

Modelo estocástico múltiple etapa para la toma de decisiones en la provisión de combustibles para generación eléctrica

Bernardo Zimberg^a Carlos E. Testuri^b Germán Ferrari^b

^aAdministración Nacional de Combustibles Alcohol y Portland

^bUniversidad de la República

Proyecto ANII FSE-1-2013-1-10891

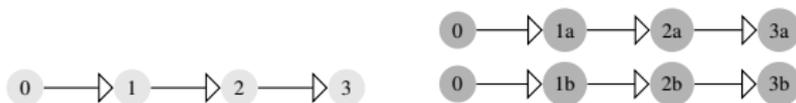
Outline

- 1 Introducción
- 2 Problema
- 3 Metodología
- 4 Modelo
- 5 Implementación
- 6 Casos de estudio
 - Casos 0 a 5
 - Caso 1. Balances
- 7 Conclusiones

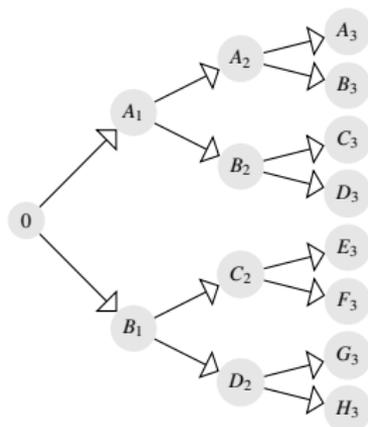
Contexto

- La generación de electricidad se realiza principalmente a partir de fuentes renovables: hidráulica y eólica
- La disponibilidad de fuentes renovables es incierta
- La generación térmica con combustibles líquidos o gaseosos complementa la falta de fuentes renovables
- Los combustibles deben ser importados dado que su producción puede no ser suficiente
- El proceso de importación es afectado por cambios en la disponibilidad de las fuentes renovables

Evaluación del abastecimiento óptimo, 3 períodos

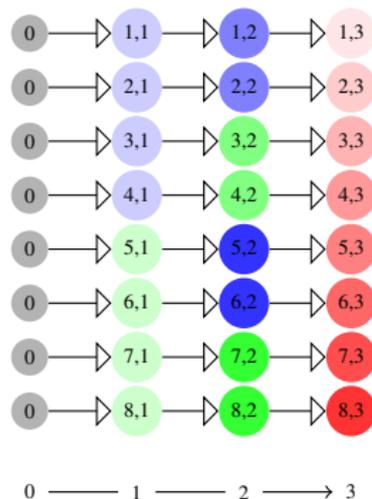
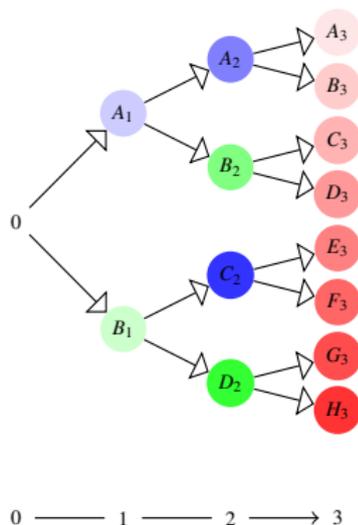


Modelos deterministas. Representación con uno o varios escenarios



Modelo con incertidumbre

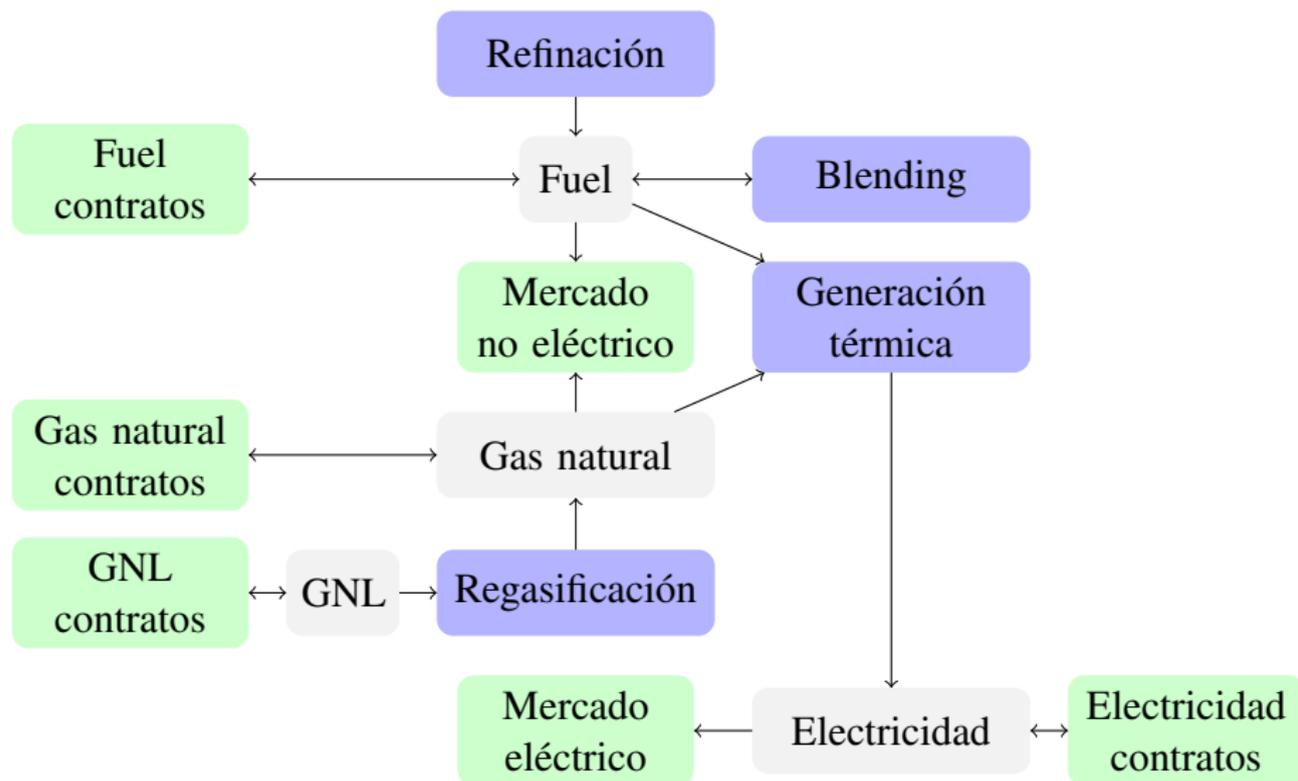
Representación. Escenarios básicos y Escenarios



Izquierda: Escenarios básicos (realizaciones) en cada período. Notación S_t

Derecha: Escenarios. Se indican las instancias repetidas. Notación S, t

Alcance del problema



Aspectos generales del problema

- Decisiones de importación o exportación en la primera etapa
 - Cargamentos y gas natural
- Decisiones correctivas en sucesivas etapas
 - Demora, cancelación, postergación y adelanto
 - Almacenamiento
 - Ajuste de producción, ajuste de demandas térmica y mercado interno
 - Importación y exportación de energía eléctrica

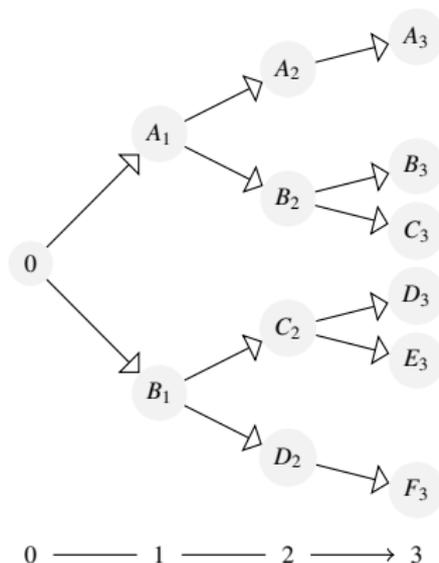
Reglas contractuales sobre cargamentos

- Precedencia: la cancelación de un cargamento determina la cancelación de otro
- Postergación o Adelanto: vincula un cargamento y otro alternativo
- Exclusión directa: la postergación de un cargamento implica la postergación de otro
- Exclusión cruzada: la postergación de un cargamento implica el adelanto de otro

Aspectos particulares del problema

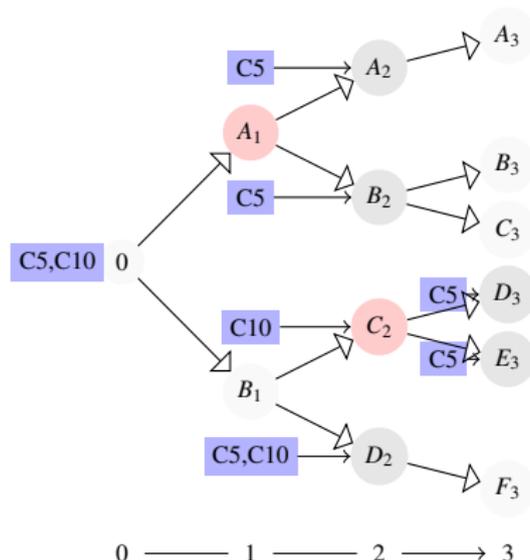
- Demanda para generación térmica expresada en energía
- Oferta de combustibles en cantidades discretas (parcelas)
- Se representan las unidades de generación eléctrica
- Se modela el autoconsumo y la emisión mínima en la regasificación de GNL
- Se consideran alternativas de importación y exportación de gas natural y energía eléctrica

Ejemplo: Evaluación. Importación de cargamentos para el período 2



- Se evalúa en el período 0 la recepción de los cargamentos **C5, C10, C15** con arribo en el período 2 y volúmenes respectivos: **5, 10, 15**.

Ejemplo: Decisión. Importación de cargamentos para el período 2



- (0) Compra de los cargamentos C5 y C10. Recepción en el período 2
- (A_1) Cancelación del cargamento C10 correspondiente a (A_2) y (B_2)
- (C_2) Postergación del cargamento C5 para recibir en (D_3) y (E_3)

Programación estocástica

Trata del modelado y resolución de problemas con datos inciertos:

- Parámetros en función de distribución de probabilidades
- Variables que modelan decisiones transitorias y correctivas
- Dinámica ordenada de decisiones a medida que se devela la incertidumbre
- Representación adecuada de problemas a costo de modelos más grandes

Programación entera

Trata del modelado y resolución de problemas con entidades discretas (indivisibles):

- Formulaciones representativas y flexibles del problema
- Explosión combinatorial de soluciones factibles
- Resolución más difícil que la de programación lineal; no se conoce método eficiente general de resolución

Algoritmos de resolución

Dependiendo del tamaño de las instancias:

- Soluciones exactas son obtenidas mediante *ramificado y acotamiento*
- Soluciones aproximadas son obtenidas a partir de tres heurísticas,
 - *relajado y fijado*
 - *horizonte rodante*
 - *agregación de escenarios y fijado*

Todas resuelven iterativamente sub-modelos por etapa donde valores de variables discretas son fijados a partir de resoluciones de etapas anteriores

Parámetros y variables de decisión (parcial)

- Parámetros
 - Determinísticos: inventario inicial, volúmenes de parcelas, períodos de efectivización, costos y precios, especificaciones, eficiencias
 - Aleatorios: demanda, producción
- Variables de decisión
 - Determinísticas binarias: asignación de parcelas de importación y exportación
 - Aleatorias continuas: nivel de inventario, trasiego, cotas y ajustes de producción y demanda
 - Aleatorias binarias: cancelaciones y postergaciones

Balance de materia en la refinería (parcial)

Para todo cargamento $c \in C$ y combustible $f \in F$, escenario $s_t \in S_t$, período $t \in T$, tal que los cargamentos $c \in C$ de combustible f se reciben en el período t

- El inventario al final del período es igual al inicial sumadas la producción, elaboraciones e importaciones y descontados el trasiego, autoconsumo, elaboraciones de otros, demanda y exportaciones

$$\begin{aligned}
 Stk_f^{s_t} = & Stk_f^{s_{t-1}} + Prod_f^{s_t} - PipeFuel_f^{s_t} - Cons_f^{s_t} + BlendIn_f^{s_t} - BlendOut_f^{s_t} \\
 & - Dem_f^{s_t} \\
 & + \sum_{\{c \in C : (c,t) \in CT \wedge (c,f) \in CF\}} VolC_c (1 - CanC_c^{s_t^*}) (1 - DelC_c^{s_t^{\#\}})
 \end{aligned}$$

Selección de cargamentos

Para toda dimensión $d \in CD_c$ y cargamento $c \in C$

- El volumen de un cargamento de un combustible, se selecciona a partir de las parcelas disponibles

$$VolC_c = \sum_{d \in CD_c} volCD_c^d \cdot SelC_c^d$$

$$selC_c \leq \sum_{d \in CD_c} SelC_c^d \leq 1$$

Balance de materia en la refinería (parcial). Linealización

Para toda dimensión $d \in CD_c$, cargamento $c \in C$ y combustible $f \in F$, escenario $s_t \in S_t$, período $t \in T$, tal que los cargamentos $c \in C$ de combustible f y dimensión $d \in CD_c$ se reciben en el período t

$$\begin{aligned} Stk_f^{s_t} = & Stk_f^{s_t^-} + Prod_f^{s_t} - Cons_f^{s_t} + BlendIn_f^{s_t} - BlendOut_f^{s_t} \\ & - Dem_f^{s_t} \\ & + \sum_{\{c \in C: (c,t) \in CT \wedge (c,f) \in CF\}} volCD_c^d \cdot SelAux_{c,d}^{s_t} \end{aligned}$$

- La expresión no lineal se sustituye por la nueva variable y restricciones adicionales

$$SelAux_{c,d}^{s_t} \leq 1 - CanC_c^{s_t^*}$$

$$SelAux_{c,d}^{s_t} \leq 1 - DelC_c^{s_t^\#}$$

$$SelAux_{c,d}^{s_t} \geq SelC_c^d + (1 - CanC_c^{s_t^*}) + (1 - DelC_c^{s_t^\#}) - 2$$

Combustibles y energía

- El combustible demandado para generación es consumido en las máquinas

$$DemG_g^{s_t} = \sum_{m:(m,g) \in MG} DemM_{m,g}^{s_t}$$

$$\forall g \in G, s_t \in S_t, t \in T.$$

- El combustible consumido en las máquinas se transforma en energía útil

$$DemME_{m,g}^{s_t} = \theta_{m,g} DemM_{m,g}^{s_t}$$

$$\forall (m, g) \in MG, s_t \in S_t, t \in T.$$

- La demanda de energía es aportada por las máquinas

$$DemGE^{s_t} = \sum_{(m,g) \in MG} DemME_{m,g}^{s_t}$$

$$\forall s_t \in S_t, t \in T.$$

- La demanda de energía es la demanda interna descontada la importación o sumada la exportación

$$DemGE^{s_t} = DemdGE^{s_t} - \sum_{r \in R: (r,t) \in RT} sgnTraGE_r \cdot \tau_t \cdot TraGE_r^{s_t}$$

$$\forall s_t \in S_t, t \in T.$$

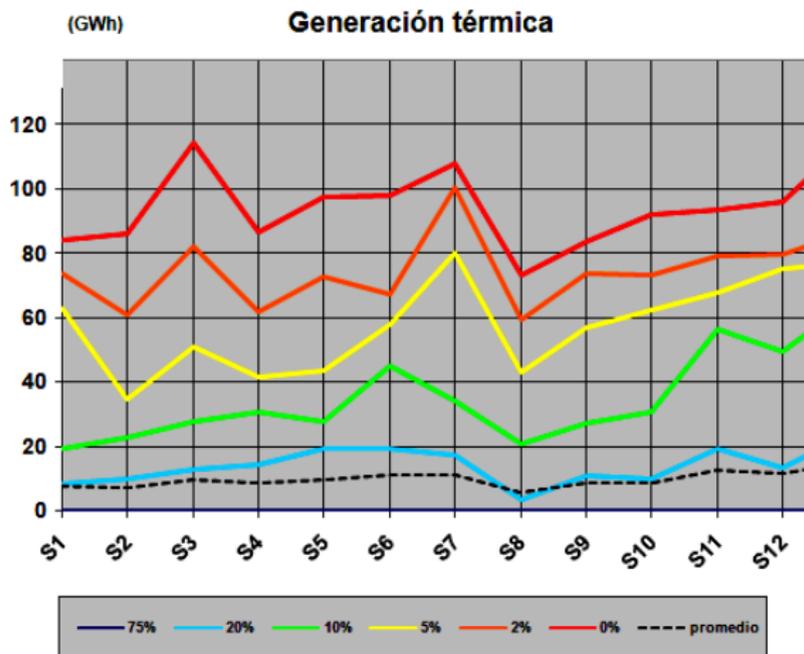
Función objetivo (parcial)

- Minimizar el costo medio:

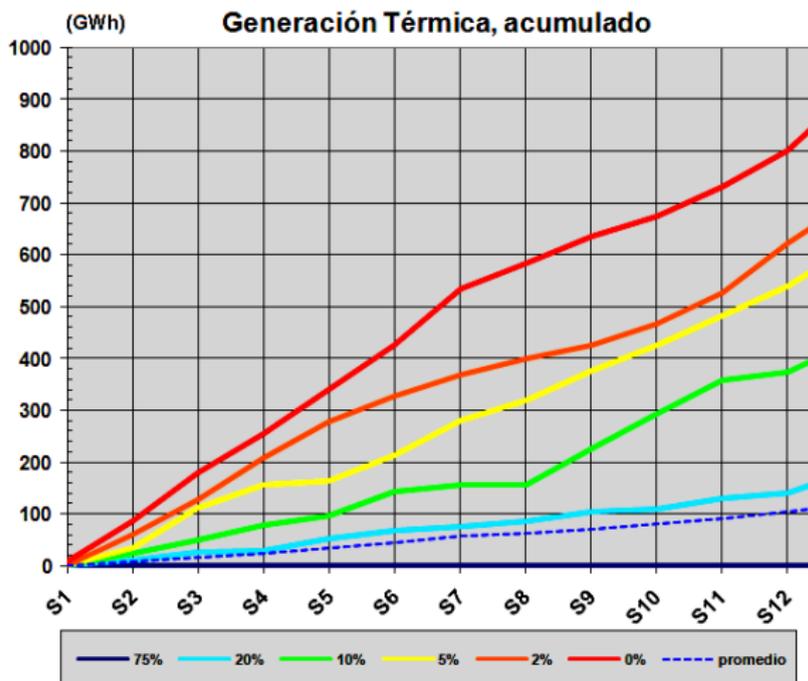
Importaciones y exportaciones de cargamentos, gas natural y energía eléctrica, postergaciones, cancelaciones, ajuste de producción, incumplimiento de demanda, mantenimiento de máquinas y cambio de inventario

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \frac{1}{Th} \sum_{t \in T} \sum_{s_t \in \mathcal{S}_t} \pi^{s_t} \left[\right. \\
 & + \sum_{c \in C: (c,t) \in CT} (cC_c \cdot \text{sgnVol}_c \cdot \text{Vol}C_c + c\text{Delay}_c)(1 - \text{Can}C_c^{s_t^*})(1 - \text{Del}C_c^{s_t^{\#\}}) \\
 & + \sum_{c \in C: (c,t) \in CT} c\text{Can}_c \cdot \text{Vol}C_c \cdot \text{Can}C_c^{s_t^*} \\
 & \left. + \dots \right] \tag{1}
 \end{aligned}$$

Determinación de períodos y escenarios básicos



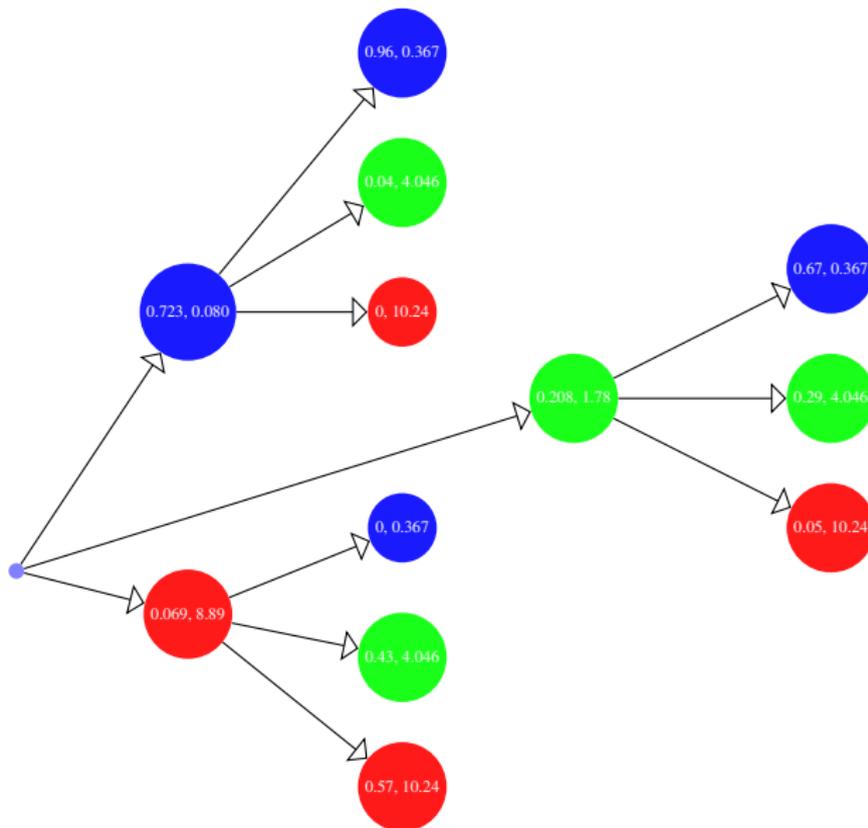
Determinación de escenarios



Generación del árbol de escenarios aplicando clustering. Probabilidades y demandas para los períodos 1 y 2

Per1: S1-2	Per2: S3-4	Per3: S5-8	Per4: S9-12	Per1: S1-2	Per2: S3-4	Per3: S5-8	Per4: S9-12	Escenario	Per1: S1-2	Per2: S3-4	
Gwh/día	Gwh/día	Gwh/día	Gwh/día								
0.000	0.000	0.632	0.000	1	1	1	1	1	Gwh/día	0.080	0.367
0.600	0.257	0.057	0.000	1	1	1	1	2	Gwh/día	1.778	4.046
10.843	12.036	5.454	4.743	3	3	2	2	3	Gwh/día	8.895	10.237
0.000	0.000	0.000	0.032	1	1	1	1				
0.000	0.714	0.179	0.000	1	1	1	1		Prob	0.72	0.83
0.000	1.600	2.679	0.000	1	1	2	1		Prob	0.21	0.12
0.000	0.000	0.000	0.000	1	1	1	1		Prob	0.07	0.05
0.357	0.864	0.886	0.911	1	1	1	1				
7.393	9.050	4.907	9.486	3	3	2	3		Prob cond	1-1	0.96
9.721	7.100	8.561	1.229	3	2	3	1			1-2	0.04
0.000	0.000	0.104	0.961	1	1	1	1			1-3	0.00
0.000	0.000	0.000	0.000	1	1	1	1		Prob cond	2-1	0.67
0.000	1.014	0.000	0.000	1	1	1	1			2-2	0.29
1.157	0.614	0.032	2.236	2	1	1	2			2-3	0.05
1.850	1.257	0.954	3.443	2	1	1	2		Prob cond	3-1	0.00
0.000	0.000	1.261	1.179	1	1	1	1			3-2	0.43
2.693	3.543	3.007	2.789	2	2	2	2			3-3	0.57

Arbol generado. Probabilidades y demandas (Gwh/día)



Implementación del modelo y sistema informático

Características

- Escenarios separados con restricciones de no-anticipatividad
- Linealización de expresiones cuadráticas binarias
- Lenguaje de programación de interfaz: Scala
- Lenguajes de modelado algebraico: Mathprog - AMPL
- Sistemas de resolución: GLPK - Cplex
- Medio de almacenamiento de datos
 - Archivos de proyectos
 - Salidas en planillas de cálculo

Proyectos

Caso ejemplo - Modelo de optimización de la compra de derivados

Proyectos | Plantillas | Unidades | Variables | Parámetros | Generador | Escenarios | Elaboración | Comercio ▶

🔍       

Fecha	Nombre	Id	#	Hora	Info
12/07/2016	Caso ejemplo	53	3	18:53:24	Parámetros actualizados
12/07/2016	Caso10 presentación ANCAP (podado)	52	2	18:53:20	Parámetros actualizados
12/07/2016	Caso10 presentación ANCAP (sobrescrito)	51	1	18:52:56	Proyecto cargado
07/07/2016	Caso6 6 periodos (sobrescrito)	50			
14/07/2016	Caso6_9 6 periodos	49			
07/07/2016	Caso9 10 periodos (sobrescrito)	48			
07/07/2016	Caso8 8 periodos (sobrescrito)	47			
07/07/2016	Caso6 6 periodos (sobrescrito)	46			
07/07/2016	Caso ejemplo	45			
24/07/2016	Caso ejemplo 2	44			
24/07/2016	Ejemplo Escenarios	43			
24/07/2016	Caso8 8 periodos para ejemplos (recortado a 5)	42			
07/07/2016	Caso8 8 periodos para ejemplos	41			
22/07/2016	Caso ejemplo 2 - 8 periodos	38			
07/07/2016	Caso6 6 periodos (prueba Heurísticas Carlos) (agregar vari...	37			
12/06/2016	Caso3_2 postes (fix stkGmin, nueva plantilla reporte, agre...	36			
07/06/2016	Modelo3_2 postes y error en stkGmin	34			
07/06/2016	Caso6 6 periodos (variables completas)	33			
07/06/2016	Caso6 6 periodos unidades	32			
07/06/2016	Caso6 6 periodos - Bernardo May-23	31			
07/06/2016	Caso6 (sobrescrito)	30			
16/05/2016	Caso6 (Bernardo, con compresión) (clonado)	29			
13/05/2016	caso 7	27			

☑

Reporte de resultados

	A	B	C
12			
13	Periodos	4	
14	Horizonte (días)	84	
15	Función objetivo (mil USD / día)	348,1	
16	Cargamentos	11	
17	Escenarios	81	
18	Parcelas	3	

Resumen MFO FOC IFO FOB G

	A	B
42	Función objetivo	
43	Función objetivo (mil USD / día)	348,1
44	Costo cargamentos	172,68
45	Costo cancelación cargamentos	35,07
46	Costo comercio gas natural	212,76
47	Costo cancelación comercio gas natural	0
48	Costo comercio energía eléctrica	-98,78
49	Costo ajuste de producción	0
50	Costo ajuste demanda mercado interno	4,05
51	Costo ajuste demanda energía eléctrica	0
52	Costo atrasos	0
53	Costo mantenimiento máquinas	22,33
54	Costo regasificación	0
55	Variación de inventario	0
56	Variación de inventario generación	0

Resumen MFO FOC IFO FOB GOI

	A	B	C	D
20	Primera etapa			
21	Cargamento	Comentario	Actividad	Cancelación
22		mil m ³ (l)		
23	GOIL11		30	0
24	GOIL12		0	0
25	MFO21		0	0
26	GOIL22		15	30
27	MFO31		0	0
28	GOIL31		0	0
29	GOIL32		30	30
30	MFO41		0	0
31	GOIL41		0	0
32	GOIL42		30	33
33	GNL41		150	39
34				
35	Gas Natural	Comentario	Actividad	Cancelación
36		mill m ³ (g) / día		
37	TraNI1		0,3	0
38	TraNI2		0,3	0
39	TraNI3		0,43	0
40	TraNI4		0,42	0

Resumen MFO FOC IFO FOB GOIL LNG

Casos de estudio

- Caso 0. Fuel Motores y Gas oil. No se importa o exporta electricidad. Demanda de fuel oil bunker dada.
- Caso 1. + Cancelaciones con anticipación
- Caso 2. + Importa o exporta energía eléctrica. Decisión en el período anterior.
- Caso 3. + Importa o exporta energía eléctrica. Decisión en el período y escenario.
- Caso 4. + Habilita reducir o aumentar la venta de fuel oil bunker a costo dado.
- Caso 5. + Evalúa cargamento de GNL en el período 4. Decisión de cancelación en el período 2.

Casos de estudio

Mil m3	Planta					Generación	
	Fuel base	Fuel motores	Fuel Bunker	Gas oil	GNL	Fuel motores	Gas oil
Inicial	6	0	10	80	80	6	60
Mínimo	5	0	5	80	80 (20)	0	40
Máximo	12	12	15	180	240	12	60
Producción día	0.3		0	2.8			
Demanda día	0		0.4	2.8			

- Períodos: 1 (14 días), 2 (14 días), 3 (28 días), 4 (28 días)
- Se construye un árbol con podas en las ramas extremas para representar la evolución de las demandas baja y alta
- El número de escenarios es 45
- El valor de los inventarios es 0. No considera los requerimientos de períodos posteriores al 4
- Se decide el abastecimiento óptimo de los períodos 1 al 4

Casos de estudio

Importación								
Nombre	Calidad	Precio	Canc	Costo Canc	Δ Canc	Parcelas	Periodo	Parcela Pre
GOIL11	GOIL	450	<input type="checkbox"/>					1 30
GOIL12	GOIL	452	<input type="checkbox"/>			15, 30		1
MFO21	MFO	350	<input type="checkbox"/>			10		2
GOIL22	GOIL	456	<input checked="" type="checkbox"/>	40		1 15, 30		2
MFO31	MFO	352	<input checked="" type="checkbox"/>	20		1 10		3
GOIL31	GOIL	458	<input type="checkbox"/>			15, 30, 60		3
GOIL32	GOIL	460	<input checked="" type="checkbox"/>	40		1 15, 30, 60		3
MFO41	MFO	354	<input checked="" type="checkbox"/>	20		1 10		4
GOIL41	GOIL	462	<input type="checkbox"/>			15, 30, 60		4
GOIL42	GOIL	468	<input checked="" type="checkbox"/>	40		1 15, 30, 60		4
	MFO		<input type="checkbox"/>					0

Casos. Cargamentos y parcelas a evaluar

Importación							
Nombre	Precio	Canc	Costo Canc	Δ Canc	Máximo	Mínimo	Periodo
TraNI1	15	<input type="checkbox"/>				0.5	1
TraNI2	15	<input checked="" type="checkbox"/>		0.044		0.5	2
TraNI3	15	<input type="checkbox"/>				0.5	3
TraNI4	15	<input type="checkbox"/>				0.5	4
		<input type="checkbox"/>					0

Casos. Contratos de gas natural

Casos 0 a 5. Cargamentos adjudicados

	Caso0	Caso1	Caso2	Caso3	Caso4	Caso5
Costo (mil USD / día)	551.55	659.07	473.15	365.68	349.98	118.68
GOIL11	30	30	30	30	30	30
GOIL12	15	30				
MFO21	10					
GOIL22	30	30	15	15	15	
MFO31	10		10			
GOIL31						
GOIL32	60	60	30	30	30	15
MFO41	10	10		10		10
GOIL41						
GOIL42	60	60	60	30	30	15
GNL41						150

Casos 0 a 5. Tamaño de los cargamentos adjudicados en la solución

Casos 0 a 5. Cancelaciones

Cancelación	Caso0	Caso1	Caso2	Caso3	Caso4	Caso5
GOIL11						
GOIL12						
MFO21						
GOIL22	39	3	3	30	30	
MFO31	39		21			
GOIL31						
GOIL32	30	21	21	30	30	39
MFO41	38	39		30		39
GOIL41						
GOIL42	30	30	24	30	30	39
GNL41						21
Total	176	93	69	120	90	138

Casos 0 a 5. Número de cancelaciones para los cargamentos en la solución

Casos 0 a 5. Costos

	Caso0	Caso1	Caso2	Caso3	Caso4	Caso5
Costo (mil USD / día)	551.55	659.07	473.15	365.68	349.98	118.68
Costo cargamentos	304.15	421.55	227.14	171.25	170.31	171.55
Costo cancelación cargamentos	74.4	65.14	46.91	37.21	34.88	16.46
Costo comercio gas natural	166.12	166.19	213.72	213.72	213.72	
Costo cancelación comercio gas natural						
Costo comercio energía eléctrica			-25.35	-76.29	-95.61	-94.76
Costo ajuste de producción						
Costo ajuste demanda mercado interno					4.06	3.5
Costo ajuste demanda energía eléctrica						
Costo atrasos						
Costo mantenimiento máquinas	6.88	6.21	10.73	19.79	22.62	21.91
Costo regasificación						
Variación de inventario						
Variación de inventario generación						

Casos 0 a 5. Detalle de costos en la solución

Caso 1. Cancelaciones habilitadas con anticipación

Periodo 2 (Semana 3-4) 14							
Variable	Comentario	Escenario					
		mil m ³ (l)	[b,b]	[m,b]	[m,m]	[m,a]	[a,m]
Stkl.2		140	140	140	140	120.07	120.07
Prod.2		39.2	39.2	39.2	39.2	39.2	39.2
BlendIn.2	(elaborado)	0	0	0	0	0	0
PipeFuel.2		0	-7.01	0	-50	-10.04	-44.44
Demc.2		-39.2	-39.2	-39.2	-39.2	-39.2	-39.2
BlendOut.2	(elaboracion)	0	0	0	0	0	0
Cons.2		0	0	0	0	0	0
GOIL22.2		0	30	30	30	30	30
Stk.2		140	162.99	170	120	140.03	105.63
GOIL22.CanC.2		1					
GOIL22.DeIC.2							

Caso 1. Balance volumétrico de Gas oil en la solución

Caso 1. Cancelaciones habilitadas con anticipación

Período 4 (Semana 9-12), días: 28			
mil MWh	Escenario		
	[b,b,b,b]	[m,m,m,m]	[a,a,a,a]
DemGE.4	-0.03	-77.2	-307.58
Quinta.4	0	0	0
Sexta.4	0	0	0
Motores MFO.4	0	0	53.76
PTG.4	0	0	25.34
CTR.4	0	0	0
PTBa.4	0.03	77.2	228.48
PTBc.4	0	0	0
DemdGE.4	-0.03	-77.2	-307.58
TraGEI4.4	0	0	0
TraGEE4.4	0	0	0
mil m ³ (l)			
Quinta.FOC.4	0	0	0
Sexta.FOC.4	0	0	0
Motores MFO.MFO.4	0	0	12.96
PTG.GOIL.4	0	0	6.8
PTG.LNG.4	0	0	0.01
CTR.GOIL.4	0	0	0
PTBa.GOIL.4	0	20.18	59.76
PTBa.LNG.4	0.01	0.01	0
PTBc.GOIL.4	0	0	0
PTBc.LNG.4	0	0	0

Caso 1. Balance energético en la solución

Conclusiones

- Se presentó un modelo para el abastecimiento de fuel oil, gas oil y gas natural que incorpora el efecto de la demanda, la compra de cargamentos de combustibles, gas natural y energía eléctrica para un conjunto de escenarios dado
- Considera la producción, demanda, inventarios y sus restricciones. Se representan costos de importación, exportación, postergaciones y cancelaciones. Se modelan relaciones entre cargamentos
- Se incorpora el modelado de las unidades de generación y el costo de la regasificación
- La demanda para generación térmica se expresa en unidades energéticas
- El sistema es flexible en el sentido de permitir la introducción gradual de la complejidad; es utilizable en un ambiente de toma de decisiones conjunto; la operación no requiere especialización detallada en el modelo

Conclusiones

- Los resultados del modelo proveen decisiones iniciales que ponderan todos los escenarios y acciones correctivas para cada escenario
- Los casos típicos abarcan tres o cuatro períodos con dos a tres escenarios básicos por período
- Se han obtenido soluciones exactas en casos con hasta ocho períodos y dos escenarios básicos por período
- La resolución de casos complejos se realiza con heurísticas
- Estudios realizados con métricas que miden el aporte de la solución estocástica respecto a la toma de decisiones por simulación de escenarios muestran una reducción en el costo de abastecimiento.

Referencia



B Zimberg, C Testuri, and G Ferrari.

Stochastic modeling of fuel procurement for electricity generation with contractual terms and logistics constraints.

Computers and Chemical Engineering, 123:pp. 49–63, 2019.

¡Gracias por la atención!