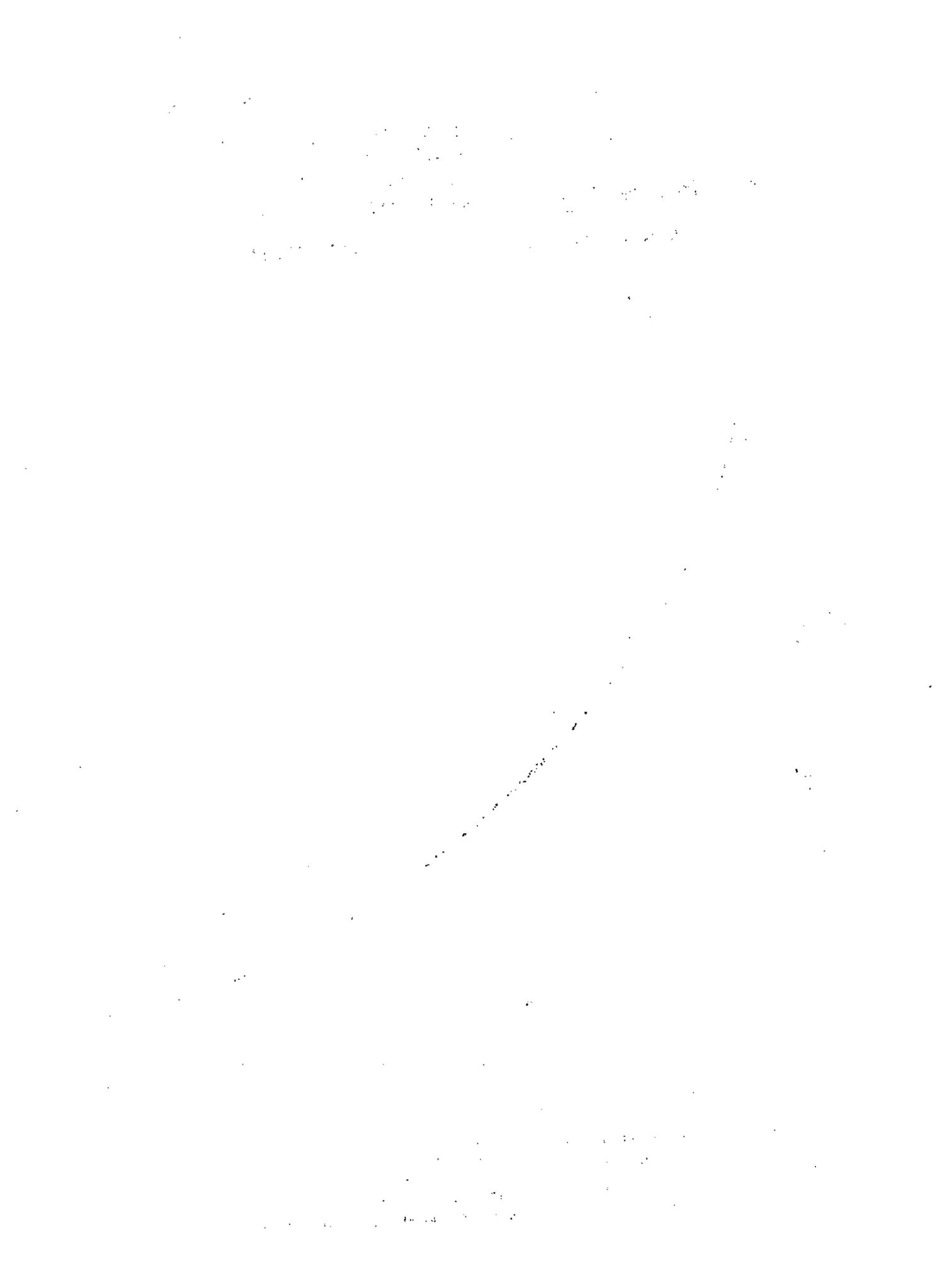
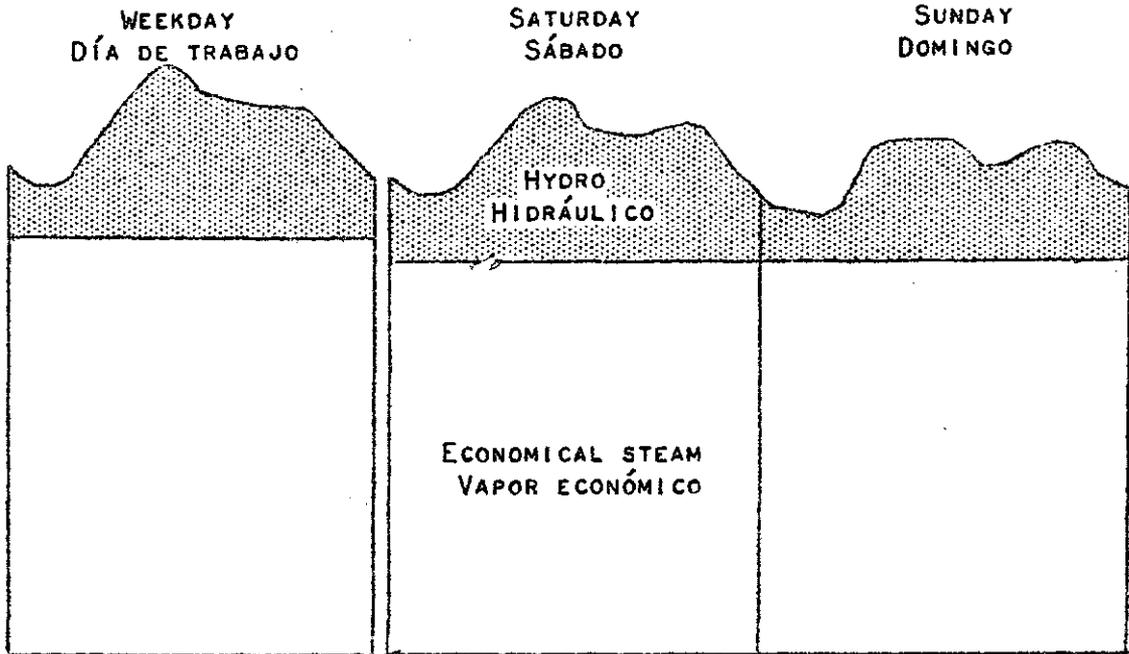


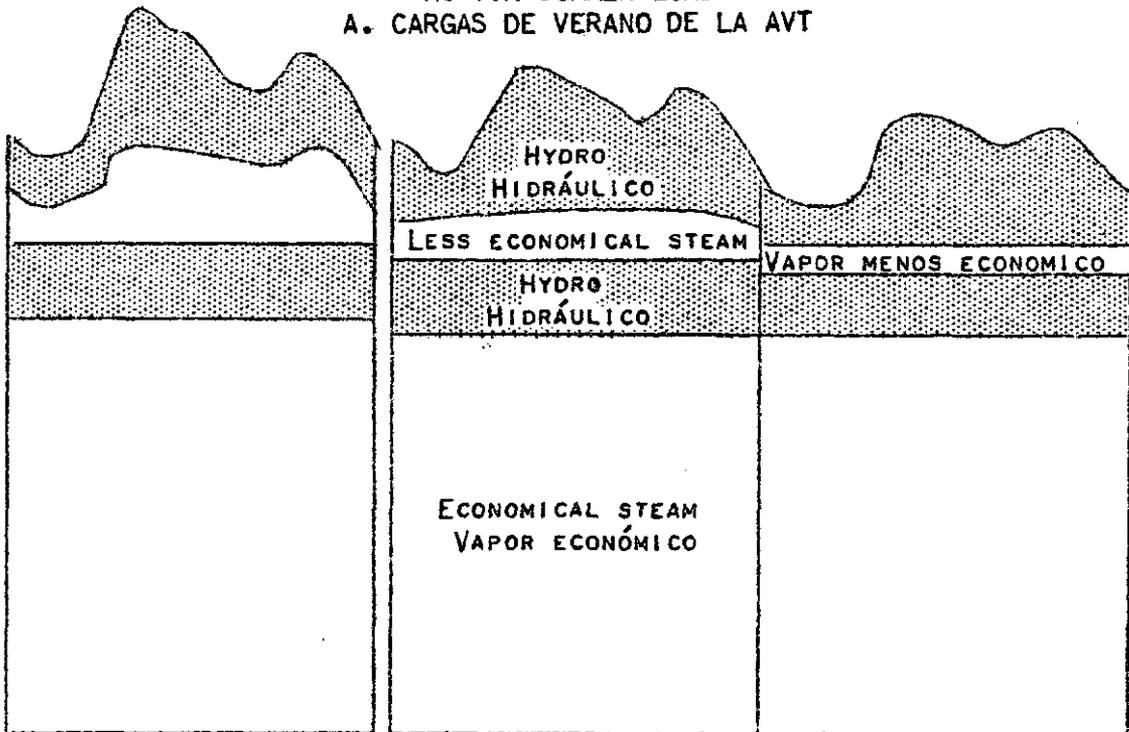
FIGURE VI
GRAFICO VI

COMPLEMENTARY USE OF HYDRO AND STEAM CAPACITY
EMPLEO COMPLEMENTARIO DE LA CAPACIDAD HIDRAULICA Y DE VAPOR

TRIM LINE — LÍNEA DE COMPENSACIÓN



A. TVA SUMMER LOADS
A. CARGAS DE VERANO DE LA AVT



B. TVA WINTER LOADS
B. CARGAS DE INVIERNO DE LA AVT

