



CONTENIDO

Capítulo 6: Servicios Complementarios

6.1 Confiabilidad, suficiencia y seguridad

6.2 Definición de servicios complementarios

6.3 Mercados de servicios complementarios



6.1 Confiabilidad en sistemas eléctricos

- **Confiabilidad:** Seguridad + Suficiencia
- **Seguridad de servicio:**
 - Habilidad del sistema para soportar perturbaciones sorpresivas
 - Escala temporal de corto plazo.
 - Ligado a *SSCC* y dimensionamiento de reservas.
 - Servicio con un carácter cercano al bien público.
 - Se suele dimensionar en términos de la respuesta a un conjunto de "contingencias" preestablecidas.
- **Suficiencia:**
 - Capacidad para abastecer la totalidad de la demanda, en todo momento bajo condiciones razonablemente esperados.
 - Escala temporal de mediano y largo plazo.
 - Servicio con un carácter más bien privado.
 - Se suele dimensionar por medio de modelos probabilísticos.



6.1 Seguridad en sistemas eléctricos

- **Necesidad:**
 - Mercado eléctrico descansa sobre la infraestructura del sistema.
 - Participantes no tienen la opción de cambiarse de sistema.
 - Costos de los cortes de suministro suelen ser muy elevados.
 - Consumidores tienen expectativas sobre la continuidad del suministro.
 - Costo de esta seguridad debe equiparar sus beneficios.
- **Noción de seguridad:**
 - Sistema debería operar en forma continua si las condiciones no cambian.
 - Sistema debería seguir estable frente a perturbaciones comunes o plausibles:
 - Falla de equipos.
 - Salida imprevista de una unidad de generación.
 - Cambios rápidos en la demanda.
 - Operador debería evaluar consecuencias y usar:
 - Acciones preventivas.
 - Acciones correctivas.



6.1 Acciones para preservar la seguridad

- **Acciones Preventivas:**
 - Llevar el sistema a un estado tal que sea capaz de permanecer estable frente a una contingencia .
 - Operar el sistema dentro de sus capacidades máximas.
 - En consecuencia, limitar transacciones comerciales.
- **Acciones Correctivas:**
 - Tomadas sólo en caso de que una perturbación ocurra.
 - Persiguen limitar las consecuencias de la perturbación.
 - Para ello debe usar recursos que pertenecen a agentes del mercado.
 - En consecuencia, dichos recursos (servicios) deben ser comprados a agentes del mercado por el operador.
- **Servicios Complementarios o Auxiliares:**
 - Cuando sean usados, algunos involucrarán generación de energía.
 - No obstante, lo relevante es la capacidad para entregarlo.
 - Remuneración se debe construir sobre la base de disponibilidad, no de producción.



6.1 Problemática asociada SSCC

- **Establecimiento de las necesidades de SSCC para:**
 - Mantener generación y demanda balanceados .
 - Mantener la seguridad del sistema de transmisión.
- **Obtención de SSCC:**
 - Cuánto se necesita de cada uno de ellos?
 - Cómo se deberían obtener y remunerar?
 - Quién debería pagarlos?
- **Venta de SSCC:**
 - Maximización de la utilidad por venta de energía y servicios complementarios.
 - Provisión de SSCC por parte de los consumos.



6.2 Definición de SSCC (Balance de Generación/Consumo)

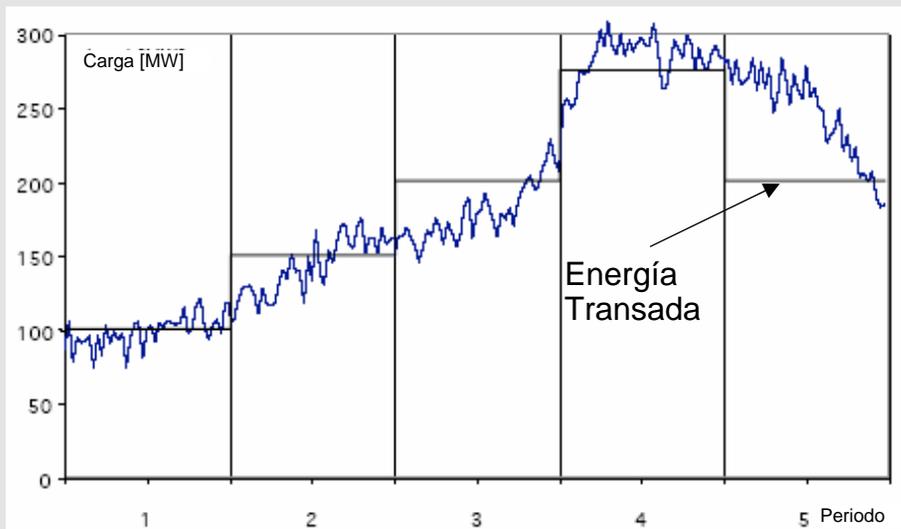
- **Generación y consumo deben estar en balance en todo momento**
 - $G_s > D \rightarrow f \uparrow$
 - $G_s < D \rightarrow f \downarrow$
- En la realidad:
 - Existe variación permanente de la carga.
 - El control de generación es impreciso.
 - Se producen salidas imprevistas de generadores, líneas y cargas.
- Sistema debe operar dentro de un margen estrecho de frecuencia:
 - Generadores son desconectados si se superan límites.
 - Desconexión profundiza los desbalances.
- Tasa de variación de la frecuencia es inversamente proporcional a la inercia mecánica del sistema (generación/consumo):

$$\Delta P_M - \Delta D = \frac{2H}{f_0} \frac{\partial}{\partial t} (\Delta f) + \frac{\partial D}{\partial f} \Delta f, \quad H : \text{Cte de Inercia de la máquina}$$

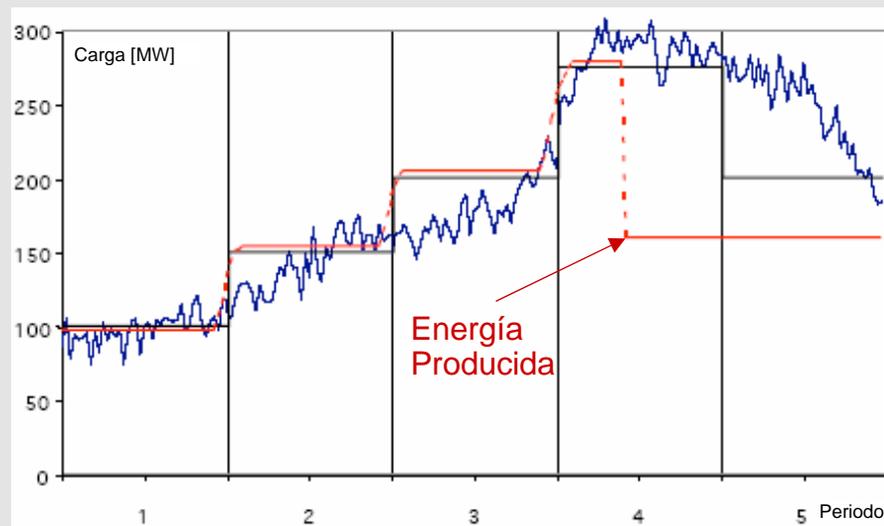


6.2 Balance en el tiempo de Generación/Consumo

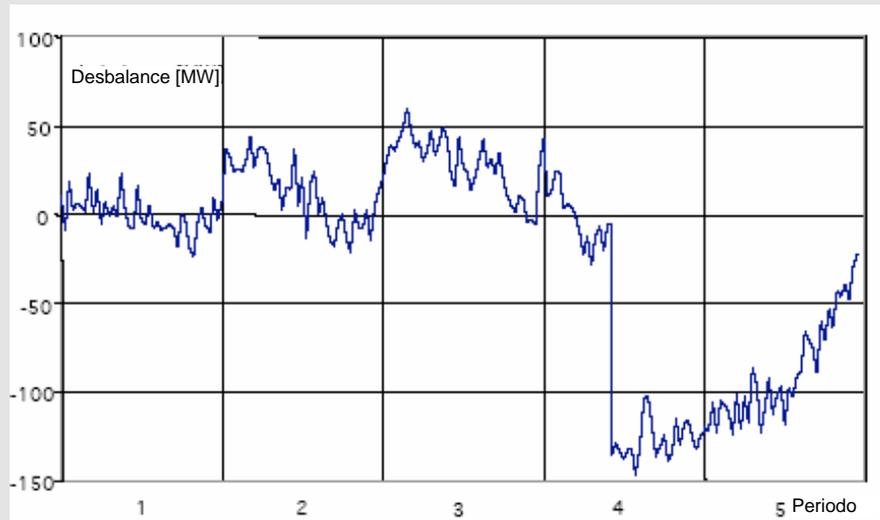
Carga en el tiempo



Producción de Energía



Desbalance



Desbalance y Tendencia



D. Kirschen



6.2 Diferencias entre Generación/Carga

- **Causada por desigualdad entre las transacciones (programa) y la carga:**
 - Fluctuaciones de la carga dentro del periodo.
 - Errores en los pronósticos.
- **Causada por desigualdad entre las transacciones (programa) y la generación:**
 - Errores de control.
 - Tasas de toma/reducción de carga finitas.
 - Salida imprevistas de unidades de generación.
- **Servicios para balance:**
 - Diversidad de fenómenos contribuyen al desequilibrio de generación/carga de la programación.
 - Fenómenos poseen diversas escalas de tiempo.
 - Se requiere de diferentes servicios para manejar el problema.
 - Relevancia de cada fenómeno depende del sistema eléctrico. Características del parque generador, sistema de transmisión, comportamiento de la carga.
 - Definición exacta de cada servicio varía de un mercado a otro.



6.2 Servicios para el Balance de Generación/Carga

- Pueden proveerlo sólo unidades que están en servicio.
- Se dividen en servicios de:
 - Regulación (divididas en escalas de tiempo).
 - Seguimiento de Carga.
 - Reserva (divididas en escalas de tiempo).
- **Servicios de regulación y seguimiento de la carga:**
 - Acción prácticamente continua.
 - Actúan frente a cambios relativamente pequeños.
 - Medianamente predecibles.
 - Se enmarca ámbito de *acciones preventivas* de seguridad.
- **Servicios de Reserva**
 - Uso es impredecible.
 - Uso está en el ámbito de *acciones correctivas* de seguridad.
 - Planificación y provisión está en el ámbito de *acciones preventivas* de seguridad.



6.2 Servicios de regulación y seguimiento de Carga

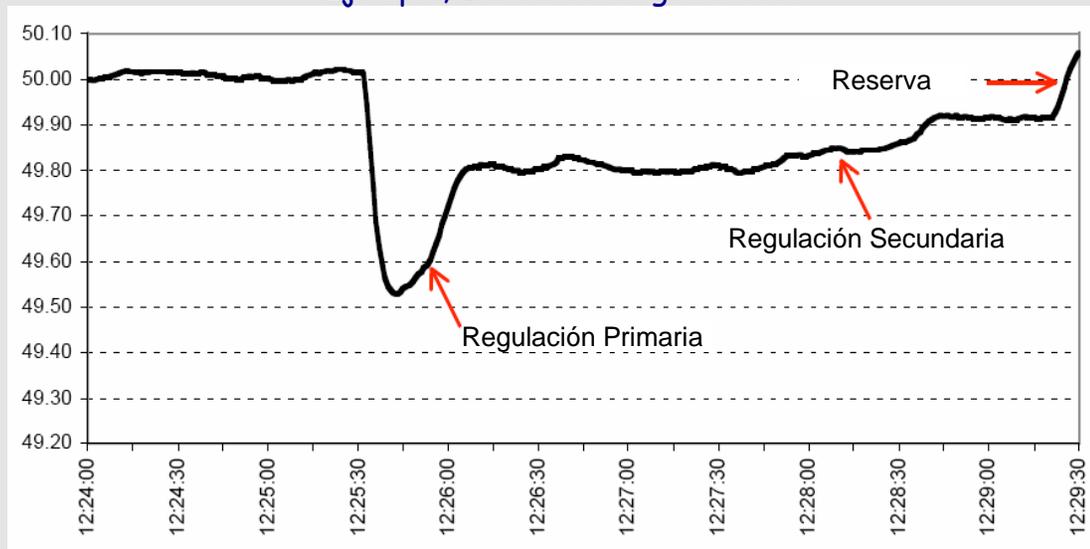
- **Diseñados para mantener:**
 - Frecuencia de operación en el rango nominal.
 - Transferencias entre sistemas en los valores programados (error de transferencia entre área de control).
- **Servicios de Regulación**
 - Orientados a:
 - Fluctuaciones rápidas de la carga.
 - Pequeñas variaciones de generación.
 - Pueden proveerlo unidades de generación que:
 - Puedan ajustar rápidamente su producción.
 - Cuentan con control de generación. Idealmente AGC.
- **Servicios de Seguimiento de la Carga**
 - Diseñados para manejar variaciones lentas al interior del periodo
 - Pueden proveerlo generadores no limitados por tasas de toma-reducción de carga.



6.2 Servicios de Reserva

- Diseñados para enfrentar imprevistos que causan gran déficit como la salida de generadores o interconexiones.
- Existen dos tipos principales:
 - **Reserva en giro**
 - De disponibilidad inmediata.
 - **Reserva suplementaria:**
 - Algún retardo en disponibilidad.
 - Diseñado para reponer la reserva en giro usada.

Ejemplo, Salida de un generador



D. Kirschen



6.2 Consideración sobre la red Análisis de Contingencias

- Análisis de contingencias realizadas por el operador.
- Sistema debe soportar listado de contingencias consideradas probables.
- Tipos de desestabilización: Sobrecarga térmica, inestabilidad transitoria, inestabilidad por voltaje.
- Si se estima que una contingencia puede desestabilizar el sistema, el operador deberá tomar las acciones preventivas necesarias.
- Acciones preventivas de bajo costo:
 - Ajustar parámetros de equipos. Ej. "tap" en transformadores, voltaje de referencia de generadores.
- Acciones preventivas de mayor costo:
 - Restringir flujos por ramas del sistema.
 - Limitar la generación de algunas plantas.
 - Restringir transacciones en el mercado.



6.2 Control de voltaje y provisión de reactivos

- Usar potencia reactiva para maximizar la transferencia de la activa.
- Recursos bajo el control del operador: reactores y condensadores, tap de transformadores, SVC.
- No obstante, la mejor fuente de reactivos son los generadores.
- Se requiere definir servicios de control de voltaje y establecer bajo qué condiciones el operador puede usar estos recursos.
- Para ello se establecen condiciones de operación:
 - Condición normal: $0.95 \leq V \leq 1.05$ p.u. -> control normal.
 - Condición anormal: salida imprevista de generador o línea
-> provisión suficiente de potencia reactiva para prevenir un colapso de voltaje.
- Requerimientos bajo una operación anormal son mayores que bajo una normal.
- Baja transportabilidad de la potencia reactiva
-> poder de mercado inherente a la provisión de reactivos.



6.2 Otros servicios complementarios

- Servicios asociados a estabilidad:
 - Esquemas de desconexión post falla. *Generación/Consumo*
 - Estabilizadores de sistemas de potencia.
- Servicios asociados a la restauración del sistema:
 - Partida en negro.
 - Esquemas de restauración del servicio.
- Servicios asociados a funcionamiento del mercado:
 - Medición y Facturación.
 - Compensación de Pérdidas Ohmicas (Tx).



6.3 Obtención de servicios

- Cuánto servicio de cada tipo es necesario?
 - Operador compra servicio en representación de los usuarios.
 - Costo principalmente asociado a disponibilidad más que a uso.
 - Se debe establecer una relación costo/beneficio.
 - Valoración del servicio es complejo: optimización estocástica.
 - Operador debería tener algún incentivo para hacer correcto dimensionamiento de requerimientos y adquisición a mínimo costo.
- Para obtener los servicios existen dos caminos, cada uno con ventajas y desventajas:
 - Provisión obligatoria.
 - Mercado de SSCC.
- Elección del camino dependerá del tipo de servicio y características del sistema eléctrico.



6.3 Provisión obligatoria de servicios

- Para permitir su entrada al sistema, generadores deben cumplir ciertos requisitos.
- Ejemplos. Generador debe:
 - Poseer control de generación con ajuste de velocidad de 4% ("droop"). -> Todos los generadores contribuyen a la regulación de frecuencia.
 - Debe poder operar en rango de generación reactiva desde 0.85 adelanto y 0.9 atraso. -> todos los generadores contribuyen a la regulación de voltaje.
- Ventajas: Simple, Usualmente asegura cumplimiento de requerimientos de seguridad y calidad de suministro.
- Desventajas:
 - No necesariamente económicamente eficiente.
 - Desincentiva desarrollo tecnológico.
 - Generadores debe proveer servicios a criterio del operador que pueden involucrar costos.
 - Equidad: Cómo tratar a los generadores que no cumplen requisitos (Ej. Nuclear).
 - No aplicable a todos los servicios



6.3 Mercados para SSCC

- Idea: diferentes mercados para diferentes servicios.
- Contratos de Largo plazo:
 - Apropiado para servicios que no varían en el tiempo y está asociado a la disponibilidad de equipos con características específicas.
 - Ejemplo: partida en negro, estabilizadores de sistemas de potencia.
- Mercado Spot:
 - Necesidades cambian en el día.
 - Precios cambian por interacción con el mercado de energía.
 - Ejemplo: reserva.
- Ventajas:
 - Económicamente más eficiente que el esquema obligatorio.
 - Operador sólo adquiere lo necesario.
 - Servicios los proveen sólo los agentes que lo consideran rentable.
 - Ayuda a determinar el valor real del servicio.
 - Crea espacio para innovar.

5. Mercados de Energía Eléctrica



6.3 Mercados para SSCC II

- Desventajas de los mercados de SSCC:
 - Más complejo.
 - Pueden no ser aplicable a todos los servicios.
 - Crea espacio para el poder de mercado.
 - Ejemplo de poder de mercado:
 - Provisión de reactivos en un sector remoto de la red de transmisión.



6.3 Provisión de SSCC por parte de la demanda

- Poco tradicional pese a que contribuye a la eficiencia económica.
- Mayor competitividad reduce costos y mejor utilización de recursos.
- Provisión de SSCC por parte de la demanda podría ser más confiable. Mayor número de pequeños suministradores.
- Ejemplos:
 - Proveer reserva con la desconexión de consumos en vez de despachar generadores térmicos a media carga.
 - Regulación de frecuencia por parte de equipos de bombeo de velocidad variable.
 - Provisión de reactivos por parte de grandes motores sincrónicos.
 - Particularmente importante si la proporción de energías renovables se incrementa.



6.3 Asignación de costos por SSCC

- No todos los usuarios valoran por igual la seguridad y calidad del suministro.
- Idealmente, quien la valore más debería obtener más seguridad y pagar más por ello.
- Con la tecnología actual, esto no es posible.
 - Operador provee de un nivel de seguridad y calidad promedio a todos los usuarios.
 - Costo de los SSCC es pagado por todos los usuarios sobre la base de sus consumos de energía.
- Tarifificar los SSCC por consumo de energía no es eficiente económicamente:
 - Algunos usuarios causan mayor necesidad de SSCC que otros. Por ello deberían pagar más.
 - Ejemplo: requerimientos de reserva.
- Grandes requerimientos de reserva son causados por:
 - Generadores con fallas frecuentes.
 - Grandes cargas con consumo errático.



6.3 Venta de SSCC

- SSCC son otra oportunidad de negocio para los generadores.
- Restricciones:
 - Técnicas: capacidades de las plantas. Entre ellos: tasas de variación de carga, límites del plano PQ, equipos de control.
 - Económicas: proveer SSCC puede limitar venta de energía. -> Optimización conjunta.
- **Ejemplo:** venta de un generador al mercado de energía y reserva.
 - Generador es tomador de precios.
 - Existe sólo un servicio de reserva.
 - Sólo se paga por disponibilidad, no el uso.
 - Cálculos para una unidad de generación en una hora.
 - No se consideran costos de partida.



6.3 Ejemplo: venta al mercado de energía y SSCC

Notación

π_E : precio de mercado para la energía [\$/MWh]

π_R : precio de mercado para la reserva [\$/MW/h]

x_E : cantidad de energía ofertada/vendida

x_R : cantidad de reserva ofertada/vendida

P^{\min} : generación mínima

P^{\max} : generación máxima

R^{\max} : límite superior para la reserva (tasa x duración periodo)

$C(x_E)$: costo de producción de la energía [\$/MWh]

$C(x_R)$: costo de proveer la energía (costo esperado en caso que la reserva sea usada)

Función Objetivo

$$f(x_E, x_R) = \pi_E \cdot x_E + \pi_R \cdot x_R - C_E(x_E) - C_R(x_R)$$



6.3 Ejemplo: venta al mercado de energía y SSCC II

Restricciones

$$x_E + x_R \leq P^{\max}, \quad x_E \geq P^{\min}, \quad x_R \leq R^{\max} \approx r_U \cdot \Delta t$$

Lagrangiano

$$\mathcal{L}(x_E, x_R, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = f(x_E, x_R) + \lambda_1 \cdot (P^{\max} - x_E + x_R) + \lambda_2 \cdot (x_E - P^{\min}) + \lambda_3 \cdot (R^{\max} - x_R)$$

Condición de primer orden

$$\nabla_{x,\lambda} (\mathcal{L}(x_E, x_R, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)) = 0$$

Condición de holgura complementaria

$$\lambda_1 \cdot (P^{\max} - x_E + x_R) = 0$$

$$\lambda_2 \cdot (P^{\min} - x_E) = 0$$

$$\lambda_3 \cdot (R^{\max} - x_R) = 0, \quad \lambda_{1,2,3} \geq 0$$



6.3 Ejemplo: venta al mercado de energía y SSCC III

Caso 1: No hay restricciones activas

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_E} = \pi_E - \frac{\partial C_E(x_E)}{\partial x_E} - \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \pi_E = \frac{\partial C_E(x_E)}{\partial x_E}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_R} = \pi_R - \frac{\partial C_R(x_R)}{\partial x_R} - \lambda_1 - \lambda_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad \pi_R = \frac{\partial C_R(x_R)}{\partial x_R}$$

- Se debería vender energía y reserva hasta que los costos marginales igualen a los precios respectivos.
- No hay interacción entre energía y reserva.

Caso 2,3: Limite superior e inferior activos

$$\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 \geq 0$$

- No es interesante. Generación al mínimo y reserva al máximo.



6.3 Ejemplo: venta al mercado de energía y SSCC IV

Caso 4: $\lambda_1 > 0, \lambda_2 = \lambda_3 = 0 \rightarrow x_E + x_R = P^{\max}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_E} = \pi_E - \frac{\partial C_E(x_E)}{\partial x_E} - \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_R} = \pi_R - \frac{\partial C_R(x_R)}{\partial x_R} - \lambda_1 - \lambda_3 = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \pi_E - \frac{\partial C_E(x_E)}{\partial x_E} = \pi_R - \frac{\partial C_R(x_R)}{\partial x_R} = \lambda_1$$

- Capacidad completamente utilizada entre generación y reserva.
- Beneficio marginal de generación y reserva deben ser iguales.

Caso 5: $\lambda_1 = 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 = 0 \rightarrow x_E = P^{\min}$

$$\Rightarrow \frac{\partial C_E(x_E)}{\partial x_E} - \pi_E = \lambda_2, \quad \frac{\partial C_R(x_R)}{\partial x_R} = \pi_R$$

- Vender hasta anular el beneficio marginal en el mercado de reserva.
- Minimizar la pérdida en el mercado de energía generando al mínimo.



6.3 Ejemplo: venta al mercado de energía y SSCC V

Caso 7: $\lambda_1 > 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 > 0$

$$\rightarrow \left. \begin{array}{l} x_E + x_R = P^{\max} \\ x_R = R^{\max} \end{array} \right\} \rightarrow x_E = P^{\max} - R^{\max}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_E} = \pi_E - \frac{\partial C_E(x_E)}{\partial x_E} - \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \Rightarrow \pi_E - \frac{\partial C_E(x_E)}{\partial x_E} = \lambda_1$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_R} = \pi_R - \frac{\partial C_R(x_R)}{\partial x_R} - \lambda_1 - \lambda_3 = 0 \Rightarrow \pi_R - \frac{\partial C_R(x_R)}{\partial x_R} = \lambda_1 + \lambda_3$$

- Venta de energía y reserva son ambos rentables.
- La venta de reserva es más rentable que la de energía pero queda limitada por la tasa de toma de carga.