



# Plan Energético Nacional

## Programación Lineal Básica

Jose Ignacio González Gómez

Departamento de Economía Financiera y Contabilidad - Universidad de La Laguna

[www.jggomez.eu](http://www.jggomez.eu)

Nombre	Descripción	Tipo PLB-PCE	Base	Informe	Modelo
Plan Energético Nacional	Se desea calcular que cantidad de tipos de energía se debe producir, de forma que se minimice el coste	PL Básica		NO	Otros

### Enunciado

Con el fin de dar respuesta al problema del cambio climático, nuestro país esta elaborando un plan energético nacional basado en limitar las emisiones de CO<sub>2</sub> al mínimo coste posible.

Los tipos de energía considerada, sus costes de producción en € por MWh y la emisión de CO<sub>2</sub> en Tm/MWh figuran en la siguiente tabla:

Fuentes Energéticas Consideradas	Coste Variable €/MWh	Emisión CO <sub>2</sub> Tm/MWh
Hidráulica	3,00	0
Nuclear	18,00	0
Carbón	58,16	0,929
Fuel / Gas	57,25	0,771
Ciclo Combinado	56,91	0,35
Cogeneración	50,00	0,34
Eólica	4,00	0
Solar Fotovoltaica	4,00	0
Biomasa / Biogás	60,00	0

Las capacidades de producción de las distintas fuentes son suficientes para cubrir la demanda de energía. Sin embargo, algunos tipos de energía están muy limitados, siendo sus capacidades máximas las que presentamos a continuación:

Capacidad Máxima Disponible al Año MWh

Hidráulica	328.000
Cogeneración	112.000
Eólica	146.000
Solar Fotovoltaica	2.500
Biomasa / Biogas	99.000

El país consume 1.500.000 MWh al año.

Por razones sociales el Gobierno ha decidido que:

- Se debe producir un máximo del 16% de la energía procedente de la energía nuclear.
- Se debe producir un mínimo del 5% de la energía procedente de cogeneración.

- Se debe producir un mínimo del 7% de la energía procedente de la energía eólica.

El país se ha comprometido en el protocolo de Kyoto a tener unas emisiones máximas de CO2 al año de 250.000 Tm.

**Se pide:**

Se desea calcular que cantidad de tipos de energía se debe producir, de forma que se minimice el coste.

*Planteamiento del problema*

*Definición de celda objetivo y celda/s de dato/s*

Comenzamos diseñando la hoja de calculo estableciendo las formulas contenidas en cada una de las celdas, enmarcando así el problema y sus restricciones. De esta forma básica, definimos (coloreando) la celda objetivo y la/s celda/s de dato/s o variables, así como las restricciones en rojo tal y como se muestra en la Ilustración 1.

Nuestra celda objetivo será F39 o F69, es decir el total de coste de producción de energía para la demanda necesaria, función que se pretende minimizar.

También debemos definir las variables o celdas cambiantes del modelo, en nuestro ejemplo es donde queremos que nos devuelvan los valores de la solución al problema, en este caso será la cantidad de camisas según modelo, el rango D30:D38 o D60:D68.

	A	B	C	D	E	F	G
23	<b>Planteamiento del Problema</b>						
24	Enunciado						
25	Plan Energético Nacional						
26	Tipos de energia considerada, costes de producción y						
27	Costes de Emisión CO2						
28	Fuentes Energéticas	Coste Variable €/MWh	Emisión CO2 Tm/MWh	Producción Año MWh	Producción %	Coste de Producción	Emisión CO2 Tm/MWh
29							
30	Hidráulica	3,00	0		0,0%	0,0 €	0
31	Nuclear	18,00	0		0,0%	0,0 €	0
32	Carbón	58,16	0,929		0,0%	0,0 €	0
33	Fuel / Gas	57,25	0,771		0,0%	0,0 €	0
34	Ciclo Combinado	56,91	0,35		0,0%	0,0 €	0
35	Cogeneración	50,00	0,34		0,0%	0,0 €	0
36	Eólica	4,00	0		0,0%	0,0 €	0
37	Solar Fotovoltaica	4,00	0		0,0%	0,0 €	0
38	Biomasa / Biogas	60,00	0		0,0%	0,0 €	0
39			Total (Año)	0	0,0%	0,0 €	0
40				1.500.000			250.000

Ilustración 1

*Valor de la función objetivo y restricciones de las variables*

Vamos a definir el valor de la función objetivo así como las restricciones. Respecto a la función objetivo en nuestro caso será aquella que nos permita minimizar el coste de producción para satisfacer la demanda energética del país.

Por otro lado se ha de considerar las siguientes restricciones expuestas:

Restricciones				
Capacidad Máxima Disponible al Año MWh		Consumo Promedio del País al Año (MWh):	1.500.000	
		Emisiones Máximas de CO2 (tm) al año de :	250.000	
Hidráulica	328.000			
Cogeneración	112.000			
Eólica	146.000			
Solar Fotovoltaica	2.500			
Biomasa / Biogas	99.000			
		Mínimo de Producción		
		Nuclear	<=	16,0%
		Cogeneración	>=	5,0%
		Eólica	>=	7,0%

**Resolución con Solver**

Tomando en consideración los aspectos anteriores, procederemos a continuación a configurar la solución al problema con Solver. Para ello y con el fin de conservar el planteamiento original del problema hemos copiado el mismo en el rango A56:G70

	A	B	C	D	E	F	G
56	<b>Solucion:</b>						
57							
58	Fuentes Energéticas	Coste Variable €/MWh	Emisión CO2 Tm/MWh	Producción Año MWh	Producción %	Coste de Producción	Emisión CO2 Tm/MWh
59							
60	Hidráulica	3,00	0		0,0%	0,0 €	0
61	Nuclear	18,00	0		0,0%	0,0 €	0
62	Carbón	58,16	0,929		0,0%	0,0 €	0
63	Fuel / Gas	57,25	0,771		0,0%	0,0 €	0
64	Ciclo Combinado	56,91	0,35		0,0%	0,0 €	0
65	Cogeneración	50,00	0,34		0,0%	0,0 €	0
66	Eólica	4,00	0		0,0%	0,0 €	0
67	Solar Fotovoltaica	4,00	0		0,0%	0,0 €	0
68	Biomasa / Biogas	60,00	0		0,0%	0,0 €	0
69			Total (Año)	0	0,0%	0,0 €	0
70				1.500.000			250.000

**Ilustración 2**

Situados sobre la celda objetivo (G70) accedemos a la configuración de la función Solver tomando en consideración las restricciones señaladas tal y como se expone Ilustración 3.

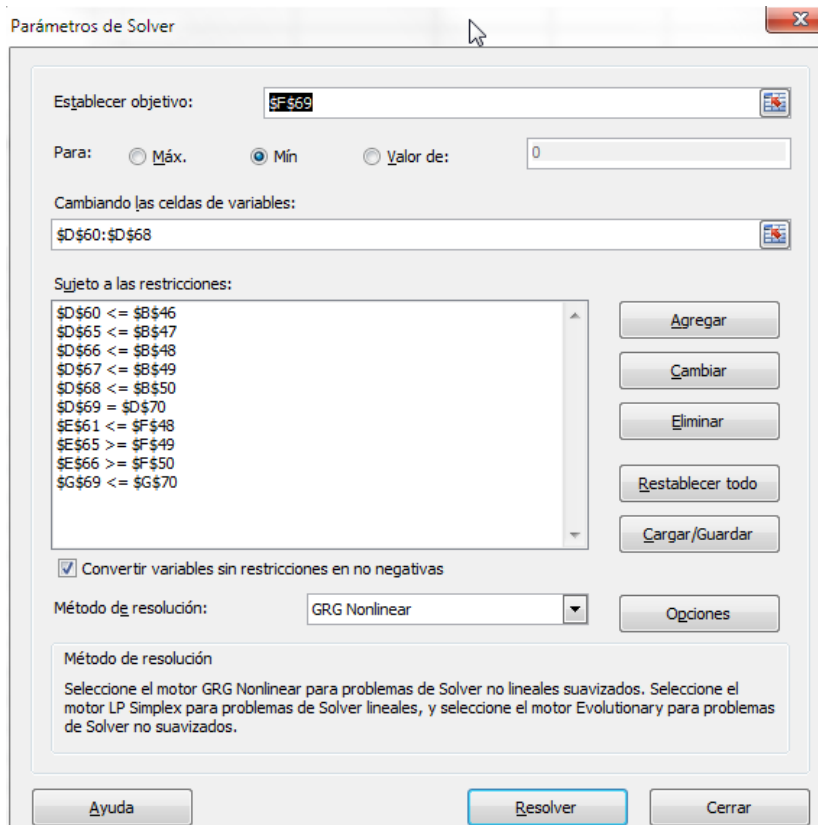


Ilustración 3

Pulsando sobre el botón Resolver, se ejecuta y se muestra la resolución del problema planteado, tal y como vemos en la Ilustración 4

	A	B	C	D	E	F	G
56	<b>Solución:</b>						
57							
58	Fuentes Energéticas	Coste Variable €/MWh	Emisión CO2 Tm/MWh	Producción Año MWh	Producción %	Coste de Producción	Emisión CO2 Tm/MWh
59							
60	Hidráulica	3,00	0	328.000	21,9%	984.000,0 €	0
61	Nuclear	18,00	0	240.000	16,0%	4.320.000,0 €	0
62	Carbón	58,16	0,929	0	0,0%	0,0 €	0
63	Fuel / Gas	57,25	0,771	0	0,0%	0,0 €	0
64	Ciclo Combinado	56,91	0,35	605.486	40,4%	34.458.192,0 €	211920
65	Cogeneración	50,00	0,34	112.000	7,5%	5.600.000,0 €	38080
66	Eólica	4,00	0	146.000	9,7%	584.000,0 €	0
67	Solar Fotovoltaica	4,00	0	2.500	0,2%	10.000,0 €	0
68	Biomasa / Biogas	60,00	0	66.014	4,4%	3.960.857,1 €	0
69			Total (Año)	1.500.000	100,0%	49.917.049,1 €	250000
70				1.500.000			250.000

Ilustración 4

Según la solución del SOLVER, supone un coste de 49.917.049 € para producir 1.500.000 MWh en un año. Obsérvese que no se produciría energía procedente del carbón ni de fuel/gas.

De los tipos de energía que tiene limitada su capacidad de producción, en todos ellos se produce al máximo, excepto con Biomasa que se producen 66.014,29 de los 99.000 MWh posibles (al 66,68% de su capacidad).

En cuanto a las restricciones del gobierno, se produce el 16% de energía con procedencia nuclear; sobre el mínimo del 5% de cogeneración se producen 112.000 MWh que suponen un 7,46% de la producción; y, sobre el mínimo del 7% de energía eólica se producen 146.000 MWh que son un 9,73% de la producción total.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> son exactamente las toneladas máximas que se pueden emitir cumpliendo con el protocolo de Kyoto.

En cuanto a los costes variables de cada tipo de energía habría que considerar lo siguiente:

- La energía hidráulica que tiene un coste variable de 3,00 €/MWh se seguirá utilizando en la producción siempre y cuando este coste no pase de 60,00 €/MWh.
- La energía nuclear cuyo coste variable es de 18,00 €/MWh se seguiría utilizando sea cual sea su coste.
- La energía procedente del carbón no se utiliza, sólo se utilizaría si se disminuye su coste variable en 6,36 €/MWh como mínimo, es decir, si su coste variable fuese menor que 51,80 €/MWh.
- La energía procedente del fuel o del gas no se utiliza, sólo se utilizaría si se disminuye su coste variable en 4,05 €/MWh como mínimo, es decir, si su coste variable fuese menor que 53,19 €/MWh.
- La energía procedente de ciclo combinado con un coste variable de 56,91 €/MWh se emplearía siempre que dicho coste esté comprendido entre 49,70 y 58,75 €/MWh.
- La energía procedente de la cogeneración se producirá siempre que el coste variable sea menor que 56,99 €/MWh.
- En el caso de la energía eólica y solar fotovoltaica que tienen un coste variable reducido de 4,00 €/MWh se empleará la energía procedente de estas dos fuentes siempre que su coste variable sea menor que 60,00 €/MWh lo que supone que son fuentes muy interesantes ya que se seguiría produciendo aún con incrementos muy relevantes en su coste variable.
- Algo parecido sucede con la energía que procede de la biomasa o biogás para la que cualquier coste variable por encima de 56,91 €/MWh resulta interesante para la producción de energía.

Respecto a las limitaciones que existen en las capacidades de producción para cada tipo de energía habría que considerar lo siguiente:

- De energía hidráulica se está produciendo al 100% de su capacidad máxima que son 328.000 MWh. Si se quiere producir un MWh más con este tipo de energía podría pagarse hasta en 57,00 €/MWh (precio sombra). Actualmente el coste fijo y variable supone un total de 39,00 €/MWh, con lo cual si se pudieran producir más MWh a este coste sería muy interesante ya que se reduciría el coste de producción en la diferencia 18,00 €/MWh. Interesaría incrementar la producción con este tipo de energía hasta los 394.014 MWh
- Con la energía producida con cogeneración sucede algo parecido. Se está empleando su capacidad al 100%, produciendo 112.000 MWh. Para producir un MWh más con cogeneración podría pagarse hasta 7,00 €/MWh de coste total, muy inferior al actual coste total que asciende 62,02 €/MWh, con lo que parece poco probable que se pueda ampliar la capacidad de producción de este tipo de energía ya que sería poco rentable o bien debería aplicarse algún tipo de subvención.
- Con la eólica encontramos resultados similares de nuevo. Se emplea toda la capacidad que supone la producción de 146.000 MWh. Por el incremento de capacidad de producción de un MWh se podría pagar hasta 56,00 €/MWh de coste total, esto es una cantidad muy inferior al coste actual que asciende a 84,00 euros. Si se quisiera incentivar la implantación de capacidad adicional de este

tipo de generación de energía una medida posible sería subvencionar por el gobierno la diferencia de costes (84,00-56,00) 28,00 €/MWh de capacidad de producción. A este coste de 56,00 €/MWh interesaría incrementar la capacidad de producción de energía eólica hasta los 212.014 MWh.

- Con la energía solar fotovoltaica nos encontramos con la misma situación de nuevo. Se produce al 100% de la capacidad, esto son 2.500 MWh. Interesaría incrementar la producción de energía solar hasta los 68.514 MWh siempre que el coste total por MWh no exceda de 56,00 €, coste muy por debajo del actual que asciende a 424,00 €/MWh, lo cual es poco probable salvo que se aplique algún tipo de subvención.
- La producción de energía con biomasa o biogas no utiliza el 100% de su capacidad. Se estaría utilizando el 66%, resultado coherente ya que esta fuente de energía es la que tiene el mayor coste variable.

En cuanto a las restricciones gubernamentales:

- Se establece un 16% de producción de energía nuclear y es el resultado que se aporta en la solución. Merece la pena considerar que la disminución de coste por incrementos de un 1 MWh en la producción de energía de origen nuclear es de 42,00 €.
- En cuanto al mínimo del 5% de cogeneración se producen 112.000 MWh que suponen un 7,46% de la producción; y,
- sobre el mínimo del 7% de energía eólica se producen 146.000 MWh que son un 9,73% de la producción total.

Se establece que la producción sea de 1.500.000 MWh y esto es lo que se planifica. El precio sombra de esta restricción establece que por cada MWh adicional que se quiera producir el coste se incrementa en 60 €. Las emisiones de CO<sub>2</sub> se limitan a 250.000 Tm y el resultado de la planificación de producción de energía establece que estas toneladas serán las emisiones previstas. Si bien podrían reducirse a 238.455 Tm con un coste adicional por Tm de 8,83 €/Tm.

También se podría considerar que se podrían comprar Tm adicionales de emisión de CO<sub>2</sub> y el precio que debería pagarse por Tm no debería exceder los 8,83 €/Tm.