

# CRITERIO PROBABILÍSTICO DE EVALUACIÓN ECONÓMICA DE REACTORES

juanico l.e.<sup>1</sup>, florido p.c.<sup>2</sup> and bergallo j.e.<sup>3</sup>  
Comisión Nacional de Energía Atómica

## **Resumen**

Se presenta un modelo para la evaluación económica de proyectos de reactores nucleares basado en criterios probabilísticos, que se evalúan vía el método de MonteCarlo. Los resultados probabilísticos muestran un amplio espectro de resultados posibles debido a la alta complejidad de estos proyectos, la cual se magnifica con el incremento de la tasa de descuento utilizada, y por lo tanto vuelve más importante este efecto en países en desarrollo.

## **PROBABILISTIC CRITERION FOR THE ECONOMICAL ASSESSMENT OF NUCLEAR REACTORS**

In this paper a MonteCarlo probabilistic model for the economic evaluation of nuclear power plants is presented. The probabilistic results have shown a wide spread on the economic performance due to the schedule complexity and coupling of tasks. This spread increasing to the discount rate, and hence, it becomes more important for developing countries.

## **Introducción**

Si observamos las líneas tecnológicas de reactores nucleares conocidas, veremos que actualmente se encuentran disponibles sólo plantas de gran tamaño. Sin embargo, éstas fueron diseñadas siguiendo criterios de optimización económica por escaleo, y fueron muchas veces construidas en series, dentro de países desarrollados con grandes economías y políticas regulatorias y nacionales estables. Por otra parte, los países en desarrollo a menudo exhiben mayores riesgos derivados de inestabilidad política, sumado a los sobrecostos apreciables asociados a la primera planta nuclear [1], todo lo cual se traduce en mayores riesgos financieros.

La herramienta clásica de evaluación económica es el estudio del “caso mejor estimado” junto con el análisis de sensibilidad de éste, es decir, considerar las variaciones parciales de los principales parámetros a partir de este punto. Sin embargo, este análisis no refleja los acoplamientos y realimentaciones que se suceden dentro de un proyecto complejo, como tal es el caso de la construcción de un reactor nuclear. El modelo presentado en este trabajo trata con este problema, utilizando un enfoque probabilístico vía Montecarlo; para esto se han considerado los factores de riesgo usando funciones de densidad de probabilidad sobre los tiempos de ejecución de cada tarea, e incluyendo penalidades por las demoras en su ejecución.

Este modelo probabilístico fue aplicado a la evaluación de plantas de gas en trabajos anteriores [2], mostrando que las incertezas probabilísticas son poco relevantes en este tipo de proyectos, y demostrando la validez del enfoque clásico en estos casos.

---

<sup>1</sup> juanico@cab.cnea.gov.ar

<sup>2</sup> florido@cab.cnea.gov.ar

<sup>3</sup> bergallo@cab.cnea.gov.ar

En oposición, en este trabajo se presenta el resultado del enfoque probabilístico desarrollado para un proyecto de construcción y operación de un reactor tipo CANDU 6, mostrando importantes discrepancias con respecto al enfoque determinístico clásico.

### **Modelo probabilístico**

El proyecto fue considerado desde el punto de vista de un país comprador de un reactor CANDU-6 “llave en mano” [3]. Aún en este caso, hay muchos factores que son dependientes del comprador que serán modelados con sus incertezas, y que agruparemos en dos categorías:

- Marco regulatorio.
- Costos del propietario, conocidos en la jerga como “owner costs”.

El marco regulatorio es una función indelegable del país comprador, y es una fuente potencial de demoras en la ejecución del proyecto. Lo hemos representado por las siguientes tareas dentro del proyecto: el comisionado de los sistemas convencionales, auxiliares y nucleares junto con la aprobación de los informes de seguridad preliminar y final.

Los costos del propietario involucran (y fueron considerados) tanto a los trabajos preliminares (estudio de factibilidad y “siting”, proceso de firma del contrato) como a los trabajos internos (construcción de infraestructura para el transporte de grandes equipos y permisos de construcción).

Cada tarea del proyecto ha sido modelada estocásticamente, representándose su duración por medio de funciones normales de densidad de probabilidad (definidas por su valor medio, desviación estándar y un valor mínimo) y considerando penalidades económicas por demoras en su ejecución sobre las tareas principales (obra civil, obra mecánica y obra eléctrica junto con instrumentación y control) debidas exclusivamente a razones financieras, y/o causadas por el comprador.

En la tabla 1 se listan las tareas consideradas usualmente en un proyecto de construcción de un CANDU 6 [4], junto con los parámetros probabilísticos considerados en este trabajo (la media y la desviación estándar, que definen las funciones de probabilidad normal utilizadas). Los tiempos de comienzo y finalización de cada tarea mostrados allí han sido calculados considerando la duración más probable de cada tarea. Esta tabla, junto con la tabla 2 donde se listan los parámetros globales de la planta, sirven para definir el flujo de fondos del proyecto; los items señalados con \* son los que tienen asociados penalidades según la demora en su finalización, calculadas como un porcentaje del costo total de la tarea multiplicada por los meses de demora. Todos los valores incluidos en estas tablas surgen de nuestra propia estimación, aunque en concordancia con las reglas generales presentadas en [4].

### **Resultados**

Se desarrolló un código computacional para estudiar el resultado probabilístico a través de la técnica de Montecarlo, corriendo 10,000 veces cada caso para obtener una buena descripción estadística (como se verificó). El desempeño del proyecto fue considerado en todos los casos sobre la base del costo nivelado de la energía para el ciclo completo de construcción y generación del reactor, con una tasa de descuento dada, como es usual en la teoría de evaluación de proyectos.

Evaluamos primero la contribución parcial de las principales tareas (obra civil, mecánica y eléctrica) sobre el desempeño general del proyecto, considerando la función

de probabilidad alternativamente en una sola de ellas. Esta evaluación puede ser considerada en cierto modo, análoga a la realizada en un estudio de sensibilidad, habitual en evaluaciones económicas de carácter determinístico, pero no obstante se diferencia de ésta por ser probabilística. Obtenemos así los márgenes probabilísticos – para un intervalo de confianza dado – sobre el costo nivelado, ilustrado en la Tabla 3.

También se modelaron y evaluaron parcialmente los riesgos asociados a los “owner costs” (costos del propietario) y a los aspectos regulatorios por separado, y conjuntamente. En este último caso se observan los efectos acoplados de ambas tareas, siendo la dispersión conjunta menor a la suma de los dos casos por separado. Este resultado es por lógica el esperado, pero el cálculo de la probabilidad conjunta no es sencillo dado que pueden surgir cambios en el camino crítico de ejecución del proyecto; se evidencia entonces la conveniencia del método de Montecarlo dado que permite modelar naturalmente este tipo de comportamientos (mucho más complejos aún en el caso completo), sin realizar hipótesis a priori.

Las figuras 1 y 2 muestran la probabilidad acumulada de casos estadísticos en función de la dispersión sobre el costo nivelado calculado determinísticamente para el “caso mejor estimado” para todos los casos parciales antes mencionados junto con el caso completo (donde se incluyen las funciones de probabilidad sobre todas las tareas), para dos tasas de descuento anuales distintas. Se observa de ellas una gran diferencia del resultado probabilístico frente al determinístico; éste último arroja valores conservativos solamente en el 10% de los casos estadísticos, y requiriendo un intervalo de confianza del 95% deben aceptarse márgenes de fluctuación estadística de hasta 10 mills/kwh (10% tasa descuento) y 25 mills/kwh (15% tasa descuento) respectivamente. En la tabla 3 se condensan estos resultados para un intervalo de confianza (i.c.) del 50% y 95%.

Es interesante también la comparación entre el tiempo total de construcción obtenido con el modelo por muestreo estadístico (figura 3) y la serie real de reactores CANDU-6 o similares instalados en el mundo que se aprecia en la figura 4 [5]. Esta comparación muestra una distribución de probabilidad tipo normal en ambos casos, y una dispersión mayor en el caso real ( $\bar{X} = 86$  meses,  $\sigma = 21$  meses,  $X_{\min}=55$  meses) que la que arroja el modelo presentado ( $\bar{X} = 71.8 \pm 0.3$  meses,  $X_{\min}=49.0$  meses, y 49-86.0 meses para el 95% probab.acumulada). Esto sugiere que los parámetros probabilísticos de entrada considerados pueden ser razonables desde el punto de vista de un caso de estudio genérico.

## **Conclusiones**

Se desarrolló un modelo simple probabilístico para la evaluación económica de proyectos de construcción de reactores nucleares. El estudio, aplicado a reactores CANDU-6, muestra escenarios posibles con diferencias notorias respecto del estudio clásico, originados en los factores de riesgo modelados. Para cubrir por ejemplo, un intervalo de confianza del 95% de los casos, es necesario aceptar posibles sobrecostos muy importantes.

La dispersión de los resultados, y la discrepancia de los mismos frente al estudio clásico (utilizando el “caso mejor estimado”), se observó que se incrementa muy fuertemente ligada al aumento de la tasa de descuento. Este comportamiento tiene implicancias severas sobre todo en los países en vías de desarrollo, donde la tasa de descuento y los factores de riesgo se incrementan paralelamente.

El enfoque probabilístico seguido, vía Montecarlo, se muestra como la herramienta adecuada (por su simpleza) para modelar el impacto de riesgos en proyectos altamente complejos con tareas muy acopladas, tales como los de reactores nucleares. El método

clásico de evaluación económica de proyectos en cambio, no permite considerar los efectos de riesgos acoplados que podrían por ejemplo cambiar el camino crítico del cronograma de ejecución.

Por último, cabe notar que la generación actual de plantas nucleares enormes se han construido como una solución económica válida para pocos países desarrollados, en los cuales sus tiempos de construcción y costos mayores pueden ser sostenidos minimizando los factores de riesgo y con tasas de descuento bajas. Si la próxima generación de reactores pequeños y modulares será diseñada para el mercado de los países en desarrollo, deberían considerarse tanto en el diseño como en la evaluación de ellos los factores de riesgo potenciales, más bien que en adoptar la modularidad considerando solamente aspectos relativos al lay-out de la planta [6].

## **Referencias**

- [1] Csik, The Challenge of Financing Nuclear Power Plants, IAEA-SM-353/9, Seoul, 1998.
- [2] Juanicó, L., Florido P. and Bergallo J, 2000. Probabilistic Economic Evaluation of Nuclear and Gas Options in Countries with Small Electricity Grids. Presentado en la 3<sup>rd</sup> Int. Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, IAEA, June 19-22, 2000, Dubrovnik, Croatia.
- [3] Nuclear News, December 1997.
- [4] Kakaria B. and S. Azeez, 1989. Advanced CANDU Designs. The 8<sup>th</sup> Pacific Basin Nuclear Conference.
- [5] IAEA, 1997. Nuclear power reactors in the world, reference data series No.2. Ed. IAEA en Austria, April 1997.
- [6] Lapp, C. and Golay, M., 1997. Modular design and construction techniques for nuclear power plants. Nuclear Engineering and Design, v. 172, pp. 327-349.

## Apéndice de Tablas

<b>Tareas</b>	<b>de</b>	<b>hasta</b>	$\bar{X}$	$\sigma$	<b>Xmin</b>
1. Factibilidad + Siting	0	12	12	4	9
2. Firma contrato	12	15	3	1	1
3. Permisos de construcción	15	18	3	2	1
4. Informe Preliminar de Seguridad	15	19	4	3	2
5. Owner Costs	15	51	36	12	30
6. Obra civil (hasta 60%)	18	32	14	4	12
7. Obra civil (hasta 100%)	32	44	12	10	10
8. Ingeniería básica completa	19	20	1	---	1
9. Ingeniería de detalle (up 25%)	20	23	3	1	2
10. Ingeniería de detalle (up 50%)	23	27	4	1	3
11. Ingeniería de detalle (up 75%)	27	32	5	2	3
12. Ingeniería de detalle (100%)	32	38	6	2	4
13. Obra mecánica (up 25%)	32	38	6	2	4
14. Obra mecánica (up 50%)	38	46	8	3	7
15. Obra mecánica (up 75%)	46	56	10	4	7
16. Obra mecánica (100%)	61	69	8	4	8
17. Construcción del RPV	20	60	40	6	36
18. Transporte del RPV a obra	60	61	1	---	1
19. Obra Eléctrica + I&C (up 22%)	38	42	4	2	3
20. Obra Eléctrica + I&C (up 66%)	46	54	8	3	7
21. Obra Eléctrica + I&C (100%)	56	72	16	6	14
22. Comisionado de Sist. Aux. (up 55%)	46	54	8	2	7
23. Comisionado de Sist. Aux. (100%)	54	66	12	4	10
24. Comisionado de Sist. Convenc.	72	74	2	1	1.5
25. Autorización de carga primer núcleo	74	75	1	3	0.5
26. Comisionado de Sist. Nucleares	75	77	2	2	1.5
27. Informe Final de Seguridad	38	50	12	5	9
28. Autorización de arranque nuclear	77	79	2	6	1

Tabla 1. Cronograma de construcción estimado para reactores CANDU 6 y sus parámetros probabilísticos (valores en meses).

<b>Item</b>	<b>Inversión (USD/kW)</b>
Factibilidad + Siting	15
Firma del contrato	75
Permisos de construcción	0.7
Informe preliminar de Seguridad	0.7
Owner Costs	164
Ingeniería Básica *	15
Ingeniería Detalle *	105
Construcción del RPV	37
Transporte del RPV a obra	1.5
Comisionado Sistemas Auxiliares	15
Comisionado Sistemas Convencionales	1.5
Autorización carga primar núcleo	---
Comisionado de sistemas nucleares	3
Informe Final de Seguridad	45
Autorización arranque nuclear	---
Obra civil *	560
Obra mecánica *	635
Obra eléctrica +I&C *	284
Costo total anual de O&M	67
<b>Potencia eléctrica neta</b>	<b>670 MW</b>
<b>Factor de carga</b>	<b>85%</b>
<b>Operation Life</b>	<b>40 year</b>

Tabla 2. Costos desagregados por tareas y parámetros globales de la planta.

<b>Δ Costo Nivelado (mills/kWh)</b>	<b>10%</b>		<b>15%</b>	
	<b>50% i.c.</b>	<b>95% i.c.</b>	<b>50% i.c.</b>	<b>95% i.c.</b>
Caso completo	2.7	6.9	6.9	17.5
Obra civil	0.1	2.3	0.3	5.9
Obra mecánica	0.5	2.2	1.2	5.5
Obra eléctrica + I&C	0.2	3.1	0.5	7.7
Costos internos&Marco Regulatorio	1.0	4.4	2.4	10.9
<b>Costo Nivelado “mejor estimado”</b>	<b>44.3 mills/kWh</b>		<b>68.3 mills/kWh</b>	

Tabla 3. Resumen de resultados dispersiones probabilísticas del costo nivelado.

**Apéndice de Figuras**

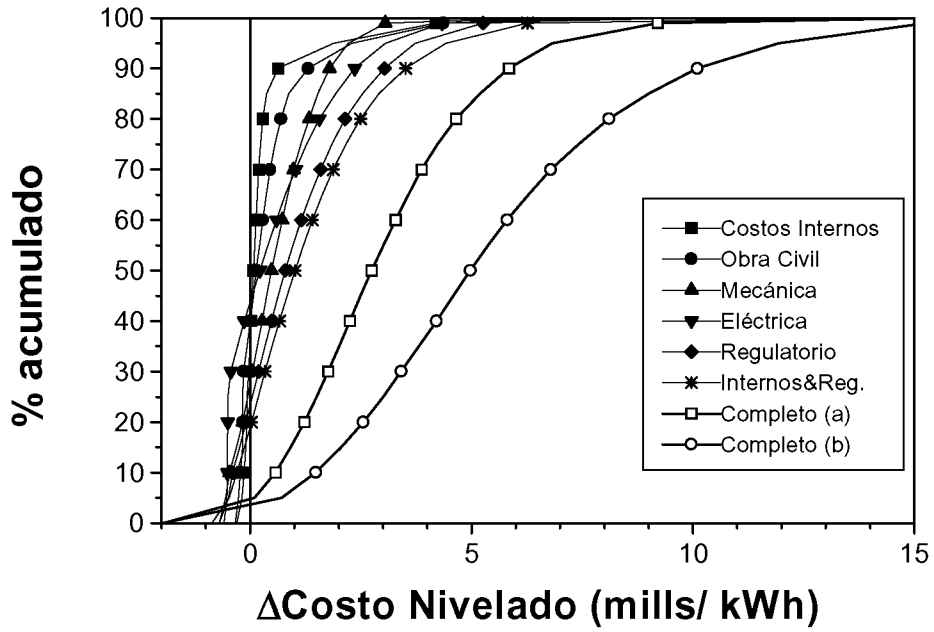


Figura 1. Dispersión en costo nivelado con(b) y sin penalidades(a) (d=10%).

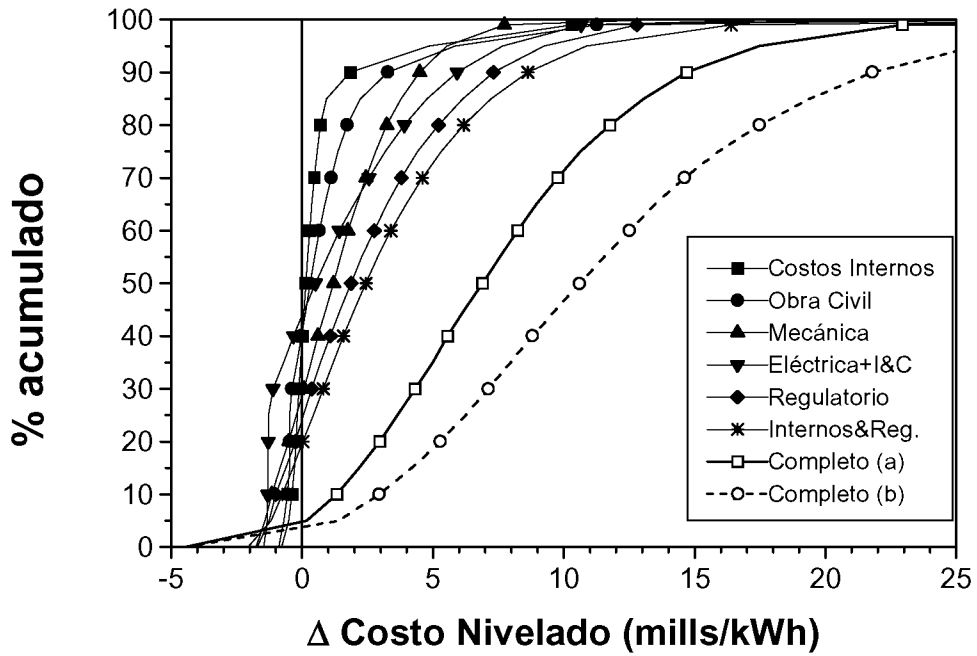


Figura 2. Dispersión en costo nivelado con (b) y sin (a) penalidades (d=15%).

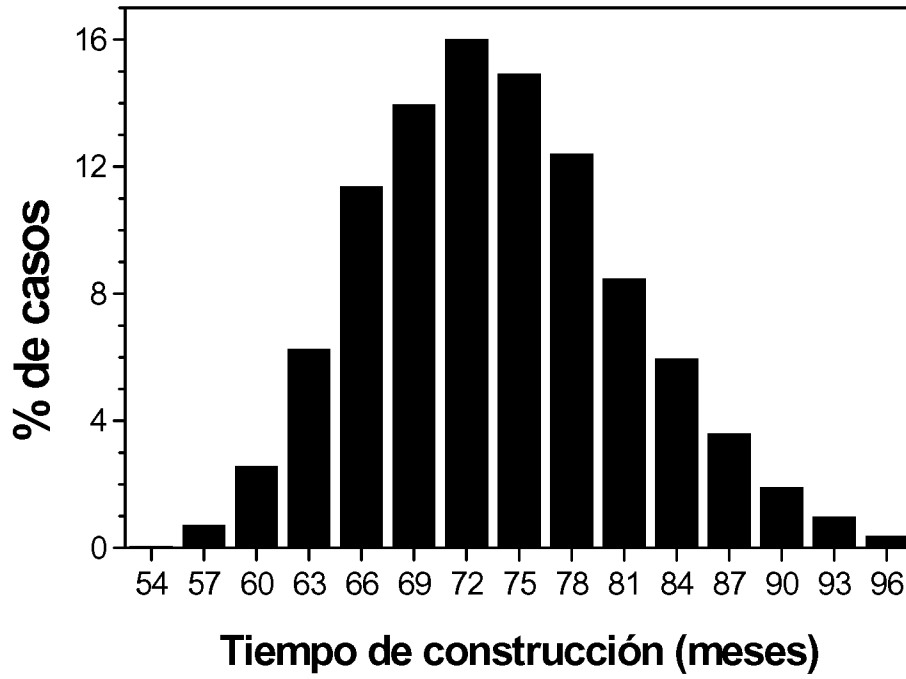


Figura 3. Histograma del tiempo de construcción de un CANDU-6 según el modelo.

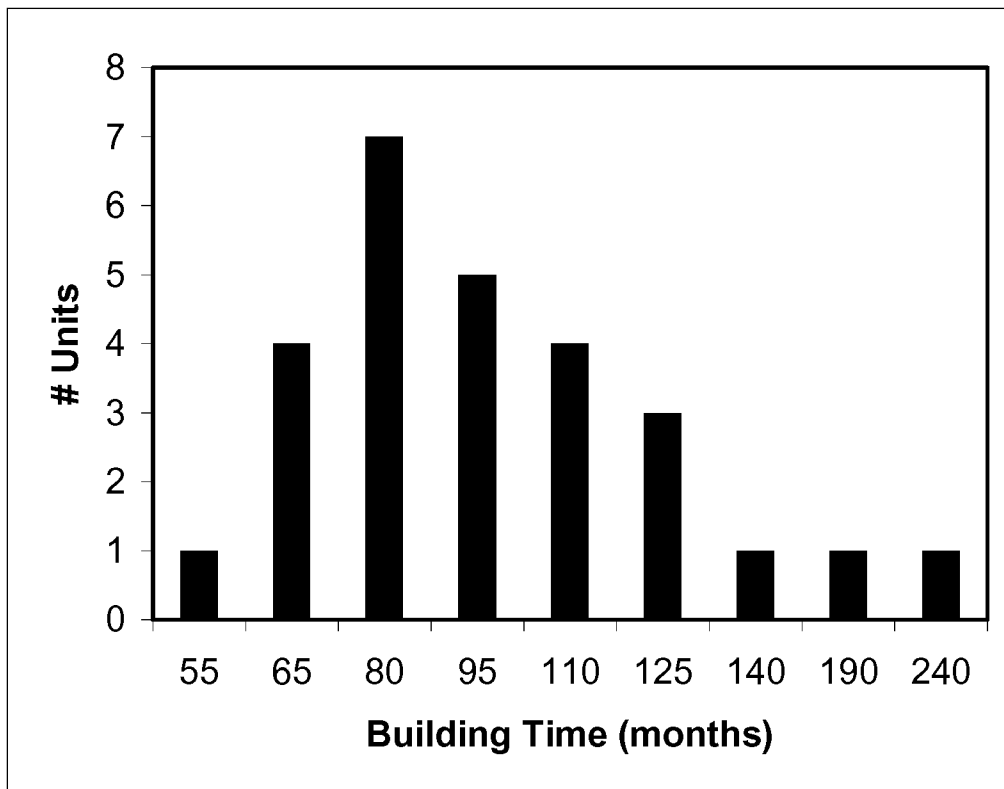


Figura 4. Histograma del tiempo de construcción de la serie CANDU-6 o similar.