



# Valor del Agua y Condiciones Especiales de Operación

Subgerencia de Programación y Estudios  
Gerencia de Operación

Mayo 2019



# Temario

Coordinador Eléctrico Nacional - DPRO

- 1 **Introducción**
- 2 **Modelos para la Programación**
- 3 **Modelo PLP y Valor del Agua**
- 4 **Modelo Plexos y Valor del Agua**
- 5 **Condiciones Especiales de Operación**
- 6 **Centrales de Pasada con Capacidad de Regulación**







# Introducción

Coordinador Eléctrico Nacional



# Introducción

## OBJETIVOS Y FUNCIONES

De acuerdo a lo establecido en la Ley de Servicios Eléctricos (artículo 72°-1), la operación de las instalaciones eléctricas que operen interconectadas entre sí, deberá coordinarse con el fin de:



Preservar la seguridad del servicio en el sistema eléctrico.



Garantizar la operación más económica para el conjunto de las instalaciones del sistema eléctrico.



Garantizar el acceso abierto a todos los sistemas de transmisión, en conformidad con la ley.



[www.coordinador.cl](http://www.coordinador.cl)



[@coord\\_electrico](https://twitter.com/coord_electrico)



[YouTube](https://www.youtube.com/channel/UC...)



[Linkedin](https://www.linkedin.com/company/coord_electrico)

[Coordinamos la Energía de Chile](#)



# Introducción

- Para garantizar la operación más económica, el Coordinador utiliza modelos de operación.
- En estos modelos, además de las restricciones técnicas de las instalaciones se incorporan restricciones de seguridad.
- Como resultado de la ejecución de los modelos de operación, se obtienen programas de operación, costos marginales de energía y valores del agua de los embalses, entre otros resultados.







Modelos para la  
Programación

Coordinador Eléctrico Nacional



# Operación Económica del SEN

¿Cuál es el problema a resolver?

Minimizar el costo esperado de operación y falla del sistema.

¿Problemas asociados?



[www.coordinador.cl](http://www.coordinador.cl)



[@coord\\_electrico](https://twitter.com/coord_electrico)



[YouTube](https://www.youtube.com/coord_electrico)



[Linkedin](https://www.linkedin.com/company/coord_electrico)

[Coordinamos la Energía de Chile](#)

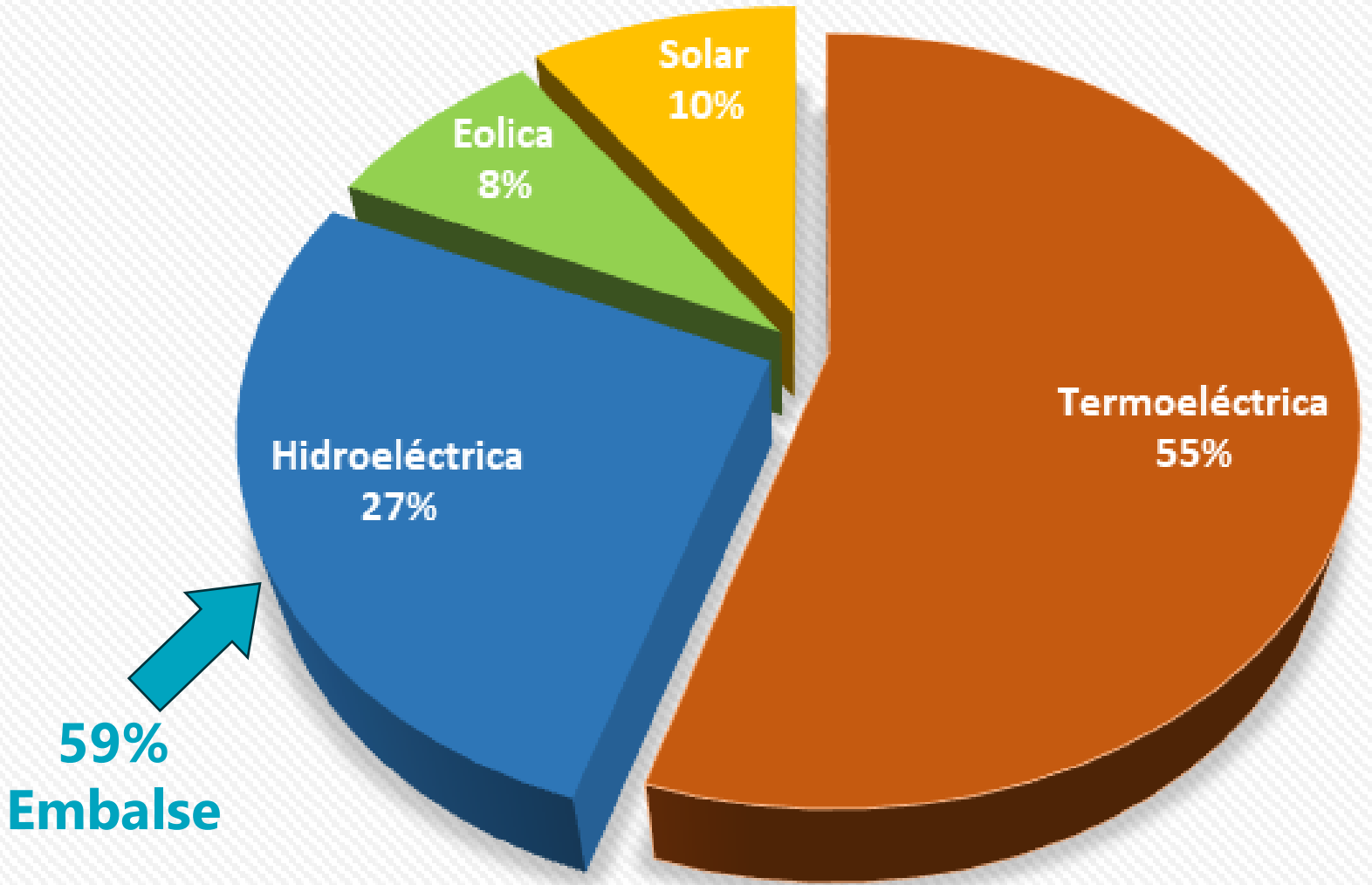


# DESCRIPCIÓN DEL SEN

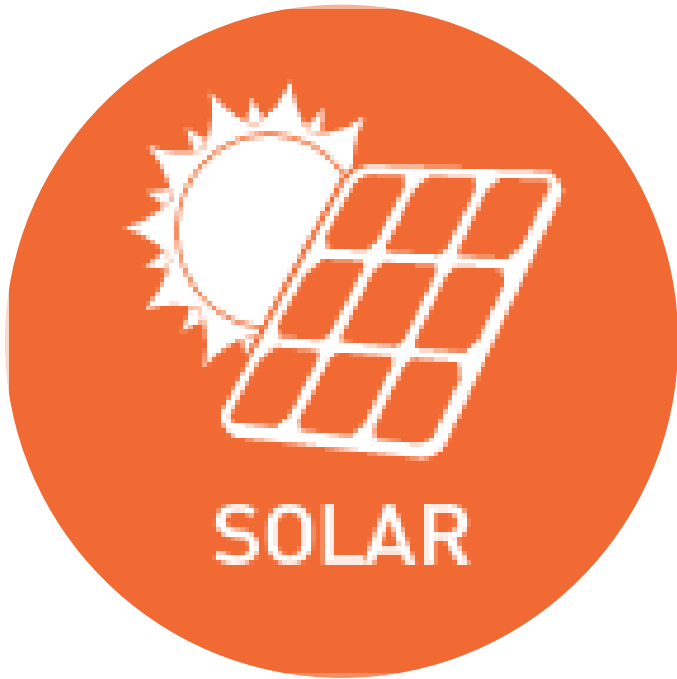
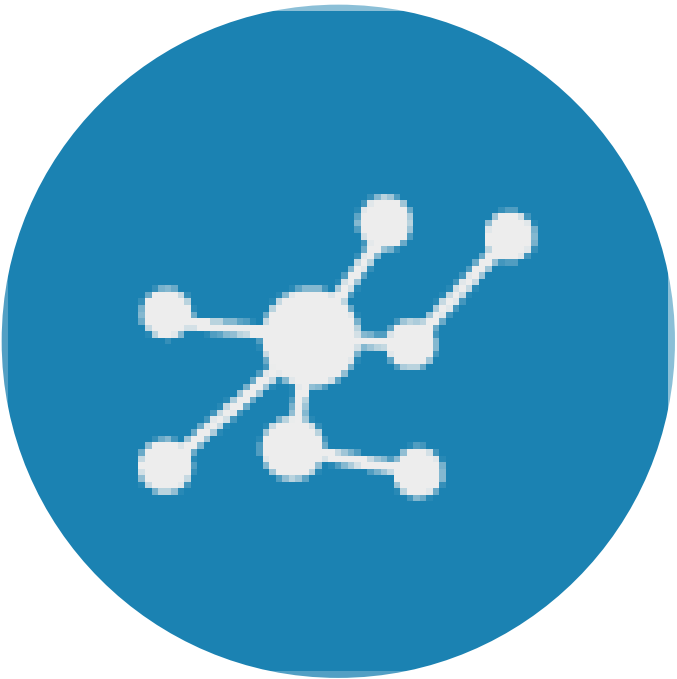
Capacidad Instalada en el Sistema

El SEN está compuesto por centrales hidráulicas (pasadas y embalses), térmicas (biomasa, carbón, ciclos combinados, turbinas de gas, motores, geotérmicas), solares fotovoltaicas y eólicas.

Capacidad Instalada en el SEN



24 854 [MW] (mar-19)



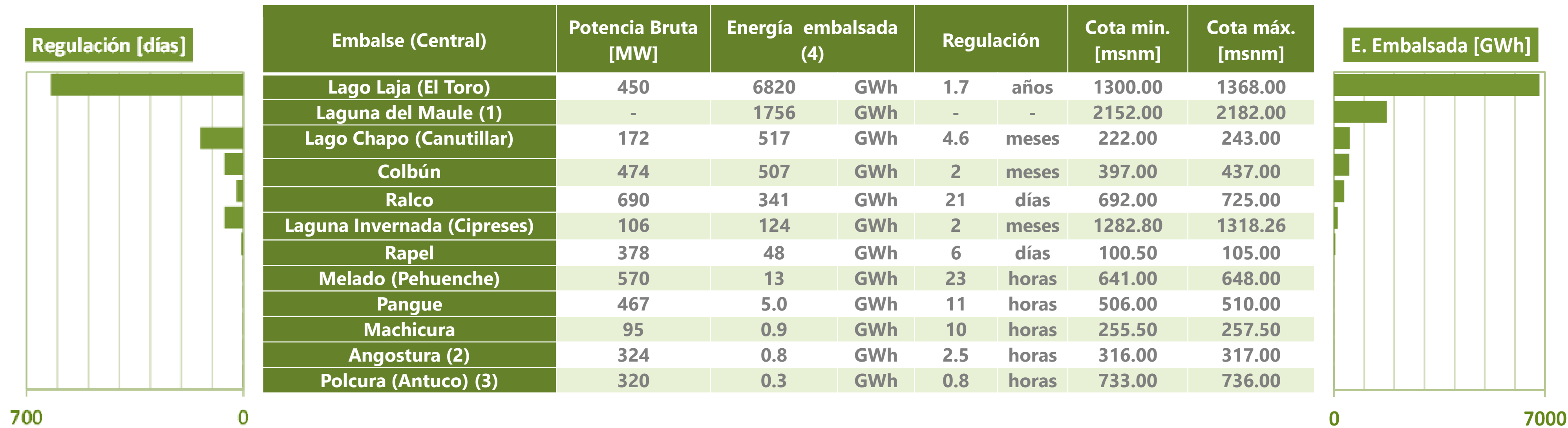


# DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

## EMBALSES Y CAPACIDAD DE REGULACIÓN

Los embalses cuentan con características muy diferentes:

- Volúmenes de regulación distintos
- Regímenes de afluentes distintos (nival o pluvial). Depende de latitud y altura.
- Uso compartido con riego y/o con restricciones estivales.

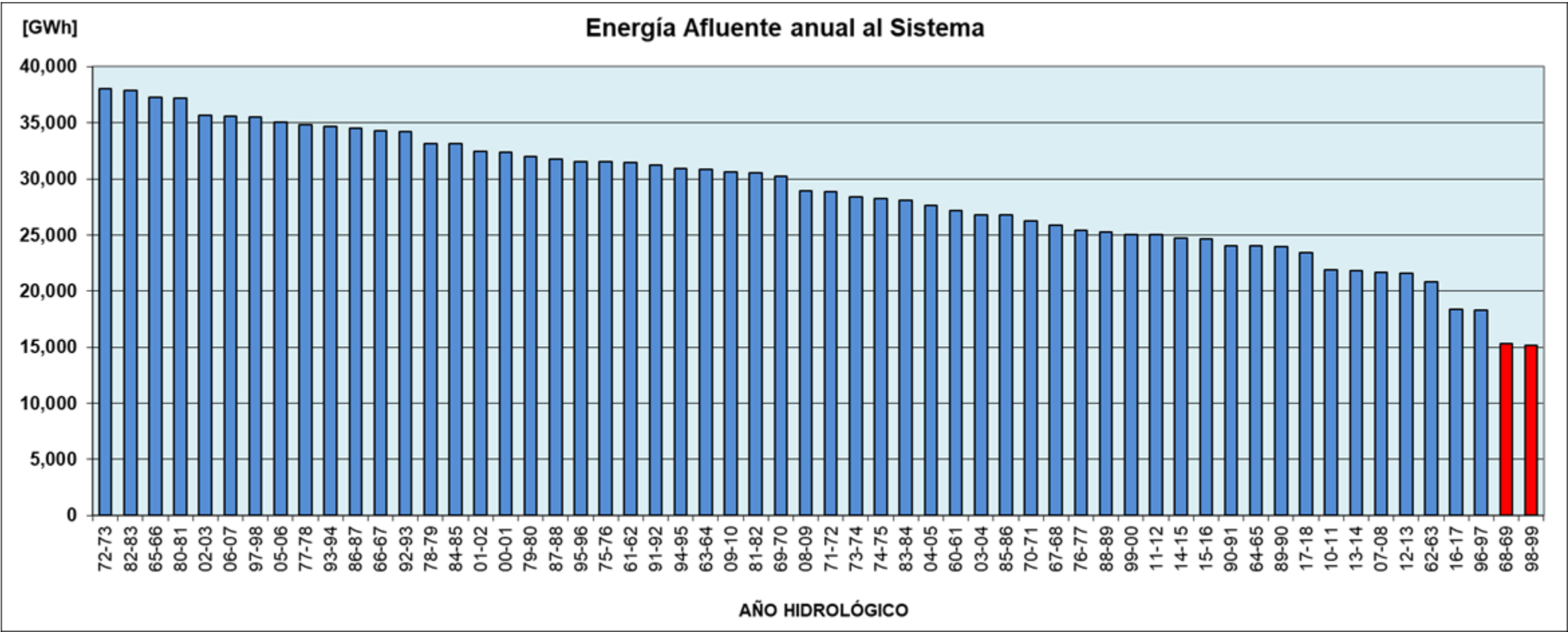


- (1) Embalse para riego y generación (La energía embalsada considera que utilizan el agua las centrales: Isla, Curillinke , Loma Alta y Pehuenche).
- (2) No considerada como embalse.
- (3) No considerada como embalse.
- (4) No considera generación de centrales en serie hidráulica, excepto para la Laguna del Maule.



# DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

## ENERGÍA AFLUENTE AL SISTEMA

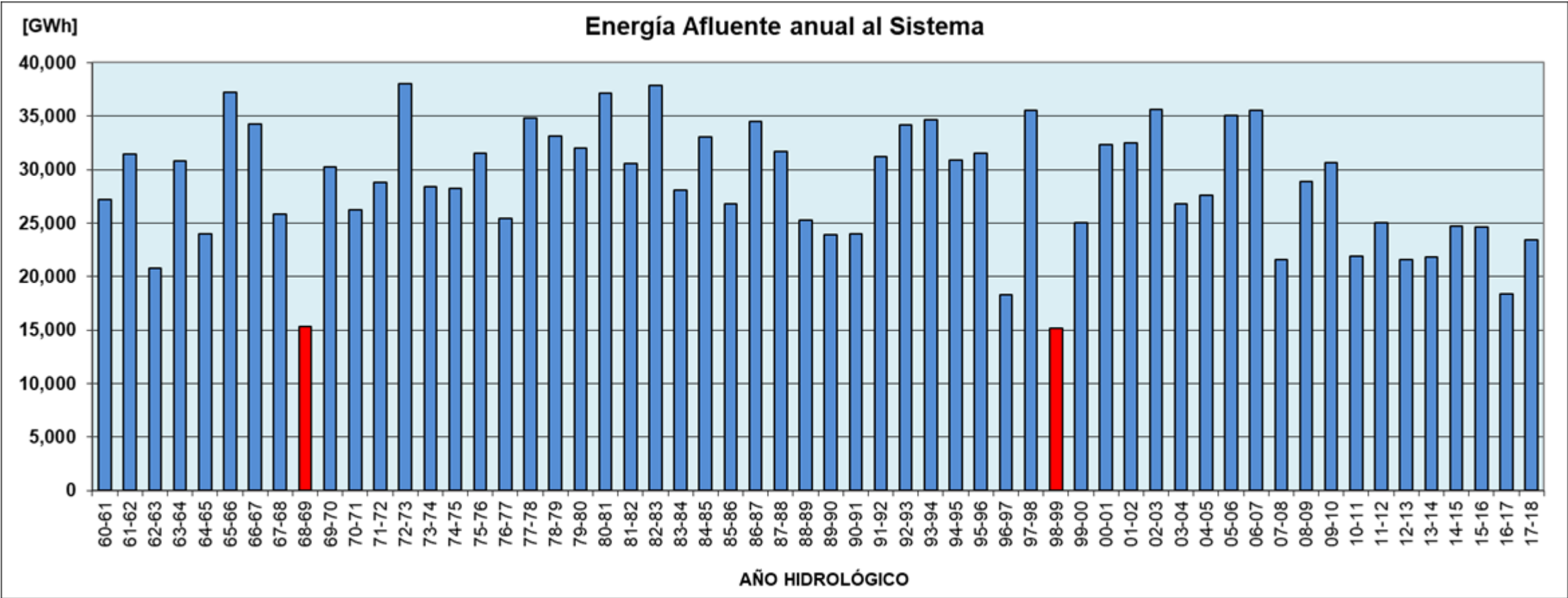


1er problema: El sistema está expuesto a gran variabilidad hidrológica.

Actualmente, el Coordinador utiliza 58 años hidrológicos

El cálculo de la energía afluente no considera capacidad de regulación ni energía embalsada previamente.

La diferencia entre el año más húmedo (72-73) y el más seco (98-99) es de 22.9 [TWh] (aprox. 7 ciclos combinados operando a plena carga un año)





# OPERACIÓN ECONÓMICA

¿Qué decisiones se deben tomar para operar de manera segura y económica según la Ley?

¿Cuánta energía utilizar a partir de los embalses? ¿Cómo distribuirla en un período de tiempo?

## Coordinación Hidrotérmica

Decisión

Almacenar agua

Utilizar agua

Efecto

Mayor Generación  
Térmica

Menor Generación  
Térmica

Riesgo

Vertimiento

Agotamiento

Problema a solucionar:

Energía afluente al sistema es incierta, posee naturaleza estocástica, y debe aprovecharse adecuadamente dada las limitaciones de embalsamiento.



[www.coordinador.cl](http://www.coordinador.cl)



@coord\_electrico



YouTube



LinkedIn

Coordinamos la Energía de Chile





# OPERACIÓN ECONÓMICA

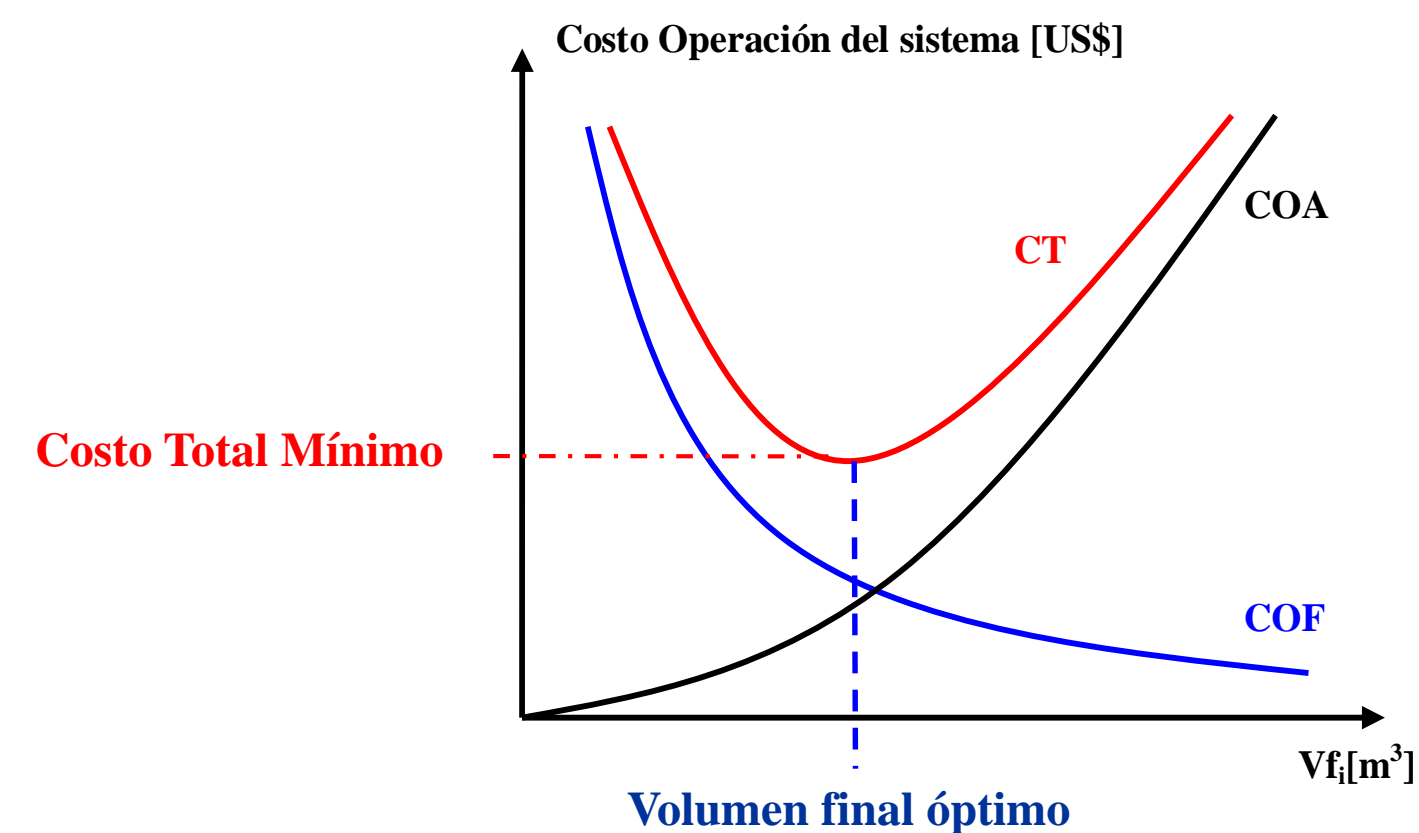
## CONCEPTUALMENTE

- 2do problema: El problema es complejo dado que el horizonte es extenso y se requiere detalles a nivel de horas para operar.

Solución práctica: dividir el problema en etapas temporales (largo, mediano o corto plazo). Principio de optimalidad.

- En cada etapa siempre se podrán ver dos componentes principales:
  - Costo de Operación Actual (COA)
  - Costo de Operación Futuro (COF)

El costo de operación futuro puede escribirse en función de los volúmenes finales de cada período





# OPERACIÓN ECONÓMICA

## CONCEPTUALMENTE

- Dado que se considera incertidumbre en el recurso hídrico, entonces la función de costo futuro se transforma en una función de costos futuros esperados.
- A modo conceptual, esta función se calcula utilizando simulaciones del sistema con diferentes condiciones iniciales y diferentes condiciones hidrológicas futuras para cada una de ellas.
- Entonces, ¿qué se busca finalmente?

**Minimizar costo esperado de operación y falla considerando la incertidumbre hidrológica.**

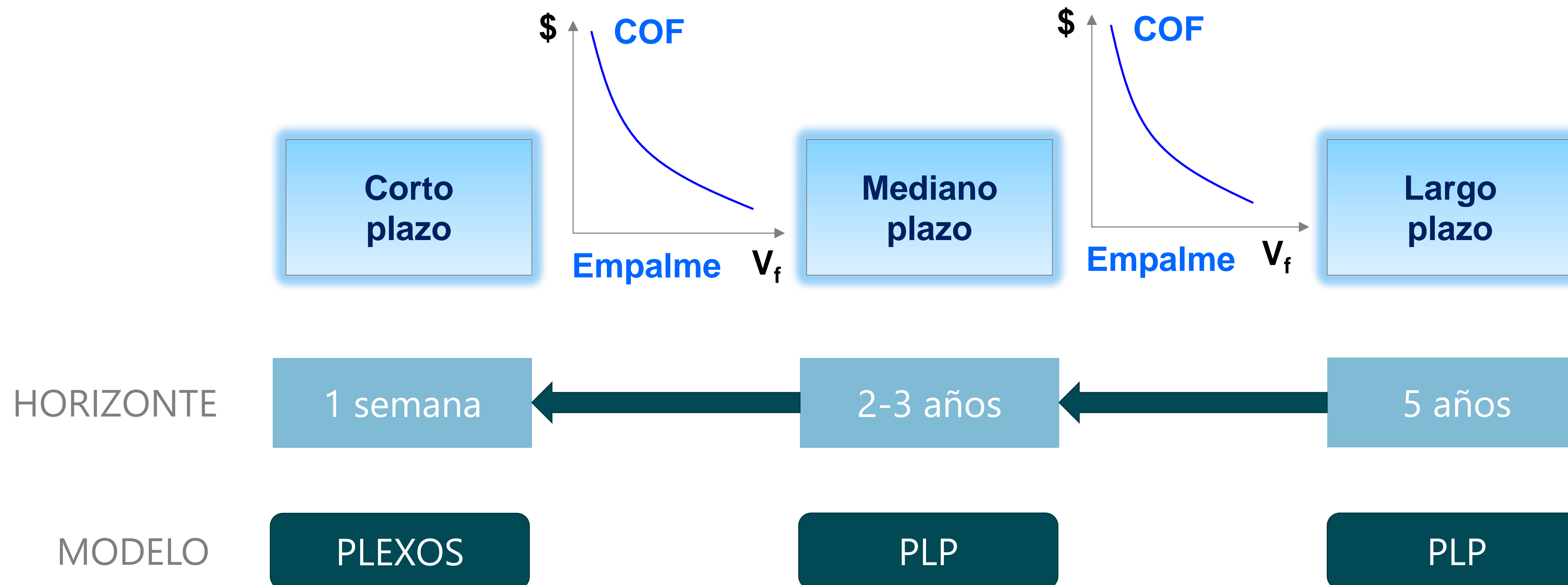




# OPERACIÓN ECONÓMICA

## EJECUCIÓN DE LOS MODELOS

¡Se necesitan condiciones de borde para las simulaciones!  
Los modelos se acoplan o “empalman” por medio de la función de costo futuro.







## Modelo PLP y Valor del Agua

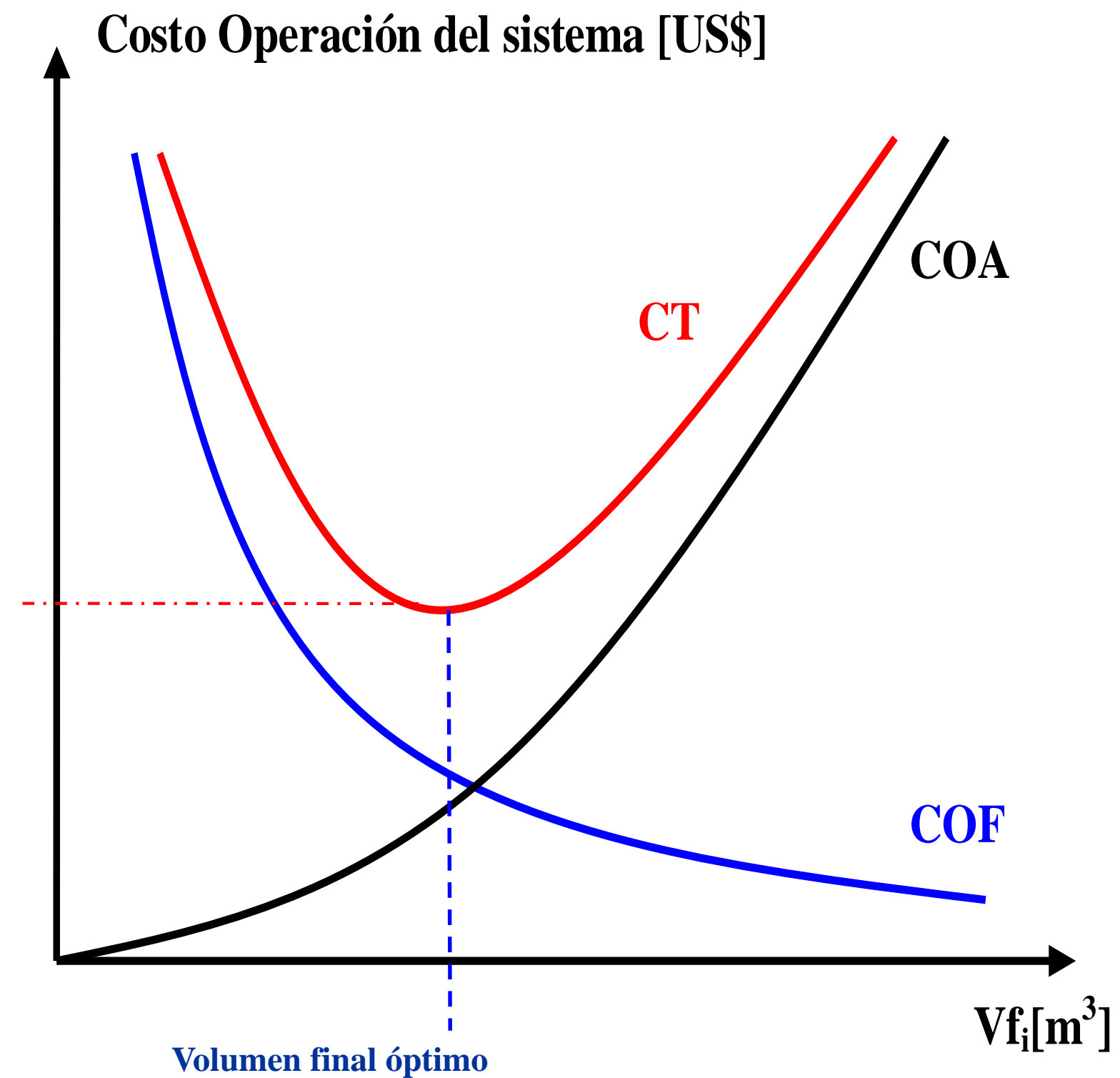
Coordinador Eléctrico Nacional



# EL MODELO PLP RESUELVE LA PLANIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN EN EL MEDIANO Y LARGO PLAZO.

- Minimiza el costo total esperado de operación y racionamiento de un sistema eléctrico.
- Considera simultáneamente las restricciones de transmisión y de balance hidráulico (multinodal-multiembalse).
- Ha sido adaptado al SEN para incluir en el problema los convenios de riego del Maule y del Laja.
- Representa la incertidumbre hidrológica a través de secuencias de caudales "históricas".
- Para solucionar el problema, el Modelo PLP emplea el algoritmo de Programación Dinámica Dual Estocástica.
- La estrategia de solución se basa en la descomposición del problema. El problema de programación es descompuesto en varios sub-problemas de una etapa, en cada uno de ellos la función objetivo es minimizar la suma de los costos de operación inmediatos y futuros.

Costo Total Mínimo





# APROXIMACIÓN DE LA FUNCIÓN DE COSTO FUTURO.

Para solucionar el problema se utiliza la Programación Dinámica Dual Estocástica.

## PROGRAMACIÓN DINÁMICA DUAL:

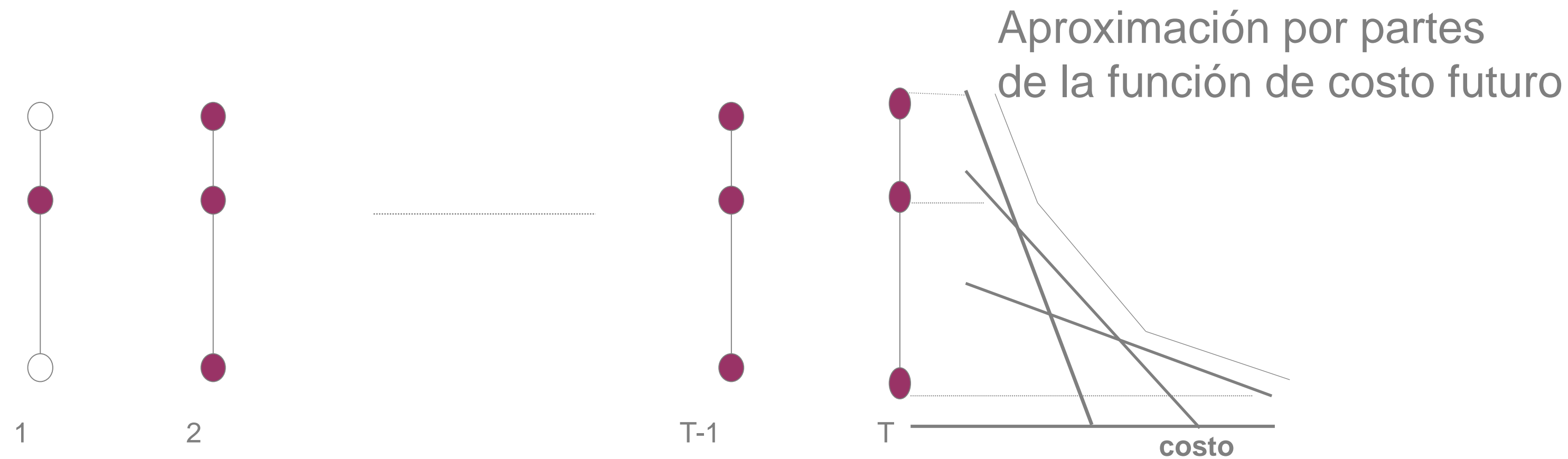
- El algoritmo se basa en que la función de costo futuro es aproximada por funciones analíticas en vez de valores discretos (PD clásica).
- Se puede demostrar que la función de costo futuro se representa en forma exacta como una función lineal por partes.
- El algoritmo utiliza una relajación de esta función como aproximación.



# PROGRAMACIÓN DINÁMICA DUAL

**Como resultado del proceso se obtiene una aproximación lineal por partes de la FCF**

- Gráficamente se construye una aproximación de la siguiente forma.



- Cuando el problema converge, los valores del agua de los embalses corresponden a los valores de la pendiente de la función de costo futuro.





Modelo Plexos y  
Valor del Agua

Coordinador Eléctrico Nacional



# EL MODELO PLEXOS RESUELVE LA PROGRAMACIÓN DE LA OPERACIÓN EN EL CORTO PLAZO

## Modelo PLEXOS (horizonte de 1 semana):

- Minimiza costo total de operación y falla del sistema.
- Considera restricciones de transmisión, de embalses, de reservas operativas, tiempos de operación de centrales térmicas, costos de encendido y apagado.
- Todos los datos del problema son **determinísticos**.
- Mayor detalle en el modelamiento del sistema que en modelo PLP (e.g. resolución horaria)
- Utiliza el algoritmo *Branch & Cut* para resolver un problema de Programación Entera-Mixta.



# VALOR DE AGUA OBTENIDO DESDE EL MODELO PLEXOS

## Formulación del Programa:

$$\text{FUNCIÓN OBJETIVO:} = \sum_{t=1}^{nh} \sum_{i=1}^{ncT} [CVar_{Ti,t} \cdot P_{Ti} + y_{Ti} \cdot CP_{Ti} + z_{Ti} \cdot CD_{Ti}] + \alpha$$

- Abastecimiento de la demanda.
- Restricciones del sistema de transmisión.
- Restricciones de reserva.
- Restricciones de operación de unidades.
- Restricciones de operación de embalses:

$$V_f - V_i + V_{gen} + V_{vert} + V_{filt} = V_{afluente} \quad (*)$$

- $\alpha$ : Función de Costo Futuro.

$$\alpha \geq \psi_i + \sum_{e=1}^{ne} Vf_{e,i} \cdot \pi_{e,i}$$

- Una vez resuelto el problema de optimización, del análisis de sensibilidad se obtienen los valores del agua de los embalses, con resolución horaria:  $(\pi_{e,t})$ . Estos valores, corresponden al precio sombra  $\lambda$ , de la restricción (\*).





## Condiciones Especiales de Operación de Embalses (CEO)

Coordinador Eléctrico Nacional



# DEFINICIONES (REGLAMENTACIÓN ACTUAL)

## Condiciones Especiales de Operación (CEO):

- Se entiende por Condiciones Especiales de Operación (CEO), aquellas circunstancias que afectan a las centrales de embalse que el Coordinador haya definido que se les debe calcular un costo variable de operación o costo de oportunidad de su energía embalsada, y que hacen necesario redefinir sus prioridades de generación **de modo de optimizar la operación del sistema.**

## Condición de Vertimiento:

- Las empresas propietarias de centrales de embalse, deben informar al CDC y a los CO de las restantes empresas coordinadas, cuando prevean fundadamente que en el transcurso de las próximas **48 horas** uno de sus embalses enfrenta vertimientos no considerados en la programación de la operación. A partir del momento en que la empresa informe dicha Condición, la central respectiva se considerará declarada en “**condición de vertimiento**”.
- Los antecedentes y cálculos que justifican la estimación de caudales utilizada deberán ser remitidos al CDC en conjunto con la declaración correspondiente.
- El costo de oportunidad para la central de embalse declarada en esta CEO, será igual a **cero**.



# DEFINICIONES (REGLAMENTACIÓN ACTUAL)

## Condición de Vertimiento:

- Con la entrada en vigencia de una condición de vertimiento, el CDC le dará colocación máxima posible a la central declarada en dicha Condición y reasignará económicamente la generación del resto de las centrales, considerando las restricciones operacionales del sistema. Para ello, el CDC deberá considerar que la central declarada en condición de vertimiento tiene prioridad de colocación con respecto a cualquier otra central de costo variable distinto de cero y que no se encuentre en iguales condiciones.
- Con respecto a la prioridad de colocación de los embalses ubicados aguas arriba de la central declarada en condición de vertimiento, se considerará que sus costos de oportunidad toman el valor indicado en las Políticas de Operación cuando ocurre esta circunstancia.
- Comunicada la cancelación de una condición de vertimiento de un embalse, éste se considerará automáticamente en “**condición de vertimiento evitable**” y el CDC deberá asignar a la central afectada la generación necesaria para evitar el vertimiento en las próximas horas y reasignará económicamente la generación del resto de las centrales, considerando las restricciones operacionales del sistema y lo establecido en las Políticas de Operación vigentes. A partir de este momento serán válidas las condiciones definidas para la condición de vertimiento evitable.



# DEFINICIONES (REGLAMENTACIÓN ACTUAL)

## Condición de Vertimiento Evitable:

- Las empresas propietarias de centrales de embalse, deberán informar al CDC y a los CO de las demás empresas coordinadas, cuando prevean fundadamente que en el transcurso de las próximas **72 horas** uno de sus embalses enfrentan vertimientos no considerados en la programación de la operación y que pueden ser evitados aumentando la generación de la central correspondiente. A partir de ese momento, la central respectiva se considerará declarada en **condición de vertimiento evitable**.
- Para determinar esta Condición, se deberá considerar el programa de generación vigente y el caudal afluente que se está presentando como promedio en las últimas 6 horas, **o el que pueda estimarse fundadamente**. En este último caso, los antecedentes y cálculos que justifican la estimación de caudales informada deberán ser remitidos al CDC en conjunto con la declaración correspondiente.
- Con la entrada en vigencia de una condición de vertimiento evitable, el CDC asignará a la central afectada la generación necesaria para mantener cota y reasignará económicamente la generación del resto de las centrales, considerando las restricciones operacionales del sistema y lo establecido en las Políticas de Operación vigentes.



# DEFINICIONES (REGLAMENTACIÓN ACTUAL)

## Condición de Vertimiento Evitable:

- La condición de vertimiento evitable no modifica el costo de oportunidad ni las prioridades de colocación de los embalses ubicados aguas arriba de la central declarada en vertimiento evitable.
- Una condición de vertimiento evitable de una central de embalse se cancelará automáticamente con una declaración de vertimiento de la misma central.
- Comunicada la cancelación de una condición de vertimiento evitable de un embalse, el CDC deberá reasignar económicamente la generación del resto de las centrales, considerando las restricciones operacionales del sistema y lo establecido en las Políticas de Operación vigentes, considerando como costo de oportunidad de dicho embalse el indicado en las Políticas de Operación vigentes.
- A una central de embalse declarada en condición de vertimiento evitable no se le considerará el costo de oportunidad preestablecido en las Políticas de Operación vigentes. Para los efectos de definir el costo marginal de cada hora, éste corresponderá al más bajo de los costos variables de las centrales que modificaron su generación, como resultado de esta declaración.



# DEFINICIONES (REGLAMENTACIÓN ACTUAL)

## Condición de Agotamiento:

- Las empresas propietarias de centrales de embalse, deberán informar al CDC y a los CO de las demás empresas coordinadas, cuando prevean fundadamente que en el transcurso de las próximas **72 horas** uno de sus embalses enfrenta agotamiento del volumen de regulación e imposibilidad de cumplir con el programa de generación. A partir de ese momento, la central respectiva se considerará declarada en “**condición de agotamiento**”.
- Para determinar esta Condición, se deberá considerar el programa de generación vigente y el caudal afluente que se está presentando como promedio en las últimas 6 horas, **o el que pueda estimarse fundadamente**.
- Con la entrada en vigencia de una condición de agotamiento, el CDC asignará a la central afectada una generación menor al afluente diario para evitar el agotamiento en las próximas horas y reasignará económicamente la generación del resto de las centrales, considerando las restricciones operacionales del sistema, las Políticas de Operación vigentes y las CEO que se encuentren vigentes.
- El costo de oportunidad de la central que cancela su condición de agotamiento será el indicado en la Política de Operación vigente al momento de la cancelación.



# DEFINICIONES (REGLAMENTACIÓN ACTUAL)

## Condición de Agotamiento:

- A una central declarada en condición de agotamiento no se le considerará el costo de oportunidad preestablecido en las Políticas de Operación vigentes.
- Para los efectos de definir el costo marginal de cada hora, éste corresponderá al más alto de los costos variables de las centrales que modificaron su generación, como resultado de esta declaración.
- Al mismo tiempo las centrales ubicadas aguas arriba no verán modificado su costo de oportunidad indicado en las Políticas de Operación vigentes.



# CUADRO RESUMEN

## Cuadro resumen

Variable \ Condición	Vertimiento	Vertimiento Evitable	Agotamiento
Tiempo de evaluación	48 horas	72 horas	72 horas
Valor del agua	Nulo	El más bajo de los costos variables de las centrales que modificaron su generación, como resultado de esta declaración	(En la práctica) El más alto de los costos variables de las centrales que modificaron su generación, como resultado de esta declaración.
Cambios de despacho	La central se lleva a plena carga (salvo vertimiento generalizado)	Se reasigna la generación para mantener cota.	Se asigna una generación menor que el afluente al embalse.
Valor del agua (centrales aguas arriba)	Se modifica considerando esta condición ( valor definido previamente en la lista de prioridades)	No cambia	No cambia







## Centrales de Pasada con Capacidad de Regulación

Coordinador Eléctrico Nacional



# CENTRALES DE PASADA CON CAPACIDAD DE REGULACIÓN

## Características:

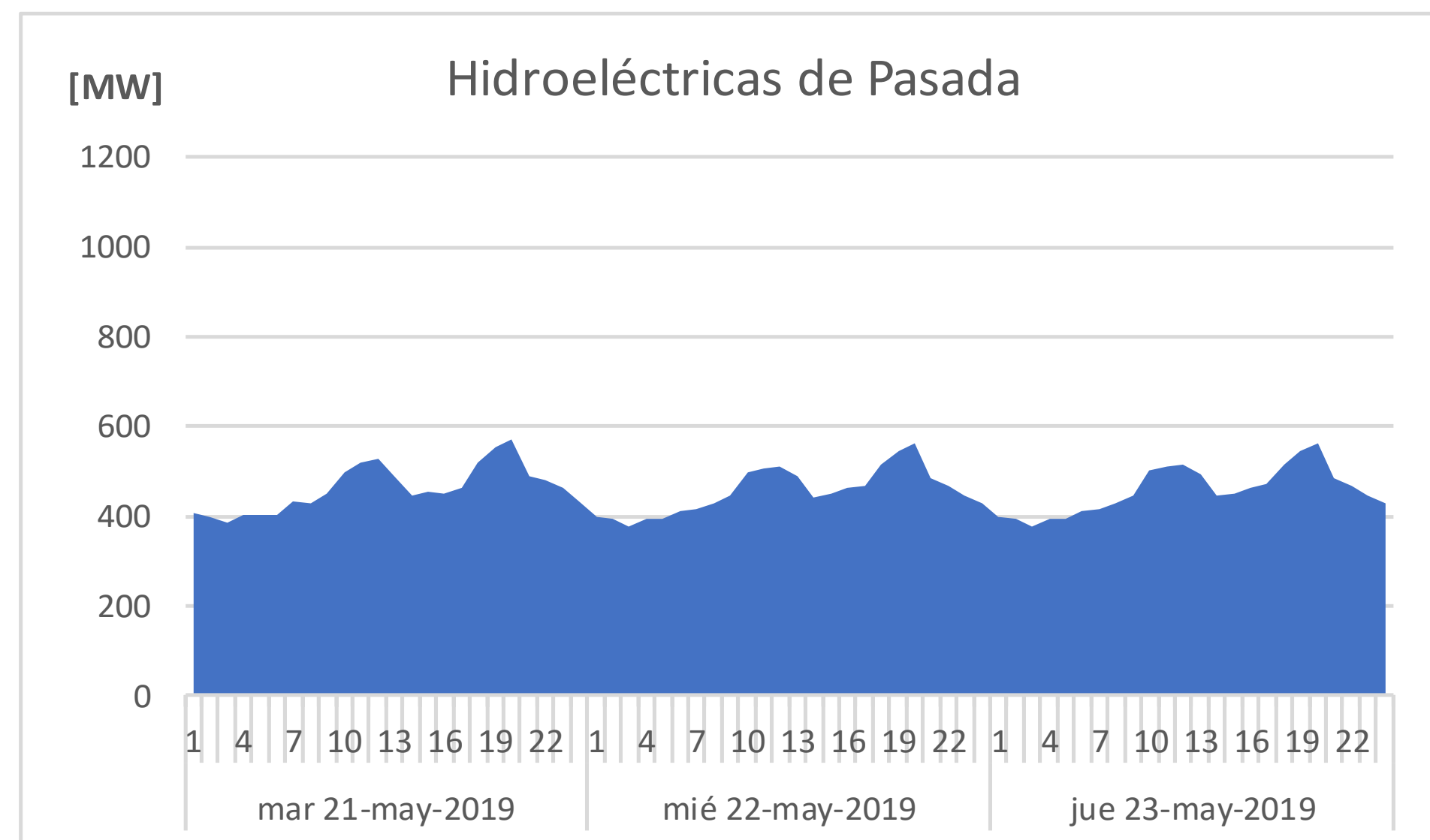
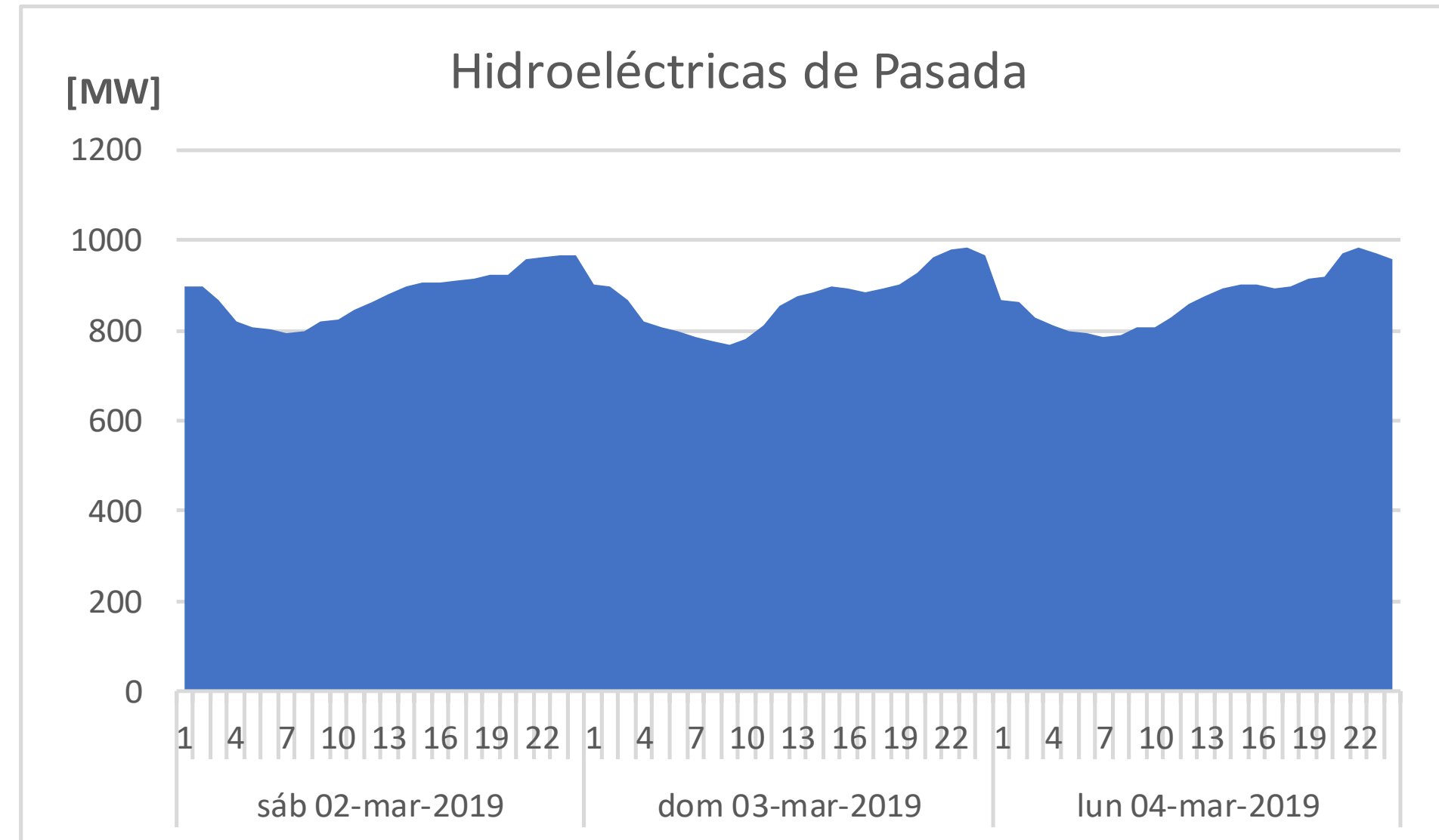
- Centrales de pasada con capacidad de regulación de horas, que por lo general almacenan agua durante la madrugada para generar durante horas de mayor consumo.
- Estas centrales no tienen capacidad de regulación suficiente para mover agua (energía) entre días.
- Existen restricciones de caudal ecológico o restricciones de riego aguas abajo.

## Coordinación:

- Los Coordinados informan un programa de generación que es revisado por el Coordinador.
- El Coordinador modifica este programa por razones económicas o de seguridad (trabajos en el sistema de transmisión).
- El programa de generación es incorporado a la programación.
- El tiempo real, el Coordinador puede modificar el despacho de las centrales de pasada con capacidad de regulación.



# CENTRALES DE PASADA CON CAPACIDAD DE REGULACIÓN



## Programación 02-Mar-2019:

- Se mezcla el efecto de la capacidad de regulación de las centrales de pasada con la variación horaria de la disponibilidad de agua para generación.

## Programación 21-May-2019:

- El afluente de base es menor que en el caso anterior.
- La capacidad de regulación se utiliza al medio día y en la hora de demanda máxima de la tarde,