Apuntes

Economía de la Energía

Temas 1 a 7

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Versión v1.0

Índice general

1 Costes de producción **2**
1.1 Qué decide un agente y con qué costes . . . 2
1.2 Decisión de operar y decisión de invertir . . . 2
1.3 Punto de equilibrio (break-even) . . . 3
1.4 Coste de oportunidad y arbitraje . . . 3

2 Competencia perfecta **3**
2.1 Mercado frente a regulación . . . 3
2.2 Condiciones de optimalidad . . . 4
2.3 Formación del precio con orden de mérito . . . 4

3 Monopolio **5**
3.1 Maximización del beneficio . . . 5
3.2 Efectos del monopolio . . . 5
3.3 Discriminación de precios . . . 6

4 Introducción a la teoría de juegos **6**
4.1 Juegos en forma normal . . . 6
4.2 Estrategias mixtas . . . 6

5 Oligopolio: juegos estáticos **6**
5.1 Modelo de Cournot (cantidades) . . . 6
5.2 Paradoja de Bertrand (precios) . . . 7
5.3 Modelos avanzados . . . 7

6 Oligopolio: juegos dinámicos **8**
6.1 Forma extendida e inducción hacia atrás . . . 8
6.2 Modelo de Stackelberg . . . 8
6.3 Bertrand–Edgeworth . . . 8
6.4 Allaz–Vila: contratos a plazo . . . 8

7 Oligopolio: juegos repetidos **9**
7.1 Colusión y su sostenibilidad . . . 9

8 Cómo se pregunta en el examen **9**

Resumen

Resumen teórico de la asignatura siguiendo el temario de la guía docente: costes, competencia perfecta, monopolio y oligopolio (teoría de juegos, juegos estáticos, dinámicos y repetidos). Cada tema termina con la receta para resolver el tipo de problema que aparece en el examen. Los ejemplos numéricos son propios y están calculados con Python; los problemas completos están en el documento de ejercicios resueltos.

1 Costes de producción

1.1 Qué decide un agente y con qué costes

La asignatura gira alrededor de una pregunta: qué cantidad producir y a qué precio vender. La respuesta depende de qué costes cambian con la decisión que se está tomando.

- **Coste variable** $CV(q)$: depende del nivel de producción (combustible, CO_2, peajes variables).
- **Coste fijo** CF: no depende de q en el horizonte de la decisión (O&M fijo, personal, seguro).
- **Coste medio**: $CMe(q) = \dfrac{CF + CV(q)}{q}$.
- **Coste marginal**: lo que cuesta producir una unidad más, $CMg(q) = \dfrac{dC}{dq}$.
- **Coste hundido**: ya gastado e irrecuperable. *No* debe entrar en ninguna decisión futura.
- **Coste de oportunidad**: el valor de la mejor alternativa a la que se renuncia (vender el gas en otro hub, turbinar el agua en otra hora).

> **Idea clave**
>
> El coste relevante depende del horizonte. En la decisión horaria de producir, la inversión ya está hecha (hundida) y solo cuenta el coste variable: se produce si $p \geq CMg$. En la decisión de construir, todo es evitable y hay que cubrir inversión, O&M fijo y costes variables.

1.2 Decisión de operar y decisión de invertir

Para una central de potencia P con coste variable c y precio p:

$$\begin{aligned} \text{Operar en una hora:} \quad & p \geq c \\ \text{Seguir abierta un año:} \quad & \sum_h (p_h - c)^+ \;\geq\; \text{O\&M fijo (por MW y año)} \\ \text{Construir:} \quad & \sum_h (p_h - c)^+ \;\geq\; \text{O\&M fijo} + \text{anualidad de inversión} \end{aligned}$$

La anualidad de una inversión I a N años con tasa i se obtiene con el factor de recuperación de capital:

$$A = I \, \frac{i}{1 - (1+i)^{-N}}.$$

Sin intereses, $A = I/N$. Ejemplo: 280 M€ a 25 años son 11,2 M€/año sin intereses, pero 24,0 M€/año al 7 % (factor 0,0858): la tasa de descuento más que duplica el coste fijo anual.

1.3 Punto de equilibrio (break-even)

Las horas que tiene que funcionar una central para cubrir sus costes fijos anuales F (por MW) con un margen medio $m = \bar{p} - c$ son

$$h^* = \frac{F}{\bar{p} - c}.$$

Con $F = 80\,067$ €/MW y un margen medio de 17 €/MWh salen unas 4710 h/año.

1.4 Coste de oportunidad y arbitraje

Si un bien se puede vender en dos momentos o lugares, su coste marginal "real" en uno es el precio que se deja de cobrar en el otro. Por eso:

- Un embalse con agua limitada turbina en las horas caras hasta que los precios (netos) se igualan en todas las horas en que produce.
- Un almacén de gas o una batería compran en valle y venden en punta mientras el diferencial supere las pérdidas y el coste de ciclo.
- Los hubs de gas convergen en precio si hay capacidad de transporte; con congestión aparecen diferenciales (igual que los precios nodales en electricidad).

> **Errores típicos**
>
> Incluir la inversión ya realizada al decidir si producir en una hora concreta. Olvidar el coste de oportunidad del agua o del combustible con contrato *take or pay* (si el gas se paga igualmente, su coste marginal a corto plazo es casi nulo).

2 Competencia perfecta

2.1 Mercado frente a regulación

En una actividad regulada el regulador fija ingresos que garantizan recuperar la inversión; en competencia cada agente decide y asume el riesgo. La regulación sufre problemas de información y de agencia (incentivos no alineados, efecto Averch–Johnson); el mercado solo funciona bien si hay muchos competidores o amenaza creíble de entrada. La liberalización eléctrica se basa en separar actividades: generación y comercialización en competencia, transporte y distribución regulados.

2.2 Condiciones de optimalidad

Con muchos agentes precio-aceptantes:

- El consumidor maximiza utilidad menos pago: compra hasta que su utilidad marginal iguala el precio.
- El productor maximiza ingreso menos coste: produce hasta que $CMg = p$.
- El planificador central que maximiza utilidad menos coste llega al mismo punto. Por eso *precio = coste marginal* es eficiente.

2.3 Formación del precio con orden de mérito

En el mercado eléctrico cada generador oferta su capacidad a su coste marginal. La curva de oferta es una escalera ordenada de menor a mayor coste. Con demanda $p = a - bq$:

1. Se prueba que cada escalón marca el precio: $q = (a - c_k)/b$.
2. Es válido si q cae dentro del rango de capacidad de ese escalón.
3. Si la demanda a precio c_k supera toda la capacidad hasta k pero a precio c_{k+1} queda por debajo, el precio lo marca la demanda en el escalón vertical: $p = a - b\,Q_k$ (precio de escasez).

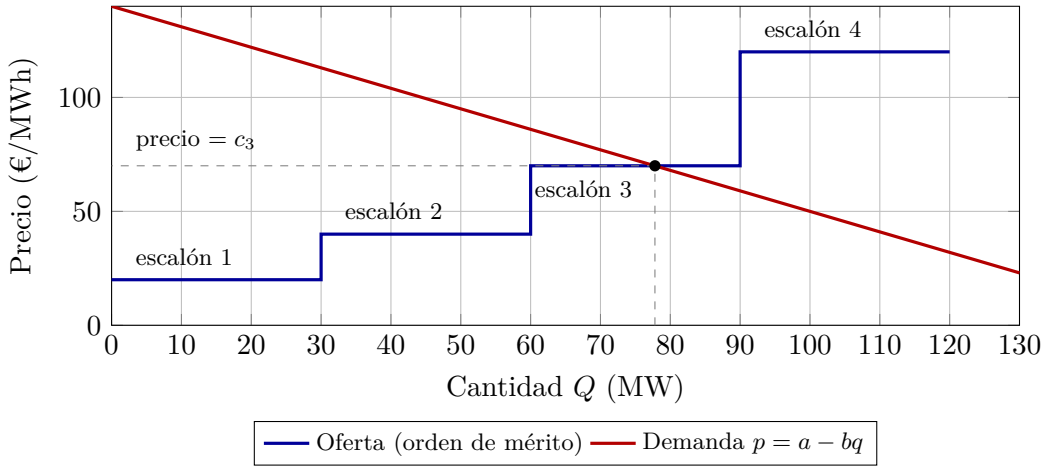


Figura 1. Orden de mérito. Cada escalón es una central con su coste marginal. El precio lo fija la última central necesaria para cubrir la demanda (ejemplo ilustrativo con $a = 140$ y $b = 0{,}9$).

Rentabilidad en competencia

Margen inframarginal anual por MW: $\sum_h (p_h - c)$ para las horas con $p_h > c$.

Abierta si margen $\geq$ O&M fijo. Se construye si margen $\geq$ O&M fijo + anualidad.

Idea clave

En competencia perfecta los generadores recuperan la inversión gracias a las rentas inframarginales y a los precios de escasez. Si el precio nunca superase el coste marginal de la última central, esta no recuperaría su coste fijo (problema del *missing money*).

3 Monopolio

3.1 Maximización del beneficio

Un único vendedor elige q sabiendo que el precio baja al vender más. Con $\Pi(q) = p(q)\,q - C(q)$:

$$\frac{d\Pi}{dq} = 0 \quad \Longrightarrow \quad \underbrace{p(q) + q\,p'(q)}_{IMg} = CMg(q).$$

Con demanda lineal $p = a - bq$, el ingreso marginal es $IMg = a - 2bq$: misma ordenada en el origen y doble pendiente.

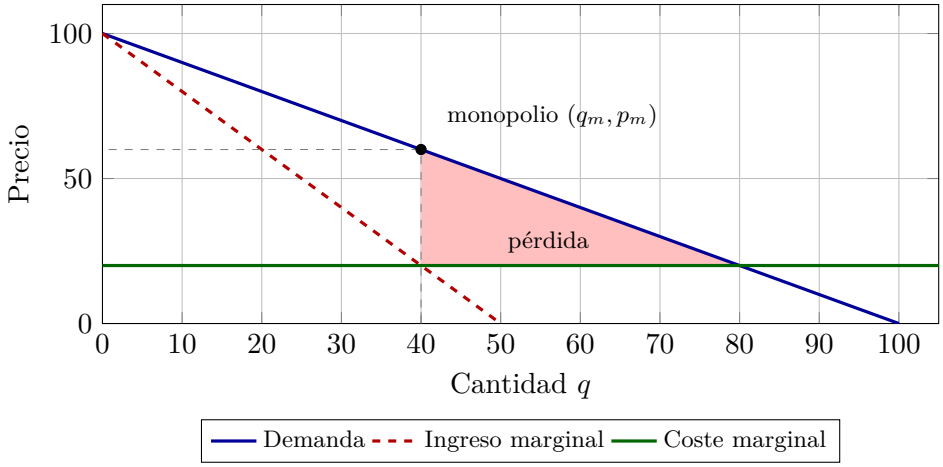


Figura 2. Monopolio con demanda lineal. El monopolista produce donde $IMg = CMg$ y cobra lo que dice la demanda. La zona roja es la pérdida irrecuperable de eficiencia respecto a competencia ($q = 80$).

Con oferta escalonada. Se prueba cada escalón: $a - 2bq = c_k \Rightarrow q = (a - c_k)/(2b)$ y se comprueba que q cae en su rango. El precio se lee después en la curva de *demanda*, no en la de ingreso marginal.

3.2 Efectos del monopolio

- Menor cantidad y mayor precio que en competencia.
- Pérdida de eficiencia (*deadweight loss*): área entre demanda y coste marginal desde q_M hasta q_C.
- Transferencia de excedente del consumidor al productor.
- Índice de Lerner: $\dfrac{p - CMg}{p} = \dfrac{1}{|\varepsilon|}$. A demanda más elástica, menos poder de mercado.

Regulación habitual: precio máximo, tasa de rentabilidad (con el riesgo de sobreinversión) o *price cap* con factor de eficiencia.

3.3 Discriminación de precios

Si el monopolista puede separar segmentos y no hay reventa, maximiza en cada uno: $IMg_1 = IMg_2 = CMg$. El segmento menos elástico paga más. Si la discriminación tiene un coste (gestión comercial, producto premium), se compara el beneficio extra con ese coste.

> **Errores típicos**
>
> Calcular el precio con el ingreso marginal en vez de con la demanda. No comprobar que la cantidad cae en el tramo de coste supuesto. Con dos segmentos y demanda agregada quebrada, olvidar comprobar en qué tramo está la solución uniforme.

4 Introducción a la teoría de juegos

4.1 Juegos en forma normal

Un juego se define por jugadores, estrategias y pagos. En forma normal se escribe la matriz de pagos (fila, columna).

- **Estrategia dominante**: es la mejor respuesta haga lo que haga el rival.
- **Equilibrio de Nash**: perfil en el que ningún jugador mejora cambiando solo su estrategia. Se busca marcando las mejores respuestas de cada jugador; las celdas con las dos marcas son equilibrios.
- Puede haber un equilibrio (dilema del prisionero), varios (coordinación) o ninguno en estrategias puras.

4.2 Estrategias mixtas

Si no hay equilibrio puro, cada jugador aleatoriza para dejar *indiferente al rival*. En un 2×2: la probabilidad x del jugador fila se calcula igualando los pagos esperados del jugador columna en sus dos estrategias, y viceversa.

> **Idea clave**
>
> La probabilidad de un jugador se obtiene de los pagos del *otro*. Es el error más frecuente.

5 Oligopolio: juegos estáticos

5.1 Modelo de Cournot (cantidades)

Cada empresa elige su cantidad tomando como dada la del resto. Con $p = a - bQ$ y coste marginal constante c_i, la condición de primer orden es

$$p - b\,q_i = c_i \quad \Longleftrightarrow \quad p = c_i + b\,q_i.$$

Para n empresas se suman las n ecuaciones con la de la demanda. Con costes iguales:

$$q_i = \frac{a-c}{b(n+1)}, \qquad p = \frac{a+nc}{n+1}.$$

Con $n \to \infty$ el precio tiende al coste marginal (competencia perfecta). Si una empresa satura su capacidad, se fija $q_i = K_i$ y se resuelve el resto.

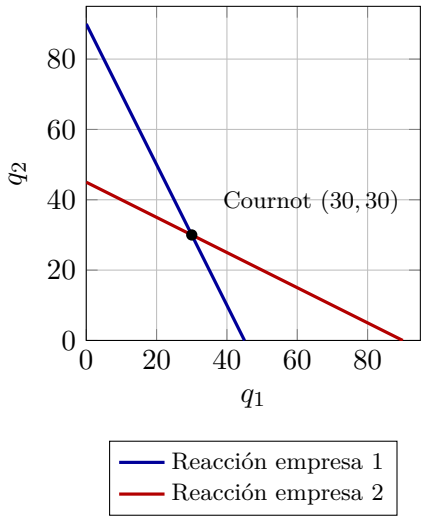


Figura 3. Funciones de reacción de dos empresas con $p = 100 - Q$ y $c = 10$. El equilibrio de Cournot está donde se cortan: cada una produce $q = (a-c)/(3b) = 30$.

5.2 Paradoja de Bertrand (precios)

Con producto homogéneo, competencia en precios y sin límites de capacidad, basta con dos empresas para llegar a $p = c$ (o al coste de la segunda más cara si los costes difieren). La paradoja se rompe con restricciones de capacidad (Bertrand–Edgeworth), diferenciación o interacción repetida.

5.3 Modelos avanzados

- **Variaciones conjeturales**: se generaliza la CPO a $p - b(1+\theta)q_i = c_i$; $\theta = -1$ es competencia perfecta, $\theta = 0$ Cournot, $\theta = n-1$ colusión.
- **Equilibrio en funciones de oferta**: cada empresa oferta una curva $p(q)$ en lugar de una cantidad; da resultados entre Cournot y competencia perfecta y se ajusta mejor a las subastas eléctricas.

6 Oligopolio: juegos dinámicos

6.1 Forma extendida e inducción hacia atrás

Cuando unos jugadores deciden después de observar a otros, el juego se representa como un árbol y se resuelve desde el final (equilibrio perfecto en subjuegos). Las amenazas que no serían creíbles en el último nodo se descartan.

6.2 Modelo de Stackelberg

El líder elige primero anticipando la función de reacción del seguidor. Con $p = a - bQ$ y coste c igual:

$$q_2(q_1) = \frac{a - c - bq_1}{2b}, \qquad q_1 = \frac{a - c}{2b}, \quad q_2 = \frac{a - c}{4b}.$$

El líder produce lo mismo que un monopolista, el total es mayor que en Cournot y el precio menor. Mover primero da ventaja.

6.3 Bertrand–Edgeworth

Con capacidades limitadas, si una empresa no puede atender toda la demanda la otra tiene una demanda residual que puede explotar a precio alto. Cuando las dos son pivotales no suele existir equilibrio en estrategias puras y aparecen ciclos de precios.

6.4 Allaz–Vila: contratos a plazo

Si antes del mercado de contado las empresas pueden vender a plazo, cada una vende contratos para comprometerse a producir más (se convierte en "líder" de sí misma). En el equilibrio todos lo hacen, el precio cae por debajo de Cournot y los beneficios bajan: es un dilema del prisionero que hace el mercado más competitivo. En la segunda etapa la CPO pasa a ser

$$p - b\,(q_i - f_i) = c_i,$$

porque solo la energía no contratada $(q_i - f_i)$ cobra el precio de contado.

7 Oligopolio: juegos repetidos

7.1 Colusión y su sostenibilidad

Si el juego se repite indefinidamente, las empresas pueden sostener la colusión con estrategias de castigo (*grim trigger*: si alguien se desvía, se vuelve para siempre al equilibrio de Cournot). Llamando Π_C al beneficio colusivo, Π_D al de traicionar una vez y Π_N al de Nash:

$$\text{la colusión es sostenible si} \quad \delta \geq \frac{\Pi_D - \Pi_C}{\Pi_D - \Pi_N}.$$

Teorema popular (*folk theorem*): con δ suficientemente alto, cualquier resultado que dé a todos más que el equilibrio de Nash se puede sostener.

> **Idea clave**
>
> En los ejercicios se suele comparar la ganancia de traicionar ($\Pi_D - \Pi_C$) con lo que se pierde por periodo de castigo ($\Pi_C - \Pi_N$). Si el castigo dura más periodos que su cociente, la traición no compensa.

8 Cómo se pregunta en el examen

El examen es práctico, con problemas parecidos a los de clase y a los de años anteriores. Las recetas:

1. **Competencia perfecta con escalones**: probar qué escalón marca el precio; si ninguno, precio de escasez en la demanda. Después, margen anual por MW contra O&M y anualidad para decidir cierre o construcción.
2. **Monopolio**: $IMg = a - 2bq$ contra cada escalón de coste; precio en la demanda; beneficio y pérdida de eficiencia.
3. **Discriminación**: IMg de cada segmento igual al CMg; comparar beneficio extra con el coste de discriminar.
4. **Cournot con n empresas**: escribir $p = c_i + bq_i$ para cada una más la demanda, sumar y despejar p; comprobar capacidades y repetir fijando las que saturan.
5. **Juegos dinámicos**: resolver la etapa final en función de la variable de la primera (precio de un servicio, contratos, cantidad del líder) y sustituir en el beneficio del que decide primero; derivar e igualar a cero.
6. **Colusión**: Cournot (beneficios de referencia), monopolio conjunto y reparto, mejor desvío del traidor, y comparación ganancia/castigo o factor δ.