

# Observatorio Ciudadano de la Energía

[www.energia.org.mx](http://www.energia.org.mx)

## Lámina 1. Presentación y crédito

Observatorio Ciudadano de la Energía

### Beneficios de la energía nucleoelectrica de la central Laguna Verde de la CFE

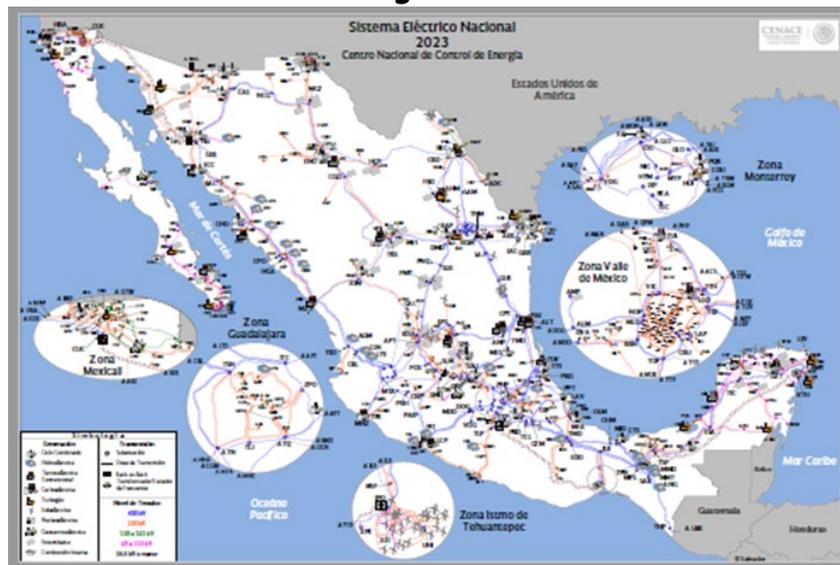
M. en Ing. Carlos Villanueva Moreno  
Consultor  
Jubilado de la CFE  
Jubilado de la UNAM

## Lámina 2. La central nucleoelectrica Laguna Verde de la CFE

La central Laguna Verde, que está ubicada en la región Oriental del Sistema Interconectado Nacional (SIN), cuenta con 2 reactores **BWR/5** suministrados por la empresa General Electric [1].

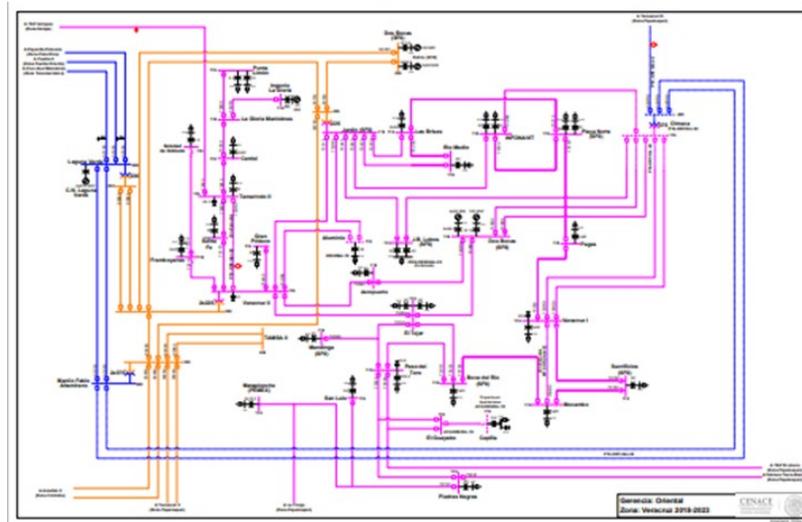
Cada uno tiene una potencia térmica de  $2,317 \text{ MW}_{\text{brutos}}$  y una potencia eléctrica de  $804 \text{ MW}_{\text{netos}}$ , los cuales desde su entrada en operación comercial han generado y entregado a la red nacional de transmisión (RNT) una media anual de  $11,240 \text{ GWh}$ , con un factor de planta medio conjunto de  $79.8 \%$  [2].

Figura 1



En la **Figura 1** se muestra el diagrama de la RNT y en la **Figura 2** se muestra el diagrama unifilar de la Zona Veracruz de la región Oriental, donde la central Laguna Verde se interconecta a la RNT con 5 líneas de transmisión en alta tensión de 400 kV [3].

**Figura 2**



En la **Figura 3** se muestra la disposición de los edificios de que consta cada unidad [4].

**Figura 3**



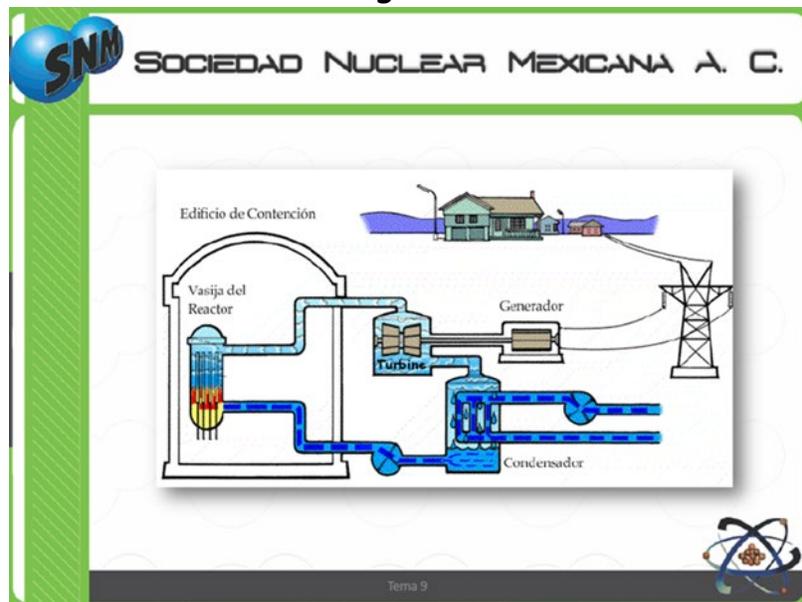
Ambas unidades de la central comparten el único edificio de tratamiento de residuos radiactivos ubicado en la unidad 1.

En el dibujo del edificio del reactor se muestra en amarillo la vasija que aloja a los elementos combustibles donde se produce la reacción nuclear en cadena que genera el vapor que se envía directamente al turbogenerador.

### Lámina 3. Tecnología de los reactores BWR/5 de Laguna Verde

Como se muestra en el diagrama de la **Figura 4**, en el edificio de contención se aloja la vasija del reactor **BWR/5**, de donde se circula directamente el vapor de alta presión a la turbina y se descarga al condensador, en donde se circula agua de mar para extraer el calor residual del vapor de baja presión descargado.

**Figura 4**



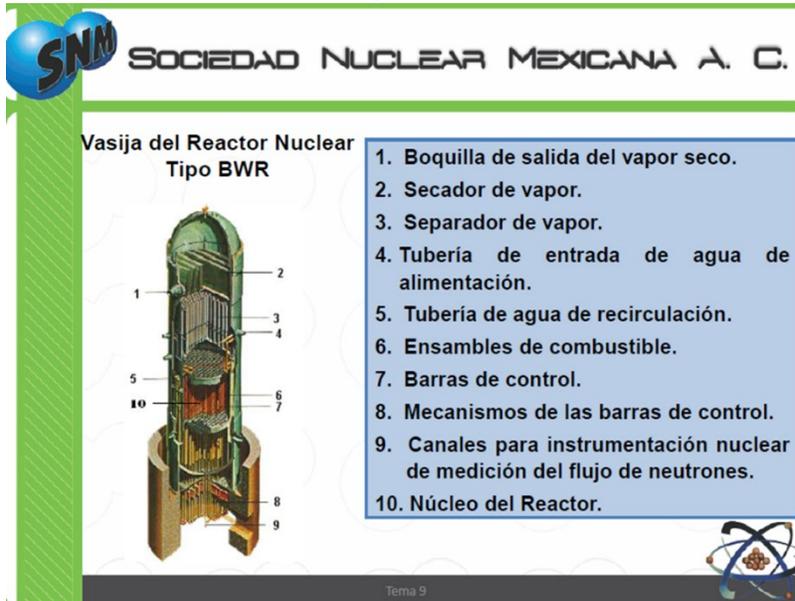
El agua condensada se bombea al reactor para repetir el ciclo de generación de vapor en un circuito cerrado. El eje de la turbina se extiende hasta el generador, donde se produce la energía eléctrica que se transporta a una subestación para elevar el voltaje y subirla a las líneas de la RNT.

En la **Figura 5** se muestra la vasija de acero forjado del reactor **BWR/5**, que mide 20 metros de altura y tiene 5.6 metros de diámetro, con paredes de 12.5 centímetros de espesor por lo que pesa alrededor de 395 toneladas.

En la parte central de la vasija, en el núcleo del reactor se alojan 444 ensamblajes de combustible, cada uno con un peso total de 179.4 kg de Uranio enriquecido,

en forma de pastillas de  $UO_2$  encapsuladas en tubos de Zircaloy, como se ilustra en la **Figura 6**.

**Figura 5**



En la parte inferior se encuentran 109 barras cruciformes de acero que contienen carburo de Boro, las cuales se introducen desde abajo para regular el flujo de neutrones y mantener controlada la reacción en cadena de fisiones.

En la parte alta de la vasija se encuentran el separador y secador del vapor que se envía directamente a la turbina. No se muestran claramente las bombas Jet que sirven para circular dentro del núcleo el agua que se inyecta a la vasija.

**Figura 6**



#### Lámina 4. Ciclo de combustible de los reactores BWR de Laguna Verde

En la Figura 7 se ilustran los procesos del ciclo de combustible de los reactores BWR/5 de Laguna Verde, que en caso de Laguna Verde se inician con la adquisición en el mercado internacional del Uranio en forma de  $UF_6$  enriquecido en el isótopo  $U^{235}$ , conforme a las especificaciones de General Electric para fabricar las recargas periódicas a los reactores.

Figura 7



Típicamente, cada 18 meses se recargan en cada reactor 140 ensambles de combustible que se fabrican en las instalaciones de General Electric en Carolina del Norte, EUA., cuyo peso final es 25.119 toneladas de Uranio en forma de  $UO_2$  y tienen un enriquecimiento promedio de 3.87 w/o  $U^{235}$ .

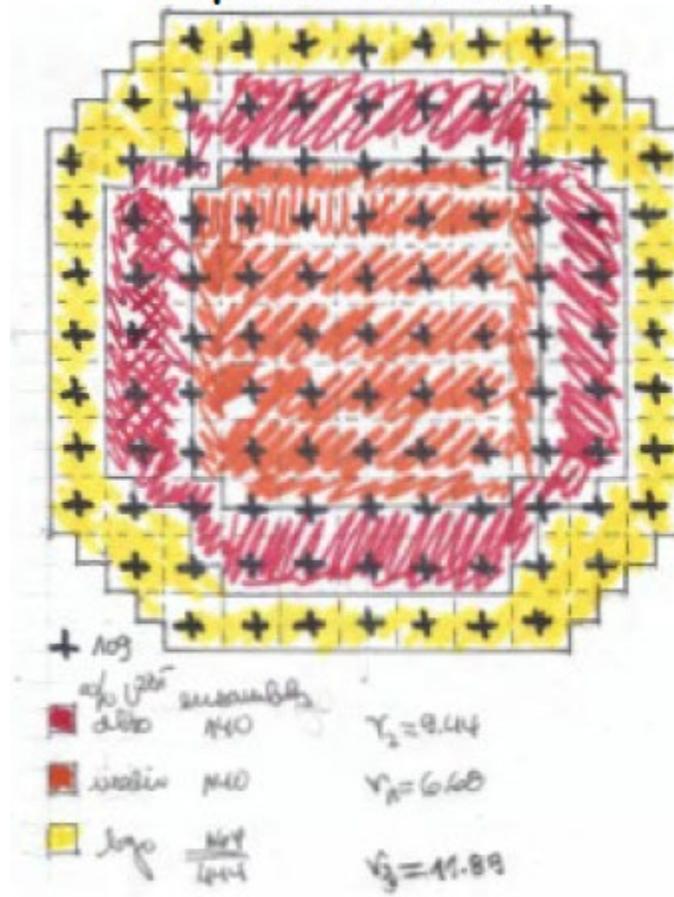
El Hexafluoruro de Uranio ( $UF_6$ ) enriquecido que se adquiere para las recargas de Laguna Verde ha sido producido en instalaciones ad hoc a las que se alimentan 197.2 toneladas de  $UF_6$  natural con un enriquecimiento de 0.711 w/o  $U^{235}$ , las que con un gasto de 139.2 toneladas de trabajo separativo (t TS) se enriquecen a 3.87 w/o  $U^{235}$  [5], para luego enviarlas a General Electric y convertirlas a  $UO_2$ .

Frecuentemente, las instalaciones de enriquecimiento y las fábricas de ensambles tienen inventarios de  $UF_6$  de varios enriquecimientos, de manera que el suministro a General Electric se realiza contablemente sin necesidad de

transportar el material de un lugar a otro. Una vez fabricadas las recargas se transportan por tierra a Laguna Verde y desde la frontera los camiones en caravana se custodian por el ejército.

Como se ilustra en la **Figura 8**, en la central los 140 ensamblajes de recarga (**rojo**) se insertan en el reactor en ubicaciones que forman un anillo alrededor de los 140 ensamblajes de una recarga anterior (**naranja**) que ya ha sido irradiados un ciclo; en el exterior se ubican los 140 ensamblajes (**amarillo**) que ya se han irradiado dos ciclos, así como otros 24 que han permanecido tres ciclos en el reactor <sup>[6]</sup>.

**Figura 8**  
**Mapa del reactor**



**Lámina 5. Costo nivelado de generación de los reactores de Laguna Verde**  
La inversión inicial para instalar la central Laguna Verde fue del orden de 2,750 millones de dólares, que se erogaron a lo largo de varios años durante la construcción y puesta en servicio, y que ya han sido amortizados.

Actualmente, los únicos costos de generación son los fijos anuales y los variables de operación y mantenimiento, así como los de las recargas de combustible de 140 ensambles que se erogan cada 18 meses.

En la **Tabla 1** se compilan los datos para calcular los 9,727 GWh de energía eléctrica generada por los 140 ensambles de la recarga durante los 3.17 ciclos que en promedio se irradian dentro del reactor, donde alcanzan un quemado a la descarga de 46,500 MWd/t Uranio.

**Tabla 1**

Generación eléctrica en un ciclo de 18 meses de cada reactor	
2,317 MWt	potencia térmica bruta
804 MWe	potencia eléctrica neta
46,500 MWd/t U	quemado a la descarga del combustible
25,119 kg U (UO <sub>2</sub> )	peso de la recarga
9,727 GWh	generación eléctrica neta a la descarga

En la **Tabla 2** se compilan las cantidades de los materiales y servicios del ciclo de combustible que se requieren cada 18 meses para fabricar las recargas de cada reactor de Laguna Verde <sup>[5]</sup>.

**Tabla 2**

Datos del ciclo de combustible de las recargas de cada reactor	
140 n° de ensambles de recarga cada 18 meses	
179.4 kg U (UO <sub>2</sub> )	peso promedio del ensamble
25,119 kg U (UO <sub>2</sub> )	peso de la recarga
3.87% w/o U <sup>235</sup>	enriquecimiento promedio de la recarga
197,247 kg U (UF <sub>6</sub> )	Uranio natural
139,247 kg TS	trabajo separativo del enriquecimiento
25,119 kg U (UO <sub>2</sub> )	fabricación de los ensambles
25,119 kg MP	manejo del combustible irradiado

En la **Tabla 3** se compilan los precios en el mercado del Uranio natural y de los servicios de enriquecimiento con los que se calcula el costo del UF<sub>6</sub> enriquecido que se entrega a General Electric, empresa con la cual la CFE tiene un contrato para diseñar y fabricar las recargas.

**Tabla 3**

Precios del ciclo de combustible de los reactores de Laguna Verde	
172.00 USD/kg U (UF <sub>6</sub> )	Uranio natural
118.00 USD/kg TS	enriquecimiento
240.00 USD/kg U (UO <sub>2</sub> )	fabricación de los ensambles
582.21 USD/kg MP	manejo del combustible irradiado

Las erogaciones por el manejo del combustible irradiado se realizan hasta después de que se haya descargado del reactor, primero para almacenarlo en seco algunos años de manera económica, confiable, limpia y segura y luego, al largo plazo, reprocesarlo o para depositarlo en formaciones geológicas estables profundas, fuera de todo contacto con la biósfera.

En la **Tabla 4** se compilan los montos de las erogaciones por concepto de los materiales y servicios del ciclo de combustible para fabricar las recargas, que suman 56.386 millones de dólares. Incluyendo el manejo del combustible irradiado el costo total sería 71.011 millones de dólares.

**Tabla 4**

Costo del ciclo de combustible de cada reactor de Laguna Verde		
33.926	MUSD	Uranio natural
16.431	MUSD	trabajo separativo del enriquecimiento
6.029	MUSD	fabricación de los ensambles
14.625	MUSD	manejo del combustible irradiado
<hr/>		
71.011	MUSD	costo de la recarga
<hr/>		
Costo unitario de generación de cada reactor de Laguna Verde		
7.30	USD/MWh	costo variable por el combustible
2.53	USD/MWh	costo variable por la operación
13.49	USD/MWh	costo fijo por la operación y mantenimiento
<hr/>		
23.32	USD/MWh	costo total de la energía generada

Como la energía eléctrica generada por los ensambles de la recarga durante su irradiación es 9,727 GWh, el costo unitario por concepto de combustible resulta ser 7.<sup>30</sup> USD/MWh, que es muy bajo comparado, por ejemplo, con la generación con gas natural, combustóleo o carbón. El costo variable de operación y mantenimiento de 2.<sup>53</sup> USD/MWh también es bajo, mientras que el costo fijo por este concepto que es 13.<sup>49</sup> USD/MWh resulta de una erogación anual de 87.482 millones de dólares.

Entonces, el costo total de generación de las unidades de Laguna Verde resulta ser 23.<sup>32</sup> USD/MWh, que es muy competitivo.

### **Lámina 6. Confiabilidad de la central nucleoelectrónica Laguna Verde**

Desde su entrada en operación comercial en 1990 y 1995, respectivamente, las dos unidades de Laguna Verde habían generado conjuntamente hasta 2021 un

total de 279.350 TWh, con un factor de planta medio de 79.6%, resultado de su bajo costo unitario y su elevada disponibilidad [2].

En la **Figura 9** se consignan las cifras acumuladas del desempeño de la unidad 1 de Laguna Verde desde su entrada en operación comercial en julio de 1990.

**Figura 9**



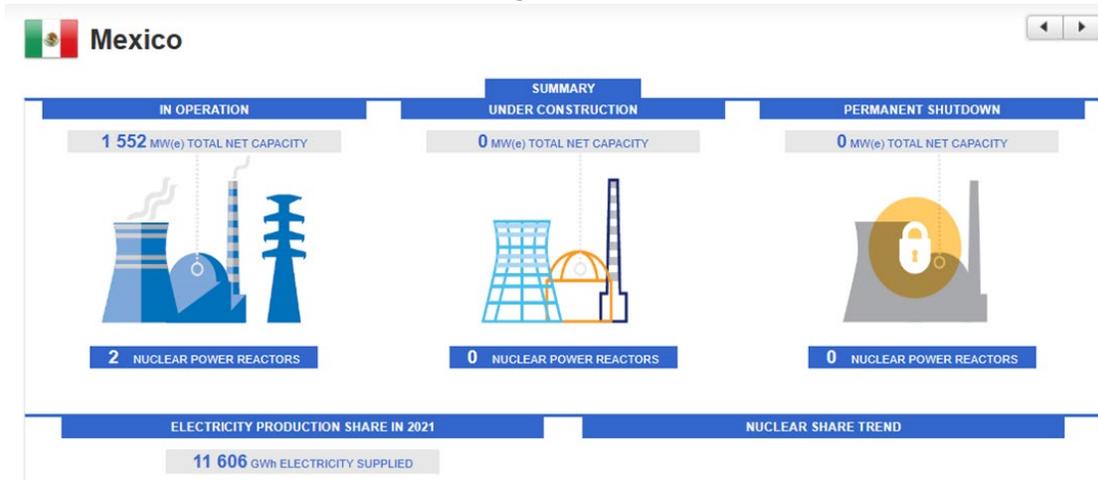
En la **Figura 10** se consignan las cifras acumuladas del desempeño de la unidad 2 de Laguna Verde desde su entrada en operación comercial en septiembre de 1994.

**Figura 10**



Como se consigna en la **Figura 11**, en 2021 las dos unidades generaron 11.606 TWh, con un factor de planta medio de 85.4%, que con elevada confiabilidad aportaron para construir a satisfacer la carga base en la región Oriental del Sistema Interconectado Nacional.

Figura 11



**Lámina 7. Limpieza de la electricidad nucleoelectrica de Laguna Verde**

Como se desprende las cifras de la **Tabla 5**, la electricidad total que se generó en el sistema eléctrico nacional en 2021 fue de 323.5 TWh, de los cuales las tecnologías fósiles aportaron 234.7 TWh (72.6%) y emitieron a la atmósfera 97.4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> [7][8].

**Tabla 5**

Generación de energía eléctrica y emisiones de CO <sub>2</sub> a la atmósfera					
CENACE: <a href="http://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Reportes/Energia_Generada/TipoTec.aspx">http://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Reportes/Energia_Generada/TipoTec.aspx</a>					
CFE: COPAR Generación 2021, Cuadro 7.3					
2021	generación		emisiones		
tecnología	TWh	%	† CO <sub>2</sub> /GWh	Mt CO <sub>2</sub>	%
ciclo combinado	184.4	57.0%	342	63.065	64.7%
termo convencional	23.2	7.2%	657	15.242	15.6%
turbogás	16.3	5.0%	663	10.807	11.1%
carboeléctrica	8.7	2.7%	798	6.943	7.1%
combustión interna	2.1	0.6%	657	1.380	1.4%
<b>fósil</b>	<b>234.7</b>	<b>72.6%</b>	<b>415</b>	<b>97.436</b>	<b>100.0%</b>
hidroeléctrica	34.7	10.7%		14.406	39.1%
eólica	21.1	6.5%		8.760	23.8%
fotovoltaica	17.1	5.3%		7.099	19.3%
nucleoelectrica	11.6	3.6%		4.816	13.1%
geotérmica	4.2	1.3%		1.744	4.7%
biomasa	0.1	0.0%		0.042	0.1%
<b>limpia</b>	<b>88.8</b>	<b>27.4%</b>	<b>415</b>	<b>36.866</b>	<b>100.0%</b>
<b>total</b>	<b>323.5</b>	<b>100.0%</b>			

en verde son las emisiones evitadas

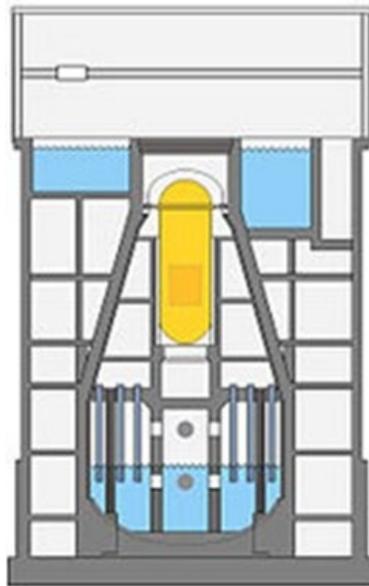
Las tecnologías limpias generaron 88.8 TWh y evitaron la emisión a la atmósfera de 36.9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en las centrales fósiles. La central Laguna

Verde generó 11.6 TWh (3.6%) y evitó la emisión de 4.8 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, lo que representó el 13.1% del total evitado por las tecnologías limpias.

### Lámina 8. Manejo del combustible irradiado de los reactores de Laguna Verde

Al descargar cada 18 meses de cada reactor 140 ensamblajes de combustible irradiado, que contienen Uranio y Plutonio residuales, así como productos de fisión radiactivos, se almacenan temporalmente para su decaimiento en las albercas en los pisos de recarga, ubicadas en la parte alta de los edificios de los reactores, como se observa en la **Figura 12**.

Figura 12

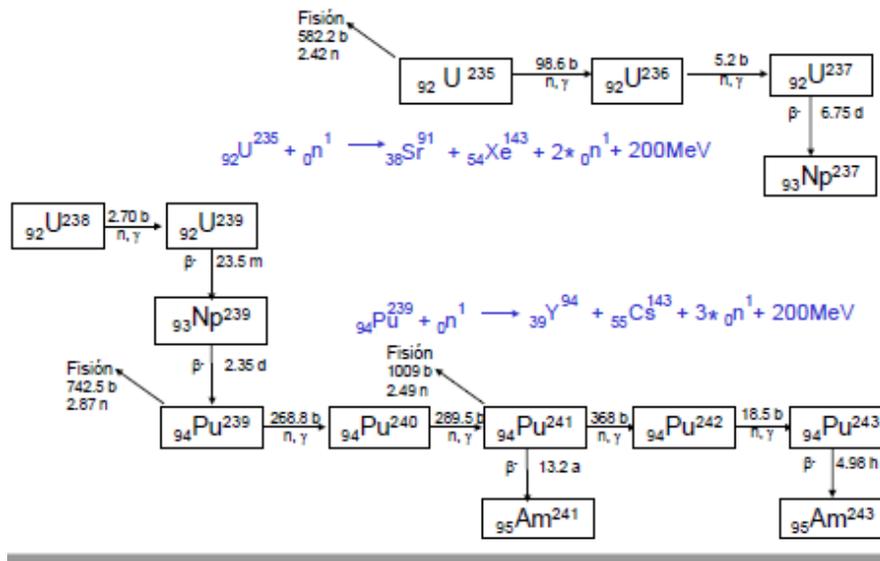


Como se puede ver en el **Diagrama 1**, en los reactores como los **BWR/5** de Laguna Verde alimentados con Uranio, al inicio de su irradiación la principal reacción nuclear es la fisión del U<sup>235</sup> con neutrones lentos, pero simultáneamente el U<sup>238</sup> captura neutrones y secuencialmente se convierte en Pu<sup>239</sup>, que también sufre fisiones con neutrones lentos. También el Pu<sup>239</sup> absorbe neutrones y se convierte en Pu<sup>241</sup>, que también es fisible [9].

En el proceso de las fisiones del U<sup>235</sup> se crean, entre otros, productos tales como el Sr<sup>91</sup> y el Xe<sup>143</sup>, que son radiactivos. En las fisiones del Pu<sup>239</sup> se crean, entre otros, radioisótopos como el Y<sup>94</sup> y el Cs<sup>143</sup>.

## Diagrama 1

Principales reacciones nucleares en reactores alimentados con uranio



Entonces, en el combustible irradiado hay Uranio y Plutonio residuales, que son valiosos combustibles nucleares y es muy deseable recuperarlos en plantas de reprocesamiento, para luego fabricar nuevo combustible de óxidos mixtos de Uranio y Plutonio MOX que se recirculan al reactor.

Los productos de fisión separados al reprocesar el combustible irradiado son los verdaderos desechos radiactivos y su destino final será almacenarlos en formaciones geológicas estables profundas, fuera del contacto con la biósfera.

Figura 13



Después de varios años de enfriamiento en las albercas, los ensambles irradiados se almacenan en seco en el sitio de la central en contenedores blindados herméticos, que se ubican de manera económica, confiable, limpia y segura en la plataforma mostrada en la fotografía mostrada en la **Figura 13**.

### Lámina 9. Seguridad de los reactores de Laguna Verde

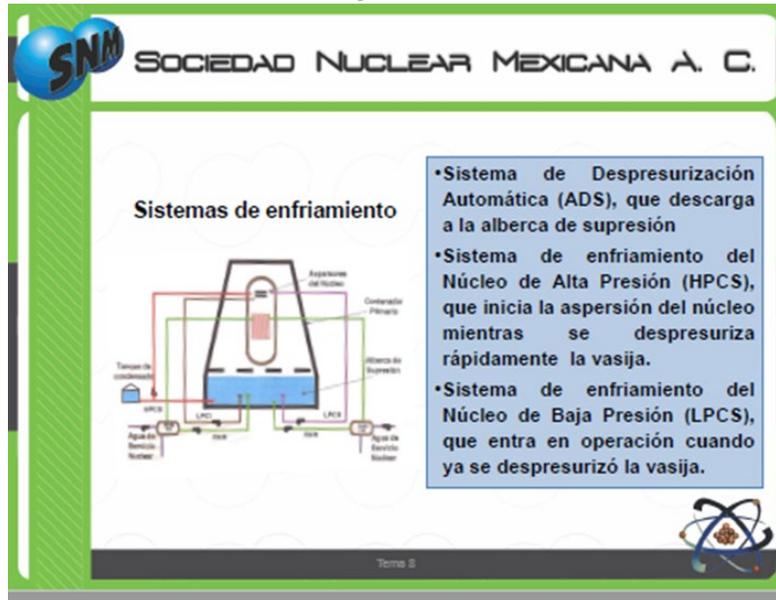
Los reactores **BWR/5** de Laguna Verde cuentan con 5 barreras pasivas de contención del material radiactivo, que impiden su dispersión al medio ambiente: las pastillas de  $UO_2$ ; los encamisados de Zircaloy de las varillas del combustible; la vasija del reactor; el edificio del contenedor primario; y el edificio de contención secundaria; los cuales se ilustran en la **Figura 14**.

**Figura 14**



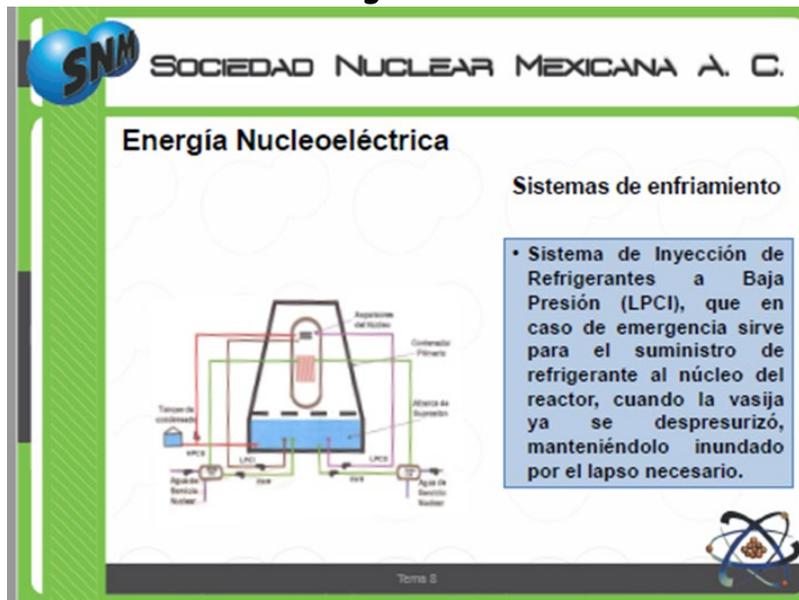
Además del circuito cerrado de agua en ebullición que circula el vapor a la turbina y el condensador, de donde se recircula el agua al reactor, los reactores **BWR/5** cuentan con 3 sistemas activos de enfriamiento de emergencia, que en caso de falta de energía eléctrica de la red operan con generadores diésel: depresurización automática; enfriamiento de alta presión; y enfriamiento de baja presión; que se ilustran en la **Figura 15**.

Figura 15



También cuentan con un sistema de inyección de baja presión que sirve para el suministro a largo plazo de refrigerante, que operan con generadores diésel en caso necesario, que se ilustran en la **Figura 16**.

Figura 16



### Lámina 10. La CNSNS y el OIEA

De conformidad con la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, la Comisión de Seguridad Nuclear y Salvaguardias es la

autoridad en la materia en nuestro país. Ha vigilado que, en la selección del sitio, el diseño, el licenciamiento, la construcción y la operación de la central Laguna Verde se cumpla con la normatividad y que también se observen los Tratados celebrados por México en el ámbito internacional.

Figura 17



Desde 1958 el Gobierno de México es Miembro del Organismo Internacional de Energía Atómica, que le ha prestado asistencia técnica para ejecutar el proyecto de la central Laguna Verde; además inspecciona periódicamente y vigila que en México se cumpla con el acuerdo de salvaguardias de los materiales nucleares y su uso pacífico.

### Conclusión

La energía nucleoelectrónica generada por la central Laguna Verde es económica, confiable, limpia y segura, que son beneficios muy importantes para abastecer de energía eléctrica a los usuarios del servicio público de la CFE.

Con los anteriores argumentos se puede afirmar que es necesario aumentar la capacidad instalada de centrales nucleoelectrónicas en México, para lo cual hay que iniciar los estudios del licenciamiento del sitio, así como la licitación internacional para adquirir los nuevos reactores.

## Referencias

- [1] General Electric: BWR/5; [GE BWR - Wikipedia](#)
- [2] IAEA: [PRIS - Country Details \(iaea.org\)](#)
- [3] CENACE: Diagramas unifilares del Sistema Eléctrico Nacional, 2020-2025
- [4] SNM: Aula virtual
- [5] UxC: [UxC: Fuel Cost Calculator](#)
- [6] CVMConsultor: diseño propio
- [7] CENACE: <http://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Reportes/EnergiaGenerada/TipoTec.aspx>
- [8] CFE; COPAR Generación, 2021; Cuadro 7.3
- [9] Nuclear Chemical Engineering, Second Edition; Manson Benedict, Mc Graw Hill, 1981