



Análisis Económico de Estrategias para la Gestión de Combustible Gastado

Juan Luis François, Hermilo Hernández, Noé Vargas
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

*Latin American Section of the American Nuclear Society
2006 Annual Symposium
Buenos Aires, Argentina, 26-29 Junio, 2006*

Contenido

- Introducción
- Modelo de Cálculo
- Módulo de Balance de Materiales
- Módulo Económico
- Análisis Económico
- Conclusiones

Introducción

- La generación de energía eléctrica por medio de reactores nucleares representa actualmente el 16% de la generación mundial
- Los recursos de uranio durarán 50 años al ritmo de consumo actual
- Con los reactores rápido de cría, el contenido energético del uranio aprovechable se multiplicaría por un factor de 50 a 60.
- Antes de los reactores rápido de cría es posible reprocessar y reciclar en los LWR

El Ciclo de Combustible Nuclear

- ✱ Pre-irradiación del combustible (*front-end*)
- ✱ Irradiación del combustible
- ✱ Post-irradiación del combustible (*back-end*)

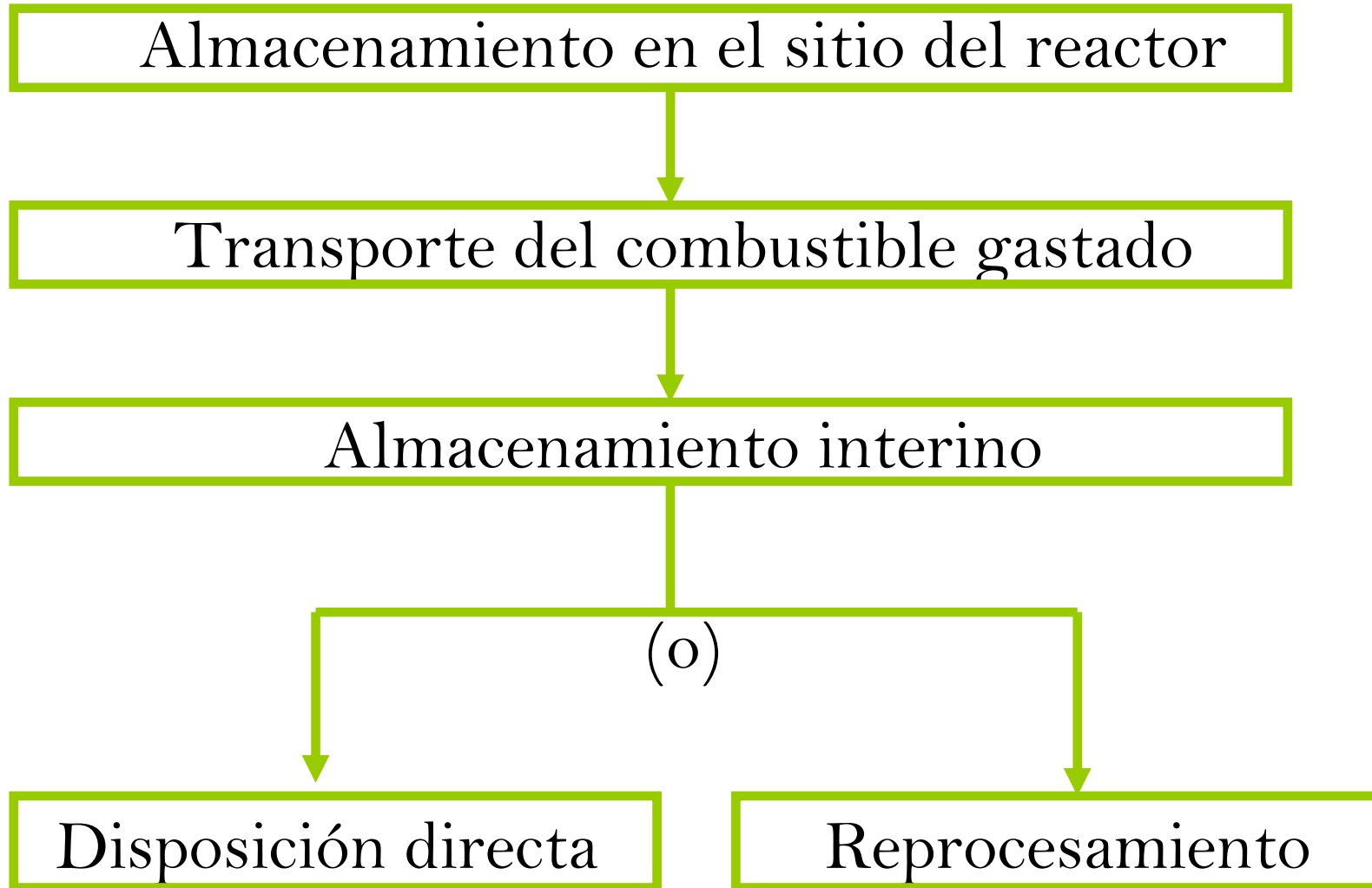
El Ciclo de Combustible Nuclear (Cont.)

✦ Se divide en:

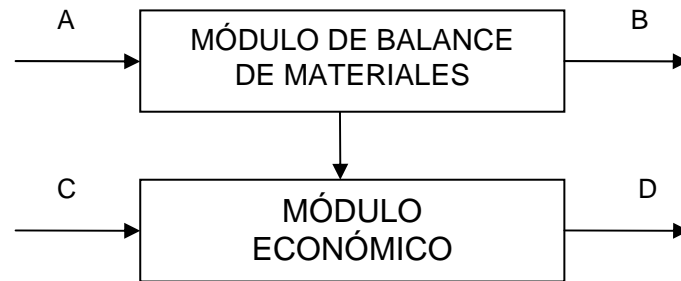
– Ciclo abierto

– Ciclo cerrado

Back-end



Modelo de Cálculo



Modelo de Balance de Material

Creación de un modelo simplificado



Simulación del quemado



Cálculo de decaimiento

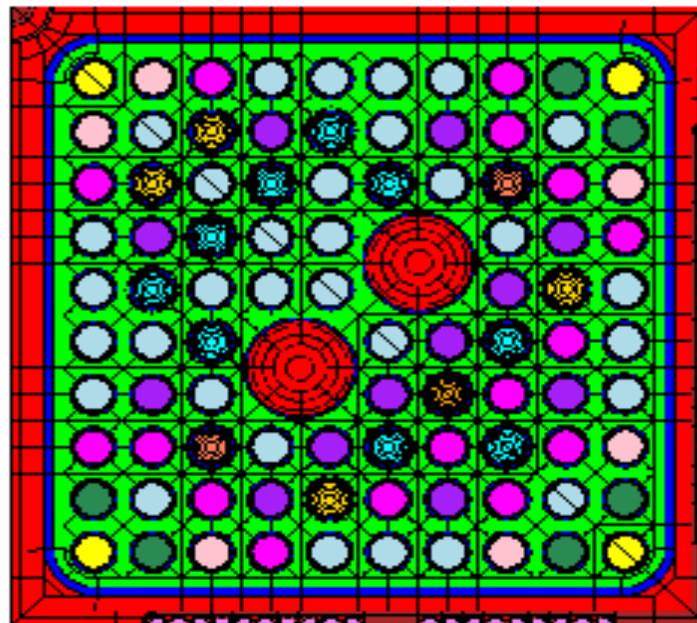


Cuantificación del uranio y plutonio



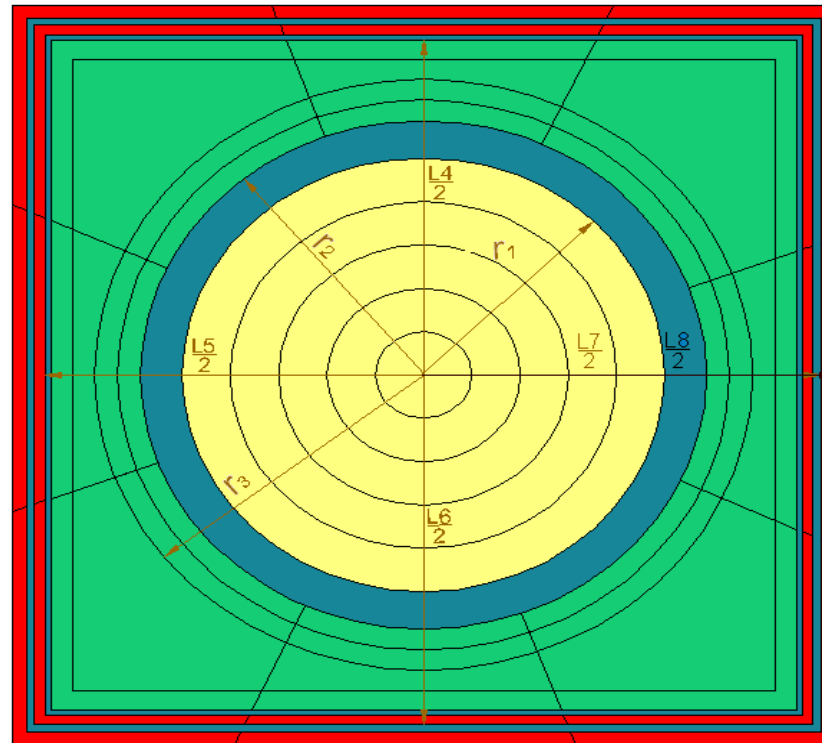
Diseño del ensamble MOX

Celda de combustible 10 x 10

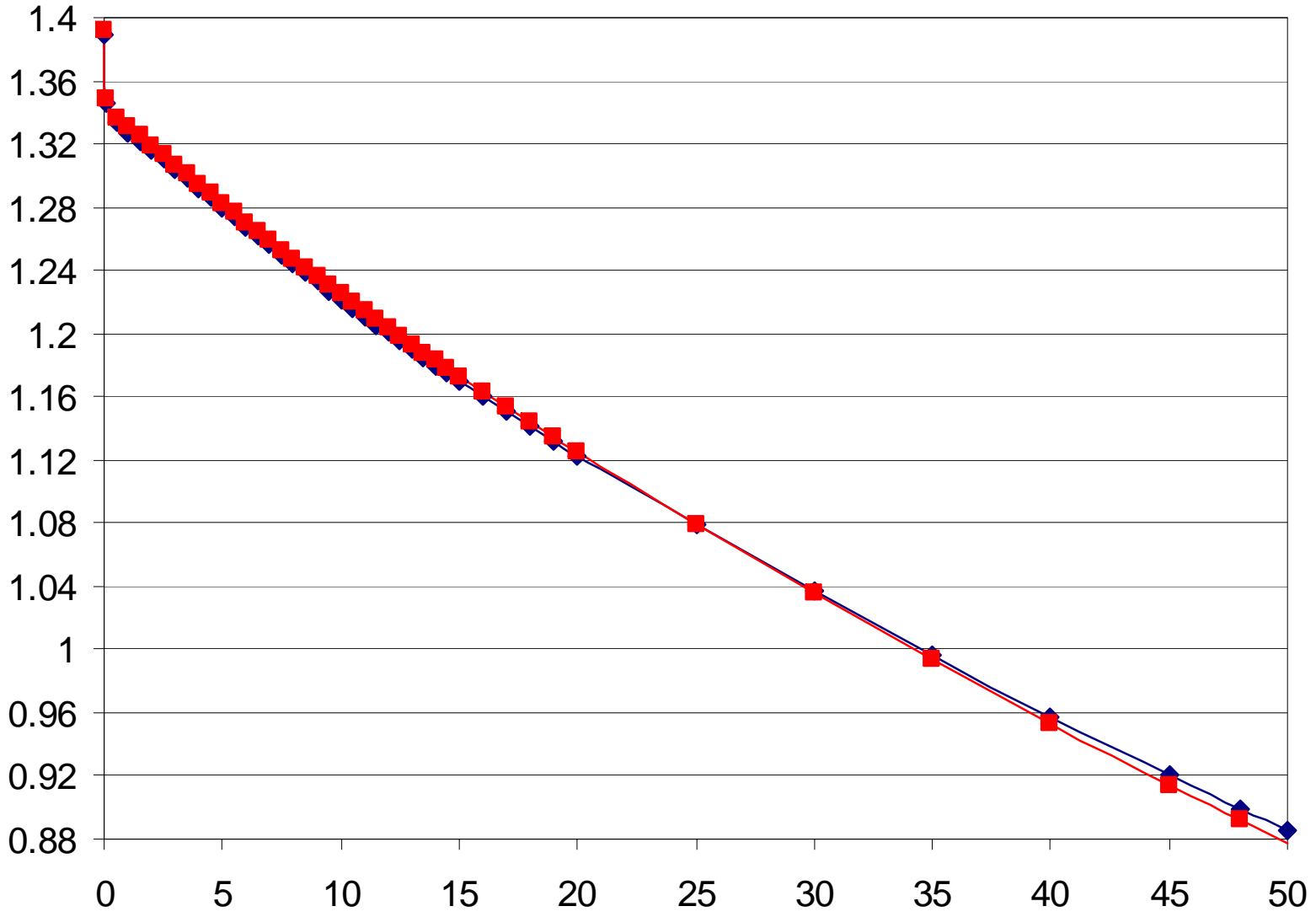
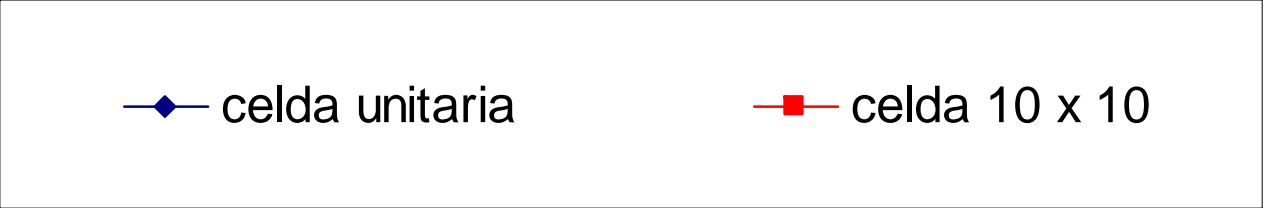


UO2-6
UO2-G1
UO2-G2
UO2-G3
UO2-G4
Zircaloy2
SS304
U5det
H20-v1
H20-v2
UO2-1
UO2-2
UO2-3
UO2-4
UO2-5

Celda unitaria de combustible

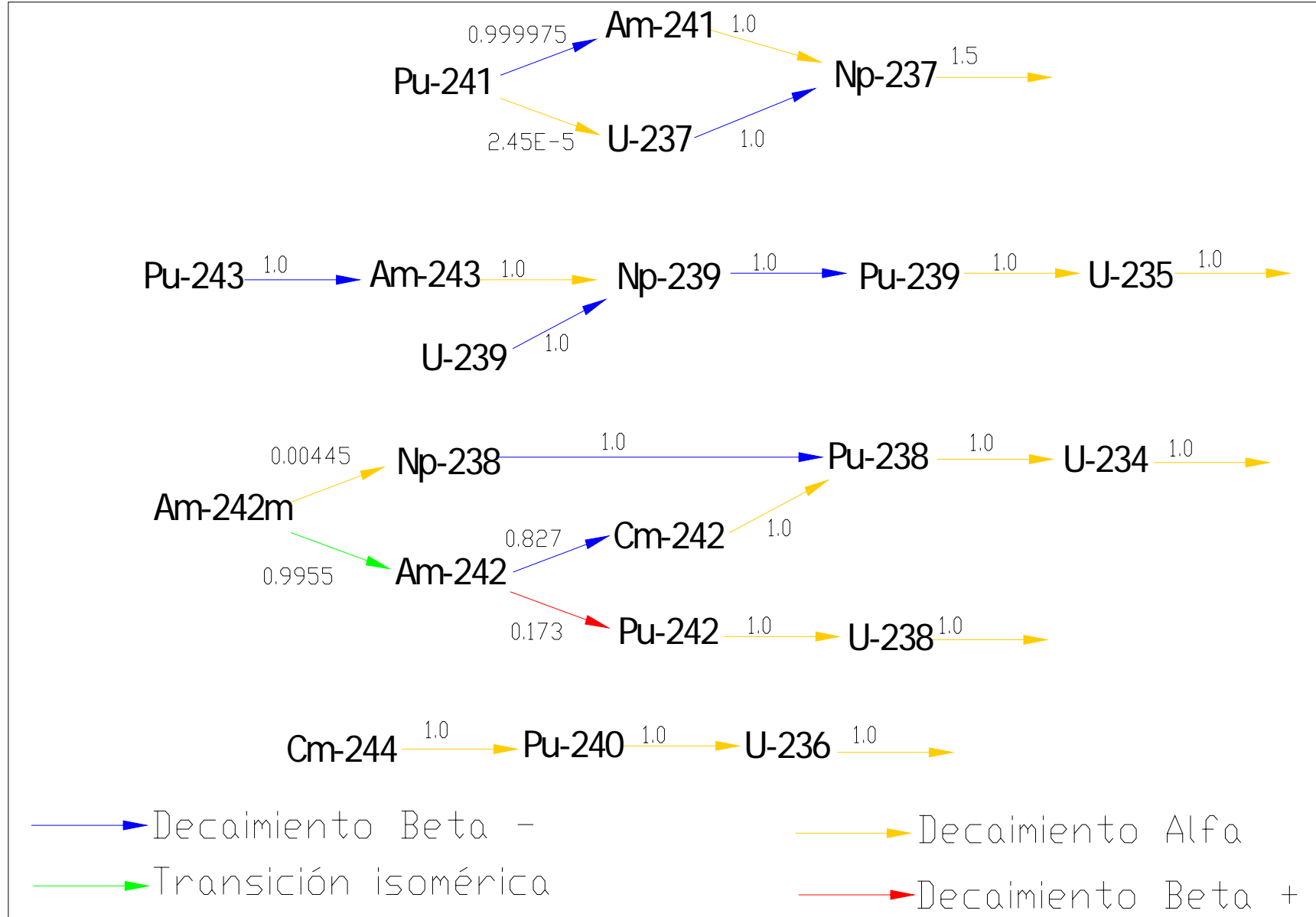


k_{inf}



Quemado (MWD/kgU)

Cálculo del decaimiento del combustible gastado



Nuclido	M_i	m_i (kg)	w_i/o (combustible)	w_i/o (respecto al nuclido)
Uranio(92)	234	0.0157	0.0017	0.0017
	235	5.2807	0.5790	0.5852
	236	5.0241	0.5508	0.5567
	238	892.1000	97.8106	98.8564
		902.4205	98.9422	100.00
Plutonio(94)	238	0.2524	0.0277	2.6159
	239	4.9046	0.5377	50.8347
	240	2.5697	0.2817	26.6345
	241	1.0914	0.1197	11.3124
	242	0.8300	0.0910	8.6025
		9.6481	1.0578	100.00
		912.0686	100.00	

Modelo Económico

- ✦ Se utilizó el método del valor presente continuo

$$PVF_c = \lim_{n \rightarrow \infty} P \left(1 + \frac{i}{n} \right)^{jn} = e^{ij}$$

- Costo del combustible antes de operación del reactor
 - Costo del combustible después de operación del reactor
 - Energía continua generada
-
- Energía generada por el combustible nuevo
 - Energía generada por el combustible MOX

Modelo Económico (Cont.)

Parámetros del reactor de agua en ebullición (BWR/5)

Potencia térmica (MWt)	2027
Eficiencia eléctrica	34%
Factor de capacidad	82%
Quemado (MWD/TMU)	48,000
Tasa de descuento (R)	12%
Tasa de descuento (r)	9%

Costos asociados al ciclo de equilibrio

✦ Se evaluaron los siguientes escenarios

- Disposición directa
- Reprocesamiento de uranio y plutonio
- Reprocesamiento y Reciclado de plutonio

✦ Tanto el front-end como la irradiación del combustible son comunes a los 3 escenarios

Etapa	Actividad	Costo Unitario (US\$/kg)	Tiempo (años)
Front-end	Minería	0	-2
	Conversión	70	-1.42
	Enriquecimiento	100	-0.75
	Fabricación de ensambles	250	-0.33
Irradiación	Tiempo de residencia del combustible	0	0 - 6

Escenario de disposición directa

Actividad	Costo Unitario (US\$/kg)	Tiempo (años)
Transporte a almacenamiento	100	12
Encapsulamiento y disposición final	1000	12

Reprocesamiento de uranio y plutonio

Actividad	Costo Unitario (US\$/kg)	Tiempo (años)
Transporte de combustible gastado a Europa	200	11
Reprocesamiento de combustible gastado	1200	12
Transporte de combustible gastado a almacenamiento	100	12
Encapsulamiento y disposición final	1000	12
Crédito de plutonio	5000	13
Crédito de uranio	según el w/o U235	13

Reprocesamiento y reciclado de plutonio

Actividad	Costo Unitario (US\$/kg)	Tiempo (años)
Transporte de combustible gastado a Europa	200	11
Reprocesamiento de combustible gastado	1200	12
Fabricación de MOX	1500	14
Transporte de combustible gastado a almacenamiento	100	25
Encapsulamiento y disposición final	1000	60
Crédito de uranio	según el w/o U235	13

Costos nivelados del combustible

Ciclo de equilibrio de 18 meses					
	Disposición Directa	Reprocesamiento de Uranio y Plutonio	Reprocesamiento y Reciclado de Plutonio con Uranio Reprocesado	Reprocesamiento y Reciclado de Plutonio con Uranio Natural	Reprocesamiento y Reciclado de Plutonio con Uranio de colas
Costo (mills/kWh)	6.7593	7.1026	7.0993	7.0966	7.0994
Cociente	1	1.05	1.05	1.0498	1.05
Ciclo de equilibrio de 24 meses					
	Disposición Directa	Reprocesamiento de Uranio y Plutonio	Reprocesamiento y Reciclado de Plutonio con Uranio Reprocesado	Reprocesamiento y Reciclado de Plutonio con Uranio Natural	Reprocesamiento y Reciclado de Plutonio con Uranio de colas
Costo (mills/kWh)	7.2250	7.5666	7.5503	7.5462	7.5506
Cociente	1	1.047	1.045	1.044	1.045

COSTO UNITARIO DEL COMBUSTIBLE POR ESCENARIO en (mills/kWh)

Escenario	base	pert. 1	pert. 2	pert. 3	pert. 4	pert. 5	pert. 6	pert. 7
DD	6.759	6.759	6.759	6.759	6.759	6.759	6.759	6.759
R	7.103	6.875	6.761	6.555	7.103	7.103	6.978	6.750
R1	7.099	6.875	6.763	6.562	7.068	7.036	6.977	6.753
R2	7.097	6.873	6.761	6.56	7.061	7.026	6.974	6.751
R3	7.099	6.875	6.763	6.562	7.068	7.036	6.977	6.753

DD=DISPOSICIÓN DIRECTA

R= REPROCESAMIENTO DE U Y Pu

R1= REPROCESAMIENTO Y RECICLADO DE Pu CON U RECICLADO

R2= REPROCESAMIENTO Y RECICLADO DE Pu CON U NATURAL

R3= REPROCESAMIENTO Y RECICLADO DE Pu CON U DE COLAS

base SFRep = 1200, MOXFab = 1500, SFTTrtoEu = 200

pert. 1 SFRep = 1000

pert. 2 SFRep = 900

pert. 3 SFRep = 720 (OECD-94)

pert. 4 MOXFab = 1000

pert. 5 MOXFab = 500

pert. 6 SFTTrtoEu = 100

pert. 7 SFRep = 1000, SFTTrtoEu = 100

Conclusiones

- La opción de reprocesamiento y reciclado puede ser competitiva con la disposición directa
- El proceso más sensible en el costo es el reprocesamiento
- Un avance en la tecnología y un alto factor de escala industrial
- La energía nuclear podrá ser considerada una fuente de energía sostenible sólo utilizando el ciclo cerrado