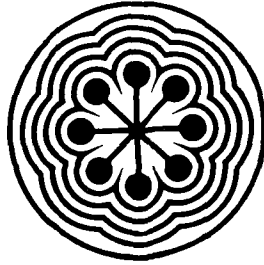




MX0700330

1831  
R4 5-1

**instituto nacional de investigaciones nucleares**





**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES  
GERENCIA DE SISTEMAS NUCLEARES  
DEPARTAMENTO DE FISICA DE REACTORES**

IT.SN/DFR-193

**ASISTENCIA TECNICA EN RELACION CON EL  
ANALISIS DE RECARGAS DE LA CNLV U-2**

ORDEN DE SERVICIO UNO. CONVENIO ININ/CFE

***RESUMEN EJECUTIVO***

*GUSTAVO ALONSO VARGAS  
MARIO CASTRO BERISTAIN  
ROBERTO GALLEGOS ESCOBAR  
HECTOR HERNANDEZ LOPEZ  
JOSE LUIS MONTES TADEO  
JUAN JOSE ORTIZ SERVIN  
RAUL PERUSQUIA DEL CUETO*

NOVIEMBRE DE 1993

## CONTENIDO

1.	OBJETIVO . . . . .	1
2.	CONDICIONES DEL ANALISIS . . . . .	1
3.	RESULTADOS . . . . .	4
4.	ANALISIS DE RESULTADOS . . . . .	9
5.	CONCLUSIONES . . . . .	12
6.	BIBLIOGRAFIA . . . . .	13

---

## RESUMEN EJECUTIVO

### 1. OBJETIVO.

Realizar un análisis comparativo de costos de generación de energía entre los diseños GE9B de General Electric, 9X9-IX de SIEMENS y SVEA-96 de ABB ATOM, propuestos para ser utilizados como combustible de recarga en la Unidad 2 de la Central Nuclear de Laguna Verde.

### 2. CONDICIONES DEL ANALISIS.

Los diseños de los combustibles de recarga considerados son los siguientes:

- |   |        |                             |
|---|--------|-----------------------------|
| * | GE9B   | Proveedor General Electric. |
| * | 9x9-IX | Proveedor Siemens.          |
| * | SVEA96 | Proveedor ABB Atom.         |

El primero es un arreglo de 8x8 barras con un canal central de agua de sección circular que ocupa el espacio de 4 barras de combustible. El segundo es un combustible de diseño avanzado, en un arreglo de 9x9 barras con un canal central de agua de sección cuadrada que ocupa el lugar de 9 barras de combustible. El último, también de diseño avanzado, es un arreglo de 10x10 barras dividido en 4 subensambles por una cruz de agua, en cuya parte central se tiene un canal de agua de sección en forma de rombo.

Al aumentar el número de barras por ensamble, la generación lineal de calor por barra disminuye, mejorando con ello los márgenes de seguridad. Por otra parte, el diseño más avanzado con respecto al canal de agua corresponde al combustible SVEA96, toda vez que el propósito del canal de agua es mejorar el quemado del combustible, es decir, que éste se queme de manera más uniforme, con lo que se consigue de manera global un mejor desempeño a lo largo de su quemado.

Para este estudio económico se tomaron los primeros diez ciclos de operación de la Unidad 2 de la CNLV, bajo las siguientes consideraciones:

**Primera carga:**

- \* Carga inicial de la Unidad 2 idéntica a la primera carga de la Unidad 1 de la CNLV.
- \* Quemado durante el ciclo, de 10,070 MWd/MT, sin extensión.
- \* Período de 60 días para el cambio del combustible.

**Recargas:**

- \* Patrones de recarga en base a información suministrada por los tres proveedores.
- \* Ciclos anuales sin extensión, con factor de capacidad de 70% (255.5 días equivalentes a plena potencia, 1931 MW).
- \* Períodos de 60 días para el cambio de combustible.

El Departamento de Gestión de Combustible de CFE solicitó de ABB Atom y SIEMENS, estudios de factibilidad del uso de sus diseños como combustibles de las primeras nueve recargas de la Unidad 2 de la CNLV. Con la información de estos estudios y la suministrada por General Electric, se generó en el ININ una serie de nueve patrones de recargas para cada diseño de combustible, bajo el plan y condiciones de operación especificados por CFE.

Los patrones de recargas generados, fueron simulados con los códigos del sistema FMS de Administración de Combustible, para verificar la viabilidad de las propuestas de los proveedores. En base a los resultados de la simulación fue preciso en algunos casos, si no en la mayoría, ajustar y aún modificar los patrones propuestos, con el fin de cumplir el plan de operaciones establecido y las condiciones de seguridad requeridas.

El uso del sistema FMS para simular la operación de la U-2 de la CNLV fue como sigue. Con los códigos ECLIPSE y RECORD se generaron los bancos de datos nucleares para los tres tipos de combustible y para diferentes condiciones. Estas actividades fueron efectuadas anteriormente, en otras asistencias técnicas desarrolladas para el DGC.

Por otra parte, la simulación de los patrones de recarga se efectuó bajo dos esquemas:

- \* Estudio de multiciclos 1-D, en base al código FCS-II de simulación estática en una dimensión.
- \* Estudio de multiciclos 3-D, en base al código PRESTO de simulación estática en tres dimensiones.

Aunque tradicionalmente los cálculos de multiciclos se realizan con códigos de rápida ejecución como es el caso de FCS-II, en el presente estudio se realizó en paralelo un análisis de multiciclos tridimensional con el fin de efectuar una comparación entre los resultados en una y tres dimensiones.

Para la evaluación de los tres diseños de combustible se calcularon los siguientes costos:

- \* Costos de pre-irradiación.
- \* Costos de post-irradiación.
- \* Costos totales de generación de energía (pre+post).

En la evaluación de los costos de pre-irradiación se incluyeron los siguientes conceptos del ciclo de combustible nuclear:

- \* Costo de uranio como UF<sub>6</sub>.
- \* Costo de enriquecimiento.
- \* Costo de fabricación.

Los costos unitarios de estos conceptos se tomaron de la base de datos del programa FCPCM-B.

Para la evaluación de los costos de post-irradiación se incluyeron los siguientes conceptos:

- \* Costo del almacenamiento temporal del combustible irradiado.
- \* Costo del almacenamiento definitivo del combustible irradiado.

Los pagos por concepto de pre-irradiación se realizan antes de la fecha de inicio de operación, con la siguiente anticipación:

- \* 510 días, para el uranio en forma de UF<sub>6</sub>.
- \* 270 días, para el enriquecimiento del uranio.
- \* 120 días, para la fabricación del combustible.

El valor del dinero es el mismo para las primeras nueve recargas y corresponde al 1° de Julio de 1993, fecha de referencia para los cálculos a valor presente.

Finalmente, la simulación con el sistema FMS requirió tomar en consideración lo siguiente:

- 1º. Los tres proveedores indicaron la fracción de recarga de combustible nuevo de los ciclos 2 al 10, pero ninguno proporcionó específicamente los patrones de recarga. Estos tuvieron que ser determinados en base a la información suministrada en cada caso:
- a) General Electric sólo proporcionó los patrones de recarga del ciclo 2 al ciclo 6.
  - b) Siemens suministró los esquemas de quemado de los ciclos 2 al 10.
  - c) ABB-Atom únicamente dio guías de los patrones de recarga del ciclo 7 en adelante.

Por lo anterior, para obtener los patrones de recarga se desarrolló el programa auxiliar RECARGAS. Por otra parte se generó el programa OLLIN, el cual analiza de manera gráfica los resultados de PRESTO.

- 2º. El análisis económico se efectuó en una y tres dimensiones, en base a las recargas (número de combustibles) propuestas por los proveedores. Sin embargo, cabe hacer notar que al hacer el estudio con PRESTO en 3-D, la propuesta de SIEMENS no se ajusta a los requerimientos de energía. Por ello sería conveniente efectuar un análisis económico tanto en tres como en una dimensión, con las recargas que sí los cumplen.

El análisis en 3-D demostró que es necesario aumentar el número de combustibles de recarga en algunos de los ciclos, de manera que se requieran más combustibles de los propuestos.

### 3. RESULTADOS.

Las Tablas siguientes muestran los resultados del programa FCPCM-B para los tres diseños de combustible: GE9B, SIEMENS 9X9-IX y SVEA96.

**TABLA 1**  
**COSTOS (mills/kWh) DE LA ETAPA DE PRE-IRRADIACION**

Ciclo	GE-1D	GE-3D	SIE-1D	SIE-3D	ABB-1D	ABB-3D
1	4.84	4.92	4.21	4.23	4.77	5.21
2	4.10	4.47	4.23	4.31	4.40	4.22
3	4.21	4.27	4.03	4.10	4.30	4.17
4	4.19	4.34	4.45	4.16	4.12	4.13
5	3.94	4.30	3.95	4.18	4.08	4.11
6	3.93	4.26	4.28	4.03	4.06	4.11
7	3.97	4.30	4.47	4.02	4.07	4.08
8	3.94	4.27	4.15	4.04	4.27	4.08
9	3.94	4.27	4.16	4.02	4.01	4.06
10	3.94	4.27	3.91	4.02	4.01	4.07



**TABLA 2**  
**COSTOS (mills/kWh) DE LA ETAPA DE POST-IRRADIACION**

Ciclo	GE-1D	GE-3D	SIE-1D	SIE-3D	ABB-1D	ABB-3D
1	3.47	3.53	2.93	2.94	3.32	3.63
2	2.00	1.99	1.60	1.36	1.65	1.61
3	2.03	1.92	1.49	1.47	1.62	1.57
4	1.97	1.90	1.69	1.58	1.59	1.55
5	1.97	1.92	1.48	1.58	1.53	1.53
6	1.83	1.82	1.59	1.50	1.52	1.54
7	1.84	1.84	1.66	1.51	1.52	1.52
8	1.82	1.82	1.52	1.51	1.50	1.52
9	1.82	1.82	1.60	1.51	1.50	1.51
10	1.82	1.82	1.45	1.50	1.50	1.52

**TABLA 3**  
**COSTOS TOTALES (mills/kWh) DE GENERACION DE ENERGIA**

Ciclo	GE-1D	GE-3D	SIE-1D	SIE-3D	ABB-1D	ABB-3D
1	8.31	8.46	7.15	7.18	8.10	8.85
2	6.11	6.46	5.84	5.67	6.06	5.84
3	6.24	6.20	5.53	5.57	5.92	5.74
4	6.17	6.24	6.15	5.75	5.72	5.68
5	5.91	6.22	5.43	5.76	5.61	5.64
6	5.76	6.08	5.88	5.54	5.59	5.65
7	5.81	6.14	6.14	5.53	5.59	5.60
8	5.77	6.10	5.67	5.55	5.77	5.61
9	5.77	6.10	5.76	5.53	5.52	5.58
10	5.77	6.10	5.36	5.52	5.51	5.59

**TABLA 4**  
**FRACCION DE RECARGAS Y ENRIQUECIMIENTOS EN % U235**  
**PROPUESTOS POR EL PROVEEDOR**

Ciclo	FRACCION DE RECARGA					ENRIQUECIMIENTO (U235%)		
	TIPO DE COMBUSTIBLE			DIFERENCIA RESPECTO A GE9B				
	GE9B	SIE	ABB	SIE	ABB	GE9B	ABB	SIE
1	444	444	444	0	0	1.87	1.87	1.87
2	92	72	76	20	16	2.908	3.261	3.26
3	100	76	76	24	24	2.871	3.261	3.26
4	80	72	68	8	12	2.89	3.261	3.26
5	76	64	64	12	12	2.87	3.261	3.26
6	76	60	64	16	12	2.98	3.261	3.26
7	80	64	64	16	16	2.983	3.261	3.26
8	76	64	68	12	8	2.98	3.261	3.26
9	76	64	64	12	12	2.98	3.261	3.26
10	76	64	64	12	12	2.98	3.261	3.26
TOTAL DIFERENCIAS:				132	124			

## 4. ANALISIS DE RESULTADOS.

### 4.1. Estudio en tres dimensiones.

#### Pre-irradiación.

El costo de pre-irradiación para la carga inicial de combustible resulta más alto para el combustible SVEA96, aun cuando no se hayan insertado ensambles de ese tipo en el ciclo uno. Esto se debe a que el quemado final de descarga de los combustibles del ciclo 1 depende de la carga de los ciclos posteriores, modificando con ello el costo del primer ciclo.

El costo intermedio para esta etapa corresponde al esquema de operación con el diseño GE9B para el ciclo inicial, mientras que el menor costo de generación de energía del ciclo corresponde al combustible SIEMENS 9X9-IX.

En promedio, considerando los primeros diez ciclos de operación, los costos para los tres proveedores de combustible para esta etapa son los siguientes:

PROVEEDOR	COSTO PROMEDIO (mills/kWh)
SIEMENS	4.12
ABB-ATOM	4.23
GENERAL ELECTRIC	4.37

#### Post-irradiación.

El costo de generación de energía en esta etapa es mayor en cada una de las recargas analizadas para el combustible GE9B, excepto la carga inicial, en donde el combustible SVEA96 presenta el mayor costo.

Los promedios de costos de los primeros diez ciclos de operación, para los tres proveedores de combustible en esta etapa son los siguientes:

---

PROVEEDOR	COSTO PROMEDIO (mills/kWh)
SIEMENS	1.65
ABB-ATOM	1.75
GENERAL ELECTRIC	2.04

### Costo total.

El costo total de generación de energía, de acuerdo a la simulación del reactor en tres dimensiones y en base al escenario económico establecido, es menor en el caso en que se utiliza el diseño SIEMENS 9X9-IX. En promedio, se tienen los siguientes resultados para los costos unitarios totales:

PROVEEDOR	COSTO PROMEDIO (mills/kWh)
SIEMENS	5.76
ABB-ATOM	5.98
GENERAL ELECTRIC	6.42

### 4.2. Estudio en una dimensión.

#### Pre-irradiación.

Para esta etapa, el costo mayor de generación de energía para la carga inicial corresponde al esquema donde se utiliza el diseño GE9B.

En promedio, considerando los primeros diez ciclos de operación, los costos para los tres proveedores de combustible para esta etapa son los siguientes:

---

PROVEEDOR	COSTO PROMEDIO (mills/kWh)
SIEMENS	4.19
ABB-ATOM	4.21
GENERAL ELECTRIC	4.10

**Post-irradiación.**

El combustible de mayor costo en esta etapa es el GE9B, lo cual se debe principalmente al número superior de ensambles utilizado, con respecto a los diseños SIEMENS 9X9-IX y SVEA-96 (132 y 124, respectivamente).

Los promedios de costos de los primeros diez ciclos de operación, para los tres proveedores de combustible en esta etapa son los siguientes:

PROVEEDOR	COSTO PROMEDIO (mills/kWh)
SIEMENS	1.65
ABB-ATOM	1.75
GENERAL ELECTRIC	2.04

**Costo total.**

El costo total de generación de energía es menor, en promedio, para el esquema de operación de la CNLV U-2 que utiliza el diseño SIEMENS 9X9-IX:

PROVEEDOR	COSTO PROMEDIO (mills/kWh)
SIEMENS	5.90
ABB-ATOM	5.94
GENERAL ELECTRIC	6.17

### Comparación de resultados 3D vs 1D.

La tabla comparativa siguiente da el promedio de los cocientes de los costos 3D/1D para los tres tipos de combustible considerados:

PROVEEDOR	PRE-IRRADIACION 3D/1D	POST-IRRADIACION 3D/1D	COSTO TOTAL 3D/1D
GE	1.0669	0.989	1.0419
SIEMENS	0.9840	0.9654	0.9788
ABB-ATOM	1.0028	1.0062	1.0037

Se puede observar que los resultados de los estudios en una y tres dimensiones no difieren en más de 7%. Considerando que el estudio tridimensional consume más tiempo de cómputo, éste es recomendable cuando se requiere contar con mayor fiabilidad en los resultados. De no ser así, los resultados en una dimensión son aceptables.

### 5. CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos en el estudio, es posible concluir lo siguiente:

- El programa FCS-II posibilita el diseño de esquemas de recarga preliminares, a fin de estimar de manera rápida el costo de generación de energía de la central. Sin embargo, PRESTO permite una mejor simulación del comportamiento de los ensambles de combustible en forma individual. Desde luego, se requiere mayor tiempo de cómputo para los estudios en tres dimensiones, lo cual es preferible cuando es necesaria una mayor precisión en los resultados.
- La metodología de este estudio puede ser utilizada para realizar análisis de sensibilidad del costo de generación de energía de la CNLV.
- Aun cuando los costos del combustible SIEMENS resultan ser los más bajos, es necesario recalcar que éstos se obtuvieron en base a la propuesta del proveedor. Sería necesario obtener del mismo los patrones de recarga específicos de su propuesta y efectuar la simulación correspondiente para comprobar si cumplen con los requerimientos de energía. De no cumplirlos, convendría hacer el estudio

económico para las recargas modificadas de SIEMENS obtenidas en el estudio 3-D, que sí cumplen con los requerimientos de energía. En consecuencia, los costos aquí mencionados no pueden tomarse como base para la comparación económica definitiva.

- Las herramientas de cálculo auxiliares al sistema FMS desarrolladas en el ININ, RECARGAS y OLLIN, redundarán en un ahorro de tiempo para análisis posteriores.

## 6. BIBLIOGRAFIA.

Los resultados del análisis comparativo de recargas de la CNLV U-2 están documentados en los 80 reportes generados durante el desarrollo de la Orden de Servicio 1. Para un análisis de la información más relevante obtenida, así como de los documentos consultados para el estudio, véanse los siguientes informes:

1. FC#844R01. Cycle 2/Reload 1 Reference Fuel Cycle., S. M. Schreiber, November, 1990.
2. JLM-92:018,SPC. Siemens Power Corporation Proprietary; July, 1992.
3. Laguna Verde 3D Study. ABB-CFE Meeting. A. Jackson, B. Harris; June 1991.
4. IT.SN/DFR-167; "Reporte de resultados del programa PRESTO para C2 usando combustible GE9B"; 6F3/IV/CN0A8/93/R19; G. Alonso Vargas, J. L. Montes Tadeo, R. Perusquía del Cueto; Septiembre 1993.
5. IT.SN/DFR-168; "Reporte de resultados del programa PRESTO para C3 a C6 usando combustible GE9B"; 6F3/IV/CN0A8/93/R20; J. L. Montes Tadeo, R. Perusquía del Cueto, G. Alonso Vargas; Septiembre 1993.
6. IT.SN/DFR-169; "Reporte de resultados del programa PRESTO para C7 a C16 usando combustible GE9B"; 6F3/IV/CN0A8/93/R21; R. Perusquía del Cueto, G. Alonso Vargas, J. L. Montes Tadeo; Septiembre 1993.



7. IT.SN/DFR-161; "Reporte de resultados del programa PRESTO para C2 usando combustible SIEMENS 9X9-IX"; 6F3/IV/CN0A8/93/R13; R. Gallegos Escobar, J. L. Montes Tadeo; Agosto 1993.
8. IT.SN/DFR-162; "Reporte de resultados del programa PRESTO para C3 a C10 usando combustible SIEMENS 9X9-IX"; 6F3/IV/CN0A8/93/R14; R. Gallegos Escobar, J. L. Montes Tadeo; Agosto 1993.
9. IT.SN/DFR-163; "Reporte de resultados del programa PRESTO para C11 a C17 usando combustible SIEMENS 9X9-IX"; 6F3/IV/CN0A8/93/R15; R. Gallegos Escobar, J. L. Montes Tadeo, Agosto 1993.
10. IT.SN/DFR-136; "Reporte de resultados del programa PRESTO para C2 usando combustible SVEA96"; 6F3/IV/CN0A8/93/R7; J. J. Ortíz Servín, J. L. Montes Tadeo; Septiembre 1993.
11. IT.SN/DFR-139; "Reporte de resultados del programa PRESTO para C3 a C9 usando combustible SVEA96"; 6F3/IV/CN0A8/93/R8; J. J. Ortíz Servín, J. L. Montes Tadeo; Septiembre 1993.
12. IT.SN/DFR-141; "Reporte de resultados del programa PRESTO para C10 a C16 usando combustible SVEA96"; 6F3/IV/CN0A8/93/R9; J. J. Ortíz Servín, J. L. Montes Tadeo; Septiembre 1993.
13. IT.SN/DFR-151; "Reporte del análisis comparativo de los costos de energía de los diseños SVEA-96, SIEMENS 9X9-IX y GE-9B"; 6F3/IV/CN0A8/93/R25; J.L. Montes Tadeo, Septiembre de 1993.