



Modelos de Sistemas de Energía Eléctrica

Índices, medidas y criterios de fiabilidad

Mariano Ventosa

Andrés Ramos

Objetivos del tema

- Entender
 - por qué hay que estudiar la fiabilidad
 - en qué estudios aparece la fiabilidad
 - cómo se mide o valora la fiabilidad



Referencias sobre fiabilidad

- [Billinton & Allan, 88] *Reliability Assessment of Large Electric Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 1988.
 - Es el manual de referencia sobre fiabilidad en los sistemas eléctricos
 - Tiene un alcance y profundidad que exceden esta presentación
- [IAEA, 84] “Chapter 7. Generating System Reliability”, *Expansion planning for electrical generating systems*, International Atomic Energy Agency Technical report No 241. Vienna, Austria, 1984.
 - Material empleado en la presentación

Organización de la exposición

- Introducción
- Medida de la fiabilidad
- Clasificación de los índices de fiabilidad
 - Índices de fiabilidad deterministas
 - Índices de fiabilidad probabilistas
- Valoración de la generación en términos de fiabilidad

¿Qué es la fiabilidad?

- El objetivo **tradicional** de la planificación de los sistemas de energía eléctrica es satisfacer la demanda de electricidad con el mínimo coste posible y con una **fiabilidad aceptable a largo plazo**
 - **Continuidad** de suministro o existencia de tensión de alimentación
 - Calidad de la onda (valor, forma, frecuencia...)
- No se debe confundir fiabilidad (largo plazo) con seguridad en la operación (corto plazo)

¿Por qué nadie habla de fiabilidad?

- Actualmente, en los SEE no se habla mucho de fiabilidad. Se habla de
 - pagos por capacidad
 - el término de garantía de potencia
 - los mercados de capacidad o de la crisis californiana.
- Sin embargo todos esos temas están íntimamente ligados a la fiabilidad

¿Cómo se estudia la fiabilidad?

- Modo histórico
 - Estadísticas de **fallos** y **cortes** de suministro del pasado
 - Estudios **fáciles** de realizar
- Modo predictivo
 - Cálculo de los **valores esperados** de los fallos mediante un modelo de fiabilidad
 - Estudios **complejos**
 - Los datos se extraen de los estudios históricos

Organización de la exposición

- Introducción
- ➔ • **Medida de la fiabilidad**
- Clasificación de los índices de fiabilidad
 - Índices de fiabilidad deterministas
 - Índices de fiabilidad probabilistas
- Valoración de la generación en términos de fiabilidad

Medida de la fiabilidad

- **Índice** de Fiabilidad
 - Parámetro que mide o cuantifica algún **aspecto concreto de la fiabilidad** del funcionamiento de un sistema de energía eléctrica
 - Nos centraremos en la **generación**
- Los aspectos más relevantes que deben cuantificar los índices de fiabilidad son:
 - **Número** o frecuencia de los fallos
 - **Duración** de los fallos
 - **Incidencia** de los fallos
- **No existe** un **índice** capaz de medir la **fiabilidad total** incluyendo todos sus aspectos

Criterio de Fiabilidad

- La fiabilidad es un aspecto clave en estudios de planificación de la **expansión** a largo plazo
 - A **mayor potencia instalada mayor fiabilidad**
- **Criterio** de fiabilidad
 - **Estándar de fiabilidad** o valor máximo admitido para un índice de fiabilidad al planificar la expansión de un sistema de generación eléctrica
 - **Restricciones** del problema de optimización
- **Coste** asociado a un índice de fiabilidad durante el proceso de diseño de un sistema de generación eléctrica
 - Incluido en la **función objetivo** como el coste asociado a la falta de suministro de electricidad
- En planificación **multiatributo** los índices de fiabilidad son algunas de las posibles funciones objetivo

Criterio de Fiabilidad en la Expansión

Minimizar:

\sum Costes de Operación + Costes de Instalación

Sujeto a:

- Satisfacer la demanda
- **Criterio de Fiabilidad** < Índice máximo de fiabilidad

Minimizar:

\sum Costes de Operación + Costes de Instalación
+ Costes Asociados a la **Energía no Suministrada**

Sujeto a:

- Satisfacer la demanda

Minimizar:

F_{on} . Objetivo 1: \sum Costes de Operación + Costes de Instalación

F_{on} . Objetivo 2: **Índice de fiabilidad**

Sujeto a:

- Satisfacer la demanda

Organización de la exposición

- Introducción
- Medida de la fiabilidad
- ➔ • **Clasificación de los índices de fiabilidad**
 - Índices de fiabilidad deterministas
 - Índices de fiabilidad probabilistas
- Valoración de la generación en términos de fiabilidad

Clasificación de los Índices de Fiabilidad (I)

- Índices de Fiabilidad **Deterministas**
 - Reflejan el **comportamiento medio** de la continuidad del suministro de un sistema
 - **No** consideran la **aleatoriedad** de la operación de los sistemas eléctricos
 - Muy **utilizados**:
 - Intuitivos
 - Simples de cálculo
 - Requieren pocos datos para su cálculo
 - Fácil comparación entre sistemas

Clasificación de los Índices de Fiabilidad (II)

- Índices de Fiabilidad **Probabilistas**
 - **Consideran** la **aleatoriedad** inherente de la operación de los sistemas eléctricos
 - Fallo de los grupos
 - Variaciones de demanda
 - Aportaciones hidráulicas
 - Tienden a ser más usados por ofrecer **más información** y de **mayor calidad** que los índices deterministas

Organización de la exposición

- Introducción
- Medida de la fiabilidad
- Clasificación de los índices de fiabilidad
 - ➔ – Índices de fiabilidad deterministas
 - Índices de fiabilidad probabilistas
- Valoración de la generación en términos de fiabilidad

Índices de Fiabilidad Deterministas (I)

- **Margen de reserva** (*Reserve Margin RM*):
 - **Exceso** de capacidad de **generación** disponible para satisfacer la demanda máxima anual

$$RM (MW) = \text{Generación disponible} - \text{Potencia máxima demandada}$$

$$RM (pu) = \frac{\text{Generación disponible} - \text{Potencia máxima demandada}}{\text{Potencia máxima demandada}}$$

- Su principal característica es su simplicidad:
 - Intuitivo, indiscutible y fácil de calcular
 - Limitado al **no considerar reservas de agua**, tamaños, tecnologías, o tasas de fallo

Índices de Fiabilidad Deterministas (II)

- Pérdida del Mayor Generador (*Largest Unit LU*):
 - Considera la posible indisponibilidad del mayor generador
 - Supera al RM al **considerar** los **tamaños** de las **centrales**

$$LU (pu) = \frac{RM (MW)}{\text{Potencia del mayor generador}}$$

LU>1 → podemos perder la unidad de mayor tamaño

LU<1 → si perdemos la unidad de mayor tamaño → energía no suministrada

- Año Seco:
 - Usado en **sistemas** muy **hidráulicos**
 - Es un criterio más que un índice
 - Fuerza a que en el año más seco (o serie de años más secos) se satisfaga la demanda (de forma determinista)

Ejemplos Índices Deterministas (I)

- Parque generador y demanda a cubrir
 - Potencia térmica instalada: 10.000 MW
 - Potencia hidráulica instalada: 3.000 MW
 - Demanda máxima prevista: 11.500 MW
 - Potencia del grupo más grande: 1.000 MW
 - Potencia **hidráulica** máxima en año seco: 1.300 MW
- Índices deterministas

$$RM(GW)=(10+3-11.5)=1.5 \text{ GW} \rightarrow \text{sobra } 1.5 \text{ GW}$$

$$RM(pu)=(10+3-11.5)/11.5=0.13 \rightarrow \text{sobra el } 13 \% \text{ de la demanda máx.}$$

$$LU(pu)=(10+3-11.5)/1=1.5 \rightarrow \text{sobra un grupo y medio}$$

Ejemplos Índices Deterministas (II)

- Índices deterministas en **año seco**

$$RM(pu) = (10 + 1.3 - 11.5) / 11.5 = -0.017 \rightarrow \text{falta el } -1.7 \%$$

$$LU(pu) = (10 + 1.3 - 11.5) / 1 = -0.2 \rightarrow \text{falta un } 20 \% \text{ del mayor grupo}$$

→ En un **sistema hidrotérmico** las cosas cambian en **año seco**

- Potencia a instalar para un **criterio de fiabilidad** de $RM > 2 \text{ GW}$

$$RM(MW) = (10 + 3 + P_{NUEVA} - 11.5) = 2 \text{ GW} \rightarrow P_{NUEVA} = 0.5 \text{ GW}$$

- Potencia a instalar para un **criterio de fiabilidad** de $RM > 2 \text{ GW}$ y **año seco**

$$RM(MW) = (10 + 1.3 + P_{NUEVA} - 11.5) = 2 \text{ GW} \rightarrow P_{NUEVA} = 2.2 \text{ GW}$$

Organización de la exposición

- Introducción
- Medida de la fiabilidad
- Clasificación de los índices de fiabilidad
 - Índices de fiabilidad deterministas
 -  – Índices de fiabilidad probabilistas
- Valoración de la generación en términos de fiabilidad

Índices de Fiabilidad Probabilistas: LOLP y LOLE (I)

- **Probabilidad de pérdida de carga** (*Loss Of Load Probability* **LOLP**):
 - Según su nombre, debería definirse como la **probabilidad** de no satisfacer toda la **potencia** demandada de electricidad con la generación disponible
 - Sin embargo, normalmente se mide como el **número de horas** o **días** al año con generación insuficiente: **1 día en 10 años**
- Para intentar resolver esta doble y ambigua definición, Billinton define la **pérdida de carga esperada** (*Loss Of Load Expectation* **LOLE**):
 - Número de días (horas) al año en el que esperamos no satisfacer la demanda con la generación disponible

$$LOLP = \frac{LOLE}{365 \text{ días o } 8760 \text{ horas}}$$

Índices de Fiabilidad Probabilistas: LOLP y LOLE (II)

- **Son los índices más utilizados** para valorar la fiabilidad en la generación eléctrica
- **Carecen de información** respecto a:
 - **Duración y frecuencia** de los fallos
 - **Incidencia** de las pérdidas de carga
- LOLP o LOLE se pueden calcular considerando:
 - No cubrir los 365 picos diarios de la demanda de un año
 - No cubrir las 8760 demandas horarias
- Los valores obtenidos de LOLP en el mismo sistema son mayores para el primer caso
 - Ejemplo: falta de generación en la hora de máxima demanda

$$LOLP_N = \frac{LOLE}{N}; LOLP_{365} = \frac{1}{365} > LOLP_{8760} = \frac{1}{8760}$$

Índices de Fiabilidad Probabilistas: LOLP y LOLE (ejemplo)

- Parque generador y demanda a cubrir
 - Generador 1:
 - Potencia: 1 000 MW
 - Tasa de fallos (*Equivalent Forced Outage Rate EFOR*): 0.05 (5%)
 - Generador 2:
 - Potencia: 900 MW
 - Tasa de fallos (*Equivalent Forced Outage Rate EFOR*): 0.04 (4%)
 - Demanda máxima prevista:
 - **Caso A: 1100 MW y Caso B: 800 MW**

- LOLP caso A: Habrá pérdida de carga con **cualquier** generador fallado

$$LOLP_A = 0.05 + 0.04 - 0.04 \cdot 0.05 = 0.088 \text{ (8.8\%)}$$

- LOLP caso B: Habrá pérdida de carga **sólo cuando ambos** generadores estén fallados

$$LOLP_B = 0.05 * 0.04 = 0.002 \text{ (0.2\%)}$$

- LOLP $\neq 0$ aunque RM sea positivo ya que siempre existe probabilidad, por pequeña que sea, de que fallen todos los grupos

Índices de Fiabilidad Probabilistas: LOEE y LOEP (I)

- Pérdida de energía esperada (*Loss Of Energy Expectation LOEE*) más conocida como **Energía Esperada No Suministrada EENS** (*Expected Unserved Energy EUE*):
 - Se define como la **energía** que se espera no suministrar en un año por **indisponibilidad** de la generación o por la **falta de energía** primaria
- **Probabilidad de pérdida de energía** (*Loss Of Energy Probability LOEP*):
 - Se define como la **probabilidad** de no satisfacer **un kW·h** con la generación disponible
 - Al medirse en tanto por uno, permite comparar sistemas de distinto tamaño

$$LOEP = \frac{ENS}{Energía\ total\ demandada}$$

Índices de Fiabilidad Probabilistas: LOEE y LOEP (II)

- Índices muy **utilizados**, sobre todo en sistemas con **límites de energía primaria** como los **hidrotérmicos**
- Superan a LOLP y LOLE al considerar la **incidencia** de las **pérdidas de carga** como **energía no suministrada**
 - La LOLP mide la probabilidad de no suministrar toda la potencia
 - Sin embargo, la LOLP no indica cuanta energía no va a poder suministrarse

Índices de Fiabilidad Probabilistas: POMP y XLOL

- Pérdida de Carga Esperada medida en MW (*eXpected Loss Of Load XLOL*):
 - Potencia que esperamos no poder suministrar una vez que el fallo o la falta de suministro se ha producido
 - También se la denomina esperanza condicionada de pérdida de carga (*eXpected Load Not Supplied XLNS*)

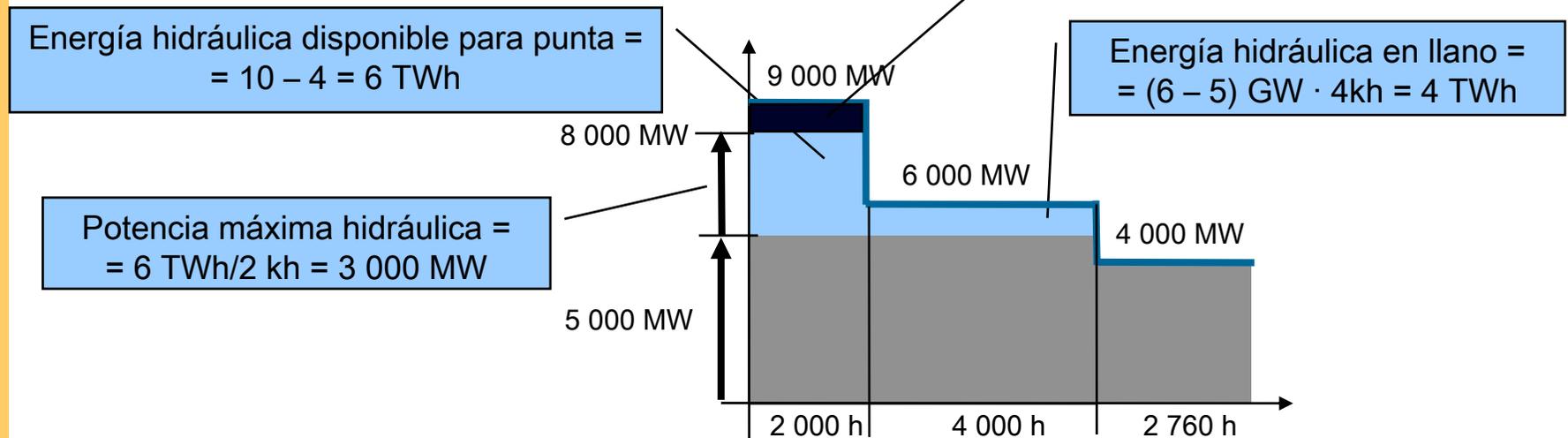
$$XLOL = \frac{ENS (MW \cdot h)}{LOLE (horas)} = \frac{ENS (MW \cdot h)}{LOLP \times 8760 \text{ horas}}$$

- Probabilidad de Margen Positivo (*Probability Of Positive Margin POPM*):
 - Se define como la probabilidad de satisfacer la potencia demanda durante **la hora de máxima demanda anual** con la generación disponible
 - Es una probabilidad de éxito

$$LOLP_N \leq 1 - POPM = LOLP_1$$

Índices de Fiabilidad Probabilistas: LOEE, LOEP y XLOL (ejemplo I)

- Parque generador y demanda a cubrir
 - Punta: 2000 horas de 9 000 MW (18 TWh)
 - Llano: 4000 horas de 6 000 MW (24 TWh)
 - Valle: 2760 horas de 4 000 MW (11.04 TWh)
 - Potencia térmica: 5 000 MW (EFOR=0)
 - Potencia hidráulica: 5 000 MW (EFOR=0)
 - Energía hidráulica: 10 000 GWh



Índices de Fiabilidad Probabilistas: LOEE, LOEP y XLOL (ejemplo II)

- Índices de fiabilidad

$$RM(MW) = (5 + 5 - 9) = 1 \text{ GW} \quad \rightarrow \text{sobra 1 GW}$$

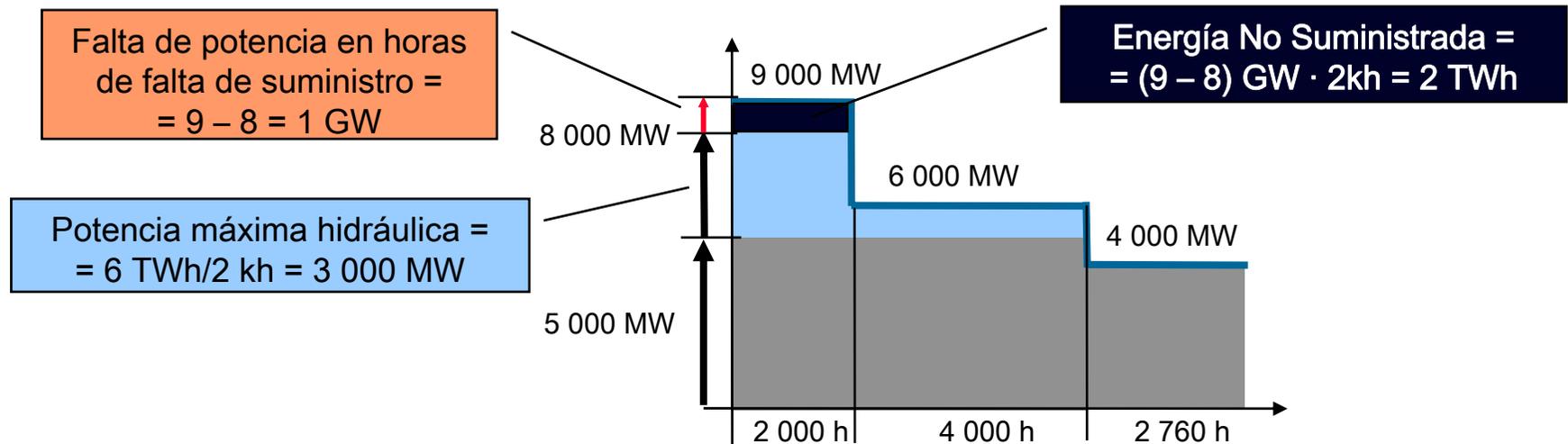
$$LOLE(\text{horas}) = 2 \text{ 000 horas} \quad \rightarrow \text{durante 2000 horas falta generación}$$

$$LOLP(\text{pu}) = 2000/8760 = 0.22 \quad \rightarrow \text{hay racionamientos el 22 \% de las horas}$$

$$ENS(\text{GWh}) = 2 \text{ 000 GWh} \quad \rightarrow \text{por falta de energía primaria}$$

$$LOEP(\text{pu}) = 2 \text{ TWh} / (2 \cdot 9 + 4 \cdot 6 + 2.76 \cdot 4) \text{ TWh} = 0.0377 \quad \rightarrow \text{ENS es el 3.77 \%}$$

$$XLOL(\text{GW}) = 2 \text{ TWh} / 2 \text{ kh} = 1 \text{ GW} \quad \rightarrow \text{falta 1 GW cuando hay racionamientos}$$



Otros Índices de Fiabilidad Probabilistas: EOPE y F&D

- Procedimientos de Emergencia Esperados (*Emergency Operating Procedure Expectation* **EOPE**):
 - Es el número de días por año en que se activarán los **procedimientos de emergencia** (ver pag. 258) para evitar no poder satisfacer la demanda
 - Deslastre de cargas
 - Reducción de tensión...
- **Frecuencia** y **Duración** de los Fallos (*Frequency and Duration* **F&D**):
 - Se definen como el número de fallos esperados en un año y la duración esperada de los mismos

$$LOLP = Frecuencia * Duración$$

- EOPE y F&D son más **realistas** y contienen **mayor información** que LOLP o LOLE aunque son **poco utilizados** en planificación:
 - por su mayor complejidad de cálculo (modelos horarios)
 - y su poca influencia en las decisiones de planificación respecto a otros índices

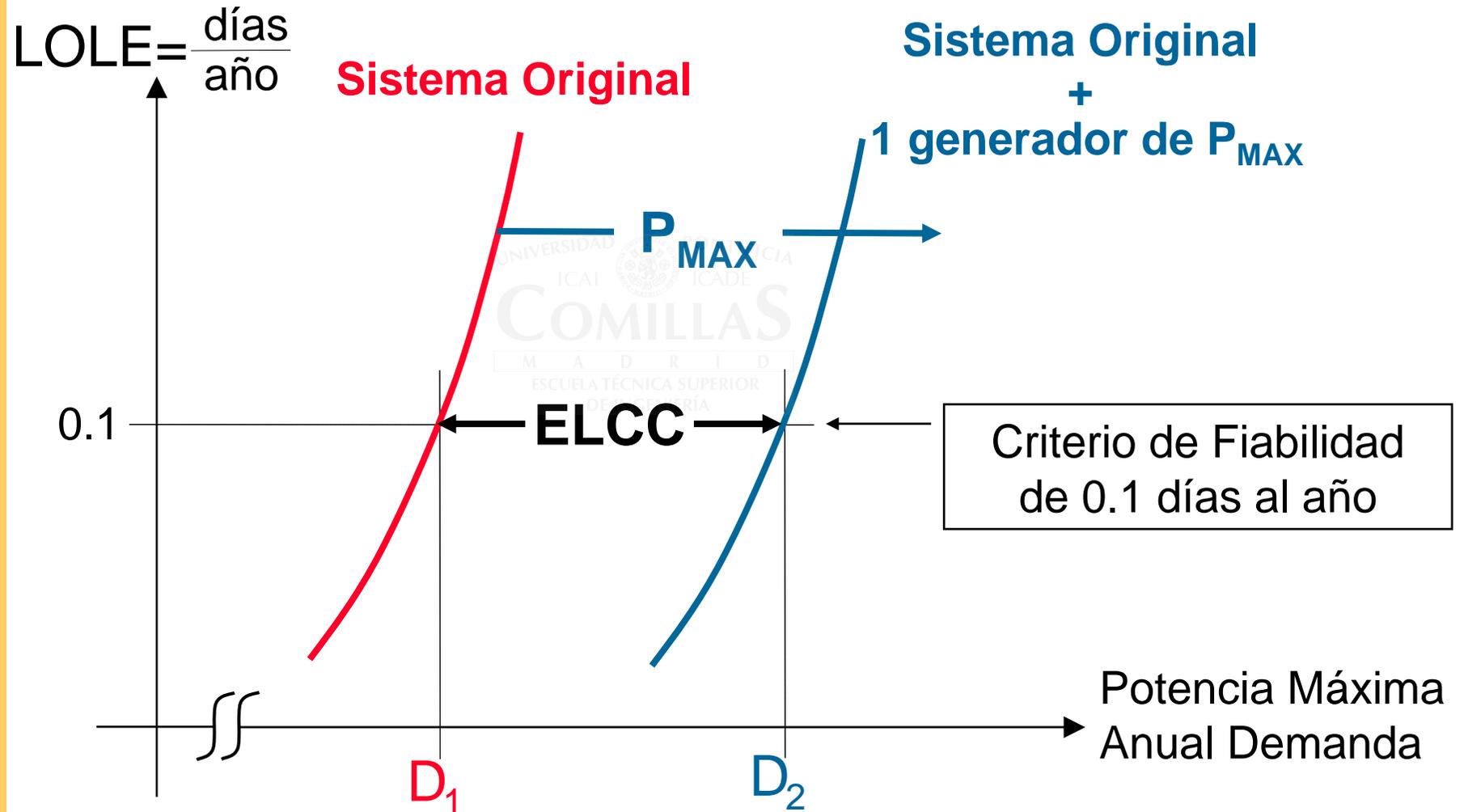
Organización de la exposición

- Introducción
- Medida de la fiabilidad
- Clasificación de los índices de fiabilidad
 - Índices de fiabilidad deterministas
 - Índices de fiabilidad probabilistas
- ➔ • Valoración de la generación en términos de fiabilidad

Valoración de la Generación en Términos de Fiabilidad: ELCC y FCE (I)

- **Capacidad efectiva de cubrir la carga** (*Effective Load-Carrying Capability* **ELCC**)
 - Mide el **valor** de un determinado **generador** en términos de **fiabilidad**
 - **Contribución** de **cada generador** a la **fiabilidad** del sistema
 - Se define como el **incremento de demanda máxima** que un sistema puede cubrir al **añadir** un determinado **generador** manteniendo **constante** un determinado **índice** de **fiabilidad**
 - Depende de las características del generador
 - Potencia máxima
 - Tasa de fallos (EFOR), mantenimiento programado
 - Límites de energía primaria...
 - Se considera **todo un año** en el estudio

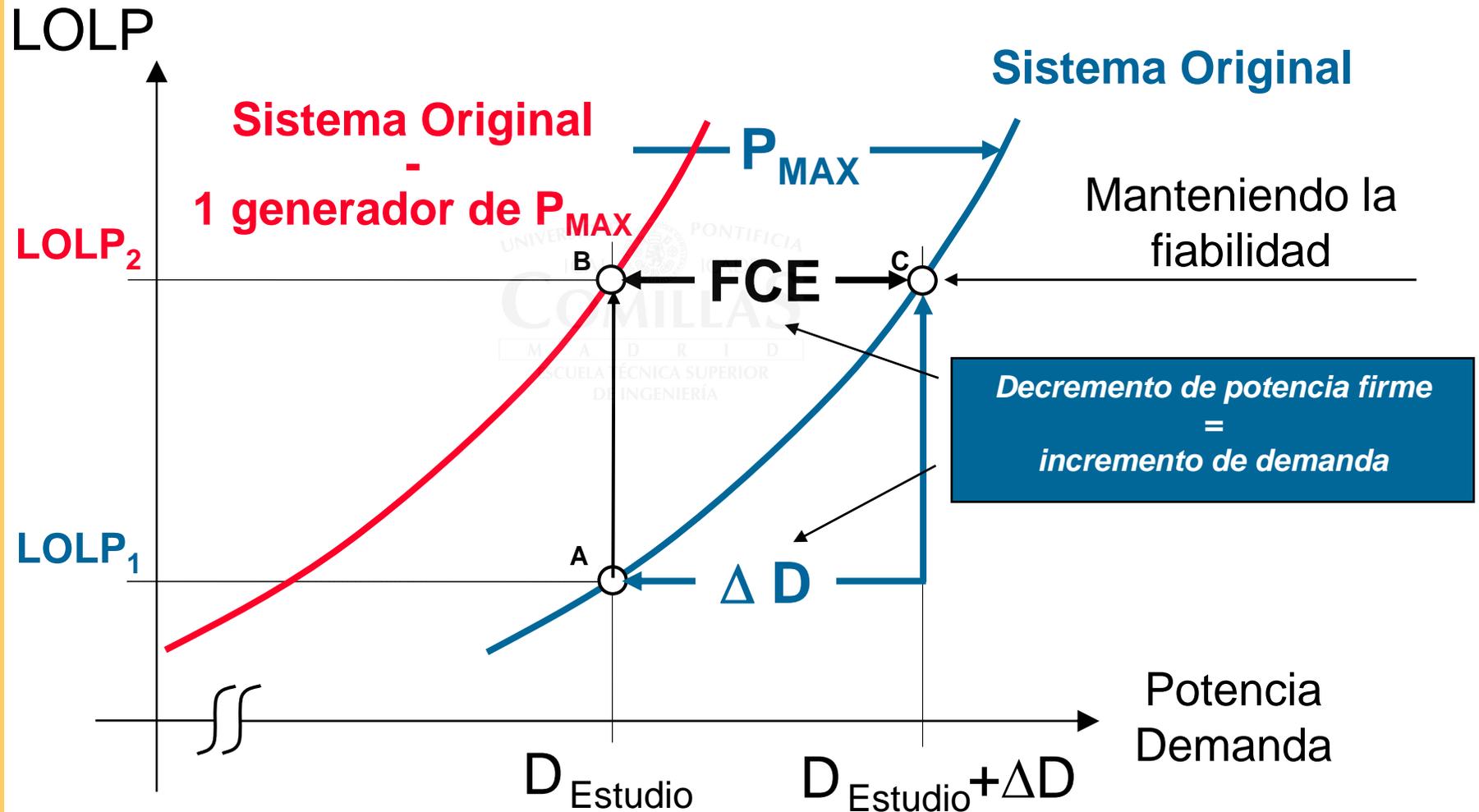
Valoración de la Generación en Términos de Fiabilidad: ELCC y FCE (II)



Valoración de la Generación en Términos de Fiabilidad: ELCC y FCE (III)

- **Capacidad Equivalente Firme** (*Firm Capacity Equivalent FCE*)
 - Al igual que ELCC, mide la **contribución** particular de un **generador** a la **fiabilidad** del sistema
 - A diferencia de ELCC, para su **cálculo** sólo se considera la demanda de **una determinada hora**
 - Se define **potencia firme** como la potencia de un **generador ideal** siempre disponible
 - Tasa de fallos cero, sin mantenimiento...
 - Dado un sistema de generación y una demanda a cubrir, se define **FCE** como la **potencia firme** que supone **añadir** un determinado **generador** manteniendo **constante** un determinado **índice de fiabilidad**
 - FCE y ELCC deben ser los **índices empleados** para el cálculo de los **pagos** por **contribuir** a la **fiabilidad** del sistema

Valoración de la Generación en Términos de Fiabilidad: ELCC y FCE (IV)





Modelos de Sistemas de Energía Eléctrica

Índices, medidas y criterios de fiabilidad

Mariano Ventosa

Andrés Ramos