

## EXPERIENCIA TECNICA Y ECONOMICA ADQUIRIDA EN LA PRODUCCION DE ENERGIA NUCLEOELECTRICA

H. ERRAMUSPE, M. SAMETBAND, E. BISOGNI,  
C. BIONDO, H. KOLL, H. RAPOPORT  
Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Buenos Aires,  
Argentina

### Abstract-Resumen

#### TECHNICAL AND ECONOMIC EXPERIENCE IN NUCLEAR POWER PRODUCTION .

The Atucha I nuclear power plant (335 MW(e)), consisting of a pressurized heavy-water-moderated and -cooled reactor, came into commercial operation in June 1974. By 31 October 1981, 2165.6 days of operation had been completed at full load and the net production of electricity had reached 16 854.6 GW(e)·h. The average load factor was 89%, discounting the commissioning in 1974 and the extended, planned outages in 1977 (in order to to increase the net capacity from 319 to 335 MW(e)) and 1980. A total of 2734 fuel elements were burned with an average discharge burnup of 5701 MW·d/tU and a D<sub>2</sub>O loss of 12 833 kg. Local fabrication of fuel elements was developed. The equipment required for commercial production was selected, acquired, installed and operated as a pilot plant. The corresponding fabrication processes were developed and adjusted. Staff were trained in the fabrication and control functions, and additional information was obtained through the purchase of the specific equipment and through expert visits. More than 200 fuel elements were produced at a commercial output rate and these gave excellent performance. At one time they made up approximately 50% of the reactor core. The installations (11 600 m<sup>2</sup>) required for commercial fabrication of the fuel elements for the first three Argentine nuclear power plants were designed and built. A joint company - CONUAR S.A. - was set up with a majority holding in the private sector and under the control of the Argentine National Atomic Energy Commission (CNEA). Technology, equipment, raw materials, trained personnel, etc., were transferred to the company under current market conditions.

#### EXPERIENCIA TECNICA Y ECONOMICA ADQUIRIDA EN LA PRODUCCION DE ENERGIA NUCLEOELECTRICA.

La Central Nuclear Atucha I (335 MW(e)), del tipo de recipiente de presión-agua pesada, entró en operación comercial en junio de 1974. Hasta el 31 de octubre de 1981 se completaron 2165,6 días de plena potencia con una producción neta de 16 854,6 GW(e)·h. El factor de carga promedio, sin incluir los años 1974 de puesta en servicio y 1977 y 1980 de paradas programadas extensas (aumento de potencia neta de 319 a 335 MW(e) en 1977), fue del 89%. Se quemaron 2734 elementos combustibles a un quemado medio de extracción de 5701 MW·d/t U, siendo 12 833 kg las pérdidas de D<sub>2</sub>O. Se ha desarrollado la fabricación local de elementos combustibles. A nivel de planta piloto, se ha seleccionado, adquirido, montado y operado el equipamiento necesario para la producción industrial, desarrollando y poniendo a punto los procesos de fabricación correspondientes. Se formó el personal de fabricación y control obteniéndose información adicional mediante la compra del equipamiento específico y visitas de expertos.

Se produjeron más de 200 elementos combustibles con ritmo de producción industrial, de excelente comportamiento en servicio nuclear, los cuales llegaron a constituir aproximadamente el 50% del núcleo del reactor en un momento dado. Se diseñaron y construyeron las instalaciones necesarias (11 600 m<sup>2</sup>) para la fabricación industrial comercial de los elementos combustibles correspondientes a las tres primeras centrales nucleares argentinas. Se formó una sociedad mixta, CONUAR S.A., con participación mayoritaria del sector privado nacional, bajo control de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), y a esta sociedad se le hizo la transferencia de tecnología, equipamiento, suministros de materia prima, personal entrenado, etc. bajo condiciones comerciales corrientes.

## 1. INTRODUCCION

Atucha, la primera central nuclear de Argentina (Figs.1, 2), se halla a 100 km al noroeste de la ciudad de Buenos Aires, a orillas del río Paraná de las Palmas.

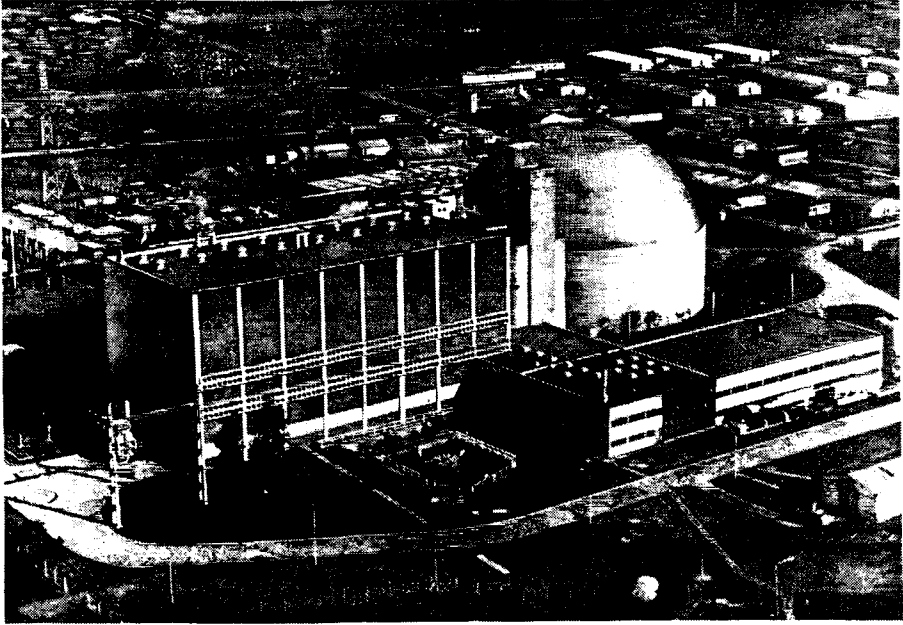
Está equipada con un reactor de uranio natural del tipo de recipiente de presión, moderado y refrigerado por agua pesada. La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), circunscripta en sus comienzos casi totalmente a la investigación básica y aplicada, entendió la necesidad de instalar centrales térmicas en el sistema eléctrico interconectado, que no consumieran combustible fósil de alto precio. De los resultados positivos de esta experiencia da buena cuenta el plan nuclear que Argentina ha encarado a partir de entonces: la Central Nuclear Embalse (CNE), cuya puesta en marcha se prevé para 1983, el comienzo de la Central Nuclear Atucha II (CNA II) y el proyecto en estudio de la Central Nuclear IV (CN IV).

### 1.1. Factibilidad y contrataciones

En 1965, el Poder Ejecutivo Nacional encargó a la CNEA un "Estudio de preinversión de una central nuclear de unos 350 MW(e) de potencia para el abastecimiento del Gran Buenos Aires-Litoral". Dos años después, en 1967, éste aprobó el estudio y encomendó a la CNEA obtener ofertas para la construcción. De las 17 firmas oferentes, la CNEA aceptó la oferta presentada por Siemens A.G., y firmó el correspondiente contrato el 31 de mayo de 1968, previo análisis comparativo entre los principales tipos de reactores existentes.

## 2. DESCRIPCION DE LA CENTRAL NUCLEAR

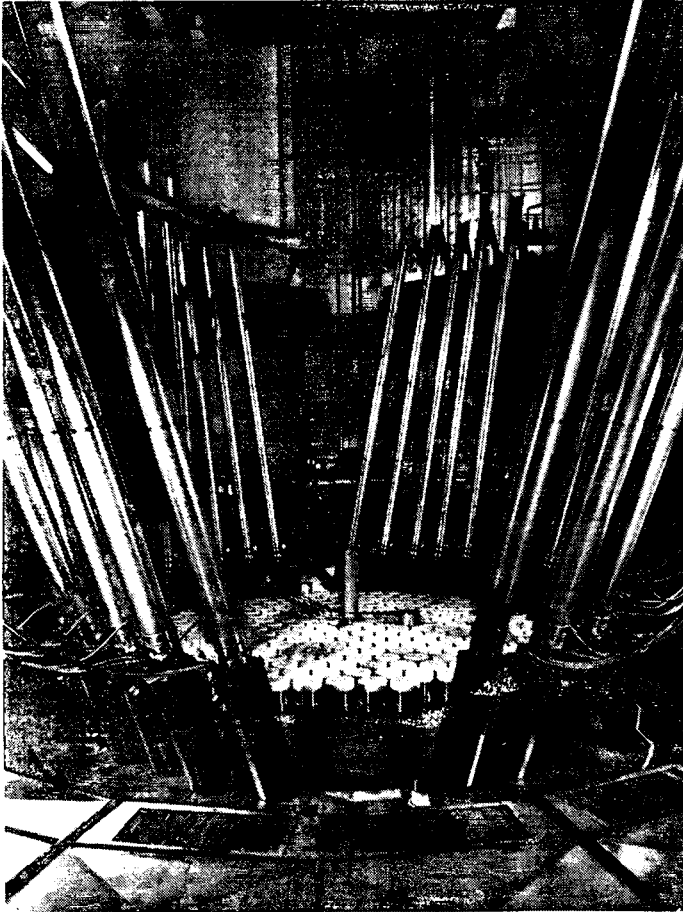
El sistema primario presurizado está ubicado dentro de la esfera de contención, una estructura de acero que tiene un diámetro de 50 m.



*FIG.1. Vista exterior de la Central Nuclear Atucha I. En primer plano el edificio del reactor y edificios auxiliares y de máquinas. Al fondo a la derecha las instalaciones de la escuela para ingenieros y técnicos.*



*FIG.2. Sala de control de la Central.*



*FIG.3. Vista de la parte superior del núcleo y extremos de canales. Las barras oblicuas corresponden a las barras de control de los mecanismos de reactividad.*

El sistema primario está compuesto básicamente de:

- el recipiente de presión
- dos generadores de vapor
- dos bombas principales
- dos bombas para el circuito moderador
- dos intercambiadores del moderador
- un presurizador (calefactor eléctrico y lluvia).

Los 235 elementos combustibles (38 toneladas de uranio natural) producen 1179 MW de potencia térmica a 115 atm y una temperatura de salida de 300°C.

El calor generado es transferido al sistema secundario a través de los intercambiadores del moderador (~10%) y los generadores de vapor (90%), donde se producen las 1856 t/h de vapor saturado (humedad - 0,15%) a 44 atm.

El vapor entra a la etapa de alta presión de la turbina, luego pasa a través de un sistema separador de humedad, retorna a tres etapas de baja presión en paralelo, pasando luego al condensador principal. El condensado atraviesa varias etapas de precalentamiento y llega luego a un tanque de desgasado, desde donde las bombas de alimentación lo envían nuevamente al generador de vapor, pasando previamente por los intercambiadores del moderador.

Tres bombas refrigerantes del condensador llevan el calor de éste al río Paraná.

La turbina mueve el generador bipolar, enfriando por hidrógeno, a una velocidad de 3000 rev/min. Genera 365 MW(e) a 21 kV.

El reactor es controlado por 3 barras grises (acero inoxidable), 3 barras de bloqueo (Hf) y otras 21 trabajando como barras de seguridad. La reactividad se modifica también mediante la temperatura del moderador (Fig.3).

Como sistema de emergencia en el primario tenemos el sistema de "scram" por inyección de veneno y el sistema de inyección de agua liviana con presiones alta y baja para refrigeración durante condiciones de LOCA en períodos largo y corto.

El recambio de elementos combustibles se hace mientras opera el reactor, siendo el consumo del combustible de 1,4 elementos combustibles por día de plena potencia, para mantener una reserva de reactividad del 7‰.

### 3. CONSTRUCCION

La CNEA incluyó entre sus objetivos la preparación de una industria de componentes nucleares y la elevación del nivel tecnológico de la industria nacional. El mayor desafío que afrontó, en su momento, fueron las exigencias estrictas impuestas por el control de calidad.

La obra se inició el 15 de junio de 1968. Cuatro meses más tarde se iniciaron los primeros trabajos de hormigón armado. En mayo de 1969 se colocó la calota inferior de esfera de seguridad en el edificio del reactor. A mediados de 1970 se terminó dicha esfera y en octubre de 1971 se recibió en obra el recipiente de presión. A fines de 1972 se cargaron los elementos combustibles en el reactor. La Central se recepcionó el 24 de junio de 1974, es decir 72 meses después de iniciada la construcción.

#### 3.1. Aumento de potencia

Las modificaciones para el aumento de potencia de la Central se realizaron juntamente con la parada programada de revisión general, iniciándose a fines de diciembre de 1976.

A fines de abril de 1977, la Central se reintegró al servicio, finalizando el período de recorrida general y de modificaciones.

Después de las pruebas correspondientes, el 6 de mayo de 1977 se alcanzó la nueva potencia nominal de 376 MW(e). Este aumento implicó un equipamiento adicional para el sistema de 27 MW(e) que, con los costos de instalación de ese momento, hubiese demandado una inversión aproximada de dólares. 27 000 000 corrientes. En cambio, los trabajos y equipos utilizados significaron para la CNEA un gasto adicional de sólo dólares. 1 500 000. En caso de computarse como costo la energía no generada durante el tiempo de parada, se obtendría una cifra total del orden de dólares. 10 000 000. Comparando estos valores, se advierte que el aumento de potencia representó para la CNEA un beneficio neto de dólares. 17 000 000 (dóls.de 1977) aproximadamente.

#### 4. LA CNEA COMO EMPRESA PRODUCTORA DE GENERACION ELECTRICA

La CNEA opera la Central nuclear con el fin de generar energía y, sobre todo, para contribuir al desarrollo de la política nuclear argentina, utilizándola como escuela para capacitación de ingenieros y técnicos de operación.

En el momento en que la CNA I empezó a entregar energía, cinco empresas abastecían el sistema Gran Buenos Aires-Litoral, las que integraban el Despacho Unificado de Cargas (DUC) tanto en sus aspectos de intercambio de energía y potencia como de transacciones económicas. A éste se incorporó la CNEA dos años después de comenzar su suministro.

El DUC, cuyo esquema de transacciones económicas se apoya en una retribución por potencia puesta a disposición y otra por energía transferida (destinada a compensar costos fijos y costos variables, respectivamente), debió ser modificado en sus coeficientes relativos, como consecuencia de la distinta estructura del costo de generación de una central nuclear.

Por otra parte, la CNEA no contaba con un mercado consumidor final, por lo que la totalidad de la energía producida se comercializaba en bloque (a diferencia de las otras empresas integrantes del DUC), hecho que facilitó la pronta y efectiva concreción de las transacciones económicas.

En cuanto al licenciamiento de la instalación la CNEA actuó a través de su Consejo Asesor para el Licenciamiento de Instalaciones Nucleares (CALIN). Este Consejo fijó los criterios de seguridad radiológica y nuclear que debía cumplir la Central nuclear y estableció un sistema de inspecciones regulatorias. Adicionalmente requirió la formación de un comité adhoc integrado por personal del licenciatario para la supervisión de las fases de puesta a crítico y subida de potencia de la Central. Estableció además un sistema de licenciamiento para el personal de operación.

A fines de 1973, en vísperas de la puesta a crítico del reactor, se contaba con personal calificado para desempeñar las funciones antes descriptas, pero no había reservas para cubrir las vacantes que se producían. Además, debía comenzar el entrenamiento del personal para la CNE; razones sobradas estas para la implementación de cursos de formación, que atendieron las necesidades prioritarias y que desempeñaron eficazmente los ingenieros que operaban la CNA.

## 5. OPERACION Y MANTENIMIENTO

La CNEA se responsabilizó de la labor de organizar el plantel que operaría la futura central. El equipo se constituyó con personal que tenía experiencia en centrales convencionales y en reactores de investigación. Posteriormente, se les destacó fuera del país para complementar sus conocimientos. También, por razones de futuros proyectos, se preparó en la Argentina a otro grupo adicional que pudiera desempeñar idéntica tarea.

En aquel momento hubo que sortear algunos escollos: retrasos del proyecto, demoras en concretar obras de infraestructura que facilitarían el alojamiento del personal en las proximidades de la Central, el origen heterogéneo de dicho personal, etc. Tales motivos implicaron la replanificación del programa de capacitación del personal de la Central para enfrentar la cantidad de reemplazos que fueron necesarios durante las fases finales del proyecto.

No obstante estos inconvenientes, en el momento de recibirse la Central, el nivel profesional alcanzado permitió afrontar su operación.

La historia de la Central Nuclear Atucha I (CNA I) se sintetiza en las siguientes fechas:

- 13-01-74: primera puesta a crítico.
- 19-03-74: primera sincronización a la red.
- 24-06-74: recepción de la central.
- 16-11-74: operación a plena potencia (100%).
- 06-05-77: incremento de la potencia en un 8%.

La cronología del mantenimiento de la Planta pueda resumirse como sigue.

Una primera etapa durante la puesta en marcha y los primeros meses de operación de la Planta, en la que los ingenieros y técnicos del proveedor junto con el personal argentino participaron activamente en la operación y mantenimiento.

El personal argentino apuntó a obtener la experiencia necesaria para reemplazar gradualmente al personal extranjero.

Se tenía la ventaja de haber incorporado al personal de la Planta un número importante de personas que, habiendo trabajado para KWU durante el montaje y la puesta en marcha, tenían un profundo conocimiento de los sistemas y componentes. También había un grupo de ingenieros y técnicos que habían sido entrenados en Alemania durante 1 ó 2 años.

CUADRO I. PRODUCCION DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA I

Año	MW(e)·h netos	Factor carga %	Factor explotación %
1974	947 600	60,7	60,84
1975	2 357 925	85,5	88,18
1976	2 409 000	87,23	88,89
1977	1 537 028	54,95	53,1
1978	2 711 812	96,95	91,61
1979	2 503 682	84,68	86,2
1980	2 181 504	74,14	79,11
1981	2 647 632	90,22	92,74

A menos de 2 años del comienzo de operación, la CNEA con su personal pudo emprender todas las tareas de mantenimiento, excepto las muy especializadas, tal como cambiar los sellos de las bombas principales, para las que se requirió la ayuda de personal del proveedor.

Luego siguió una etapa en la que el personal de la CNEA ganó confianza y experiencia en tareas de mantenimiento, y trató de reducir la asistencia extranjera.

Actualmente, la Planta es operada enteramente por personal de la CNEA.

Adicionalmente, han comenzado a actuar en el país dos consorcios interesados en tecnología nuclear que están participando activamente en el montaje de la Central Nuclear Embalse. De esta manera adquieren la capacidad técnica requerida por la industria nuclear.

La Central Nuclear Embalse comenzará a operar a fines de 1982, y casi todos los ingenieros y técnicos calificados que trabajan allí han sido entrenados o han trabajado en Atucha I.

## 6. PRODUCCION

En el Cuadro I se pueden apreciar las características de la producción de la Central hasta el presente.

### 6.1. Gestión de combustible

Desde el año 1974 hasta finales del 81 se efectuaron 6240 operaciones de recambio de combustible, a un promedio que osciló entre 1,20 y 1,35 elementos combustibles por día de operación a plena potencia.

CUADRO II. CONSUMO Y CONCENTRACION DE AGUA PESADA

Año	Pérdida (kg)	Concentración en el circuito primario (%)
1974	744,24	~99,8
1975	956,11	99,88
1976	1441,65	99,87
1977	2664,08	99,77
1978	2089,83	99,79
1979	1874	99,80
1980	1629	99,78
1981	1689	99,71

CUADRO III. EMISIONES DE RADIONUCLEIDOS AL RIO

	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
TRITIO (Ci)	90	843	2195	5881	6184	6924	7946	10976
ACTIVIDAD $\gamma$ TOTAL (Ci)	1,002	4,042	3,064	2,685	2,126	3,104	2,256	2,190

CUADRO IV. EMISIONES DE RADIONUCLEIDOS A LA ATMOSFERA

	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
TRITIO (Ci)	217	1023	5845	6055	5953	6409	6475	5598
GASES NOBLES <sup>a</sup>	1813	251	4253	1906	8424	761	942,2	1231
AEROSOLES (Ci) ( $\times 10^{-4}$ )	0,6	1,4	3,0	1,4	5,5	6,6	4,4	3,9
YODO (Ci) ( $\times 10^{-3}$ )	9,8	1,2	9,8	1,2	48,3	74,0	5,8	11

<sup>a</sup> Los años 1974 a 1978 inclusive en Ci; 1979 a 1982 en Ci·MeV ( $\gamma$ ).

CUADRO V. LIMITES AUTORIZADOS DE DESCARGA (en %)

		1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
RIO	Tritio (%)	<1	<1	2	6	6	23,1	26,5	36,6
	$\gamma$ total (%)	20	81	61	54	42	62,1	45,1	43,8
	Tritio (%)	3	16	90	93	92	21,4	21,6	18,7
CHIME-	Gases (%)	7	1	18	8	35	30,4	37,7	49,2
NEA	Aerosoles (%)	<1	<1	<1	1	<1	< 1	0,4	0,4
	Iodo (%)	<1	<1	1	1	5	7,7	0,6	1,2

El quemado promedio de extracción fue de 4750 MW·d/t U para el núcleo inicial: ascendió luego a 5930 MW·d/t U en 1976, y de 5600 MW·d/t U para el núcleo de equilibrio con posterioridad al incremento de la potencia en un 8%.

Un sector importante de la instalación —el sistema de transporte del combustible— comenzó a operar con intensidad en el mes de septiembre de 1974, efectuando hasta 2,2 cambios de combustible por día.

Conviene señalar que, a partir del 21-4-79, la Central Nuclear Atucha I (CNA I) asumió la responsabilidad de la programación del recambio de elementos combustibles. Esto permitió, entre otros logros, un mayor seguimiento del estado real de núcleo para la optimización del quemado de extracción; disponer de la capacidad para simulación y seguimiento de maniobras especiales y respuestas rápidas ante anomalías de recambio, y posibilitar la reutilización de 40 elementos combustibles semiquemados, que significaron un ahorro de 18 elementos combustibles, hasta 1981.

## 6.2. Agua pesada

El consumo de agua pesada y la concentración isotópica a lo largo de la vida de la Central se reflejan en el Cuadro II.

## 6.3. Emisiones de radionucleidos (Véanse los Cuadros III, IV)

Del nivel de emisiones al medio ambiente resultan los porcentajes de los “límites autorizados de descarga” indicados en el Cuadro V.

## 7. ASPECTOS ECONOMICOS

La CNA I fue contratada “llave en mano” a un precio de marcos alemanes 371 576 105 (en junio de 1974 el cambio era de 2,5727 marcos por dólar).

Este monto, que no incluye la primera carga de elementos combustibles ni el agua pesada, fue financiado en 40 cuotas semestrales, iguales y consecutivas, venciendo la primera de ellas a los 6 meses de la recepción de la Central, o sea el 31/12/74. El interés correspondiente fue fijado en el 6% anual sobre saldos impagos.

El costo total de la central "en marcha" ascendió a dólares 190 909 293, incluyendo el costo del primer núcleo (dóls. 6 400 000) y del agua pesada (dóls. 24 676 000).

En el año 1981 se incorpora a la CNA I el segundo edificio de almacenamiento de elementos combustibles irradiados, cuya construcción fue ejecutada en el período 1978/81.

La CNA I estructura la tarifa del kW·h conforme a la metodología establecida por la Secretaría de Estado de Energía.

Bajo esta metodología y teniendo en cuenta la producción anual, la potencia puesta a disposición en el año, los niveles de precios internos y la tasa de cambio de dólar estadounidense, los valores relativos de la tarifa del kW·h, durante los últimos cuatro años, observan la siguiente estructura media: precio por potencia puesta a disposición, 58,8% (remuneraciones, 11,2%; amortización y cargas financieras, 31,7%; materiales y otros, 15,9%) y precio por energía suministrada, 41,2% (concentrado de U, 12,3% y fabricación combustible, 28,9%).

El costo del kW·h en 1981 se facturó a aproximadamente  $30 \times 10^{-3}$  dólares/kW·h.

## 8. FABRICACION DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

### 8.1. Antecedentes

Simultáneamente con la decisión tomada en 1968 en relación con la instalación de la Central Nuclear Atucha, se planificaron programas correspondientes al ciclo de combustible con el propósito de llegar a la producción nacional de elementos combustibles de potencia.

La importante experiencia ya acumulada en metalurgia y en fabricación de combustibles nucleares para reactores de investigación permitió que, si bien el diseño original del combustible Atucha I y su fabricación fueran realizados en Alemania por RBU-KWU, especialistas de CNEA participaran desde el comienzo en ese programa. Cuando la Central Atucha I entró en operación en 1974, simultáneamente se hizo la irradiación en el reactor MZFR del Centro Nuclear de Karlsruhe de prototipos de elemento combustible, fabricados en la CNEA, en colaboración con la empresa Siemens AG para optimizar el diseño y los métodos de fabricación.

En el marco de un programa general relativo al ciclo de combustible y basado en el plan de entrenamiento y realizaciones tecnológicas iniciado en 1968, en

1976 se puso en marcha un proyecto cuyo objetivo fue el desarrollo y puesta a punto, a nivel industrial, de las técnicas de fabricación y control del elemento combustible para la CNA I.

La implementación llevada a cabo fue realizada con miras a establecer una industria eficiente y moderna, dotada de una tecnología avanzada y compatible con la correspondiente infraestructura disponible en el país.

## 8.2. Etapa planta piloto

Los trabajos correspondientes llevados a cabo en la planta piloto de elementos combustibles y tendientes a alcanzar los objetivos propuestos fueron conducidos a través de dos programas de realizaciones:

- Programa de “Combustibles de demostración”
- Programa de “Inicio de operación”.

El primero de ellos (1976–1979) abarcó los desarrollos técnicos de fabricación y control, a nivel unitario, del citado elemento combustible y materializando dichas técnicas en la fabricación de una serie de 25 elementos combustibles en tres lotes, donde se integraron las mismas hasta lograr un 100% de fabricación nacional en el último de ellos.

En el segundo programa (1980–1981), sin solución de continuidad del primero, se obtuvieron niveles de producción industrial que permiten abastecer el consumo de la CNA I y se alcanzó en la planta piloto un ritmo de producción sostenido de 1,5 elementos combustibles por día, a través de un lote de 218 de los mismos (Fig.4 ).

Las líneas de producción implementadas correspondieron a la:

- fabricación de pastillas combustibles de  $UO_2$  sinterizadas;
- fabricación de barras combustibles y correspondiente montaje del elemento combustible;
- fabricación de las piezas estructurales.

Para la línea de fabricación de pastillas combustibles se adoptó la técnica de “compactación directa”, en función de las características “freeflowing” del polvo de  $UO_2$  utilizado y atendiendo a la estrecha interrelación que debe existir entre ambas tecnologías de fabricación (pastillas combustibles – polvo de  $UO_2$ ), siendo esta última también encarada en la CNEA y en el marco del ciclo de combustible, entrando en operación a nivel industrial la respectiva línea durante el corriente año con una capacidad de producción de  $UO_2$  grado cerámico de 150 t U/a.

En la etapa de compactación de pastillas combustibles, el polvo de  $UO_2$  se acondiciona con el agregado de  $U_3O_8$  en proporción de aproximadamente el 5%, lo cual, además de contemplar un reciclado de rechazos de fabricación, favorece la estabilidad de la densidad de las pastillas combustibles en servicio

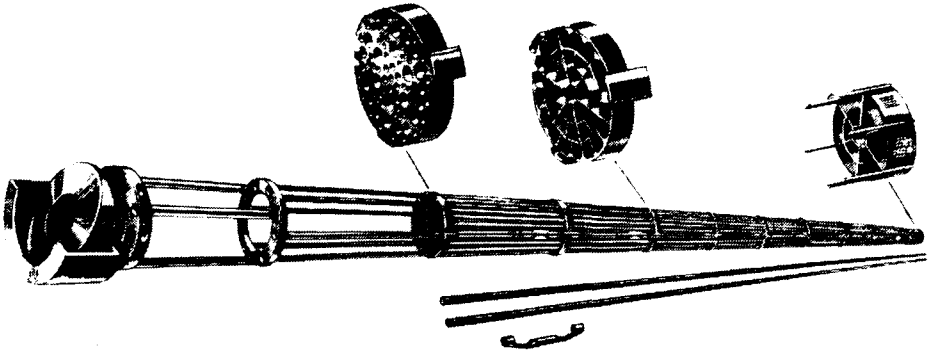


FIG.4. Elemento combustible de la CNA I. Se muestran sus diferentes partes componentes.

nuclear al actuar como estabilizador de la microporosidad y minimizar así la resinterización y consecuente densificación de las mismas.

En esta etapa se utilizan prensas mecánicas de doble efecto de 50 t con dispositivos de compactación formados por matriz de sistema flotante, dotado con 7 punzones de accionamiento compensado y lubricación periférica con dosificación controlada y que permite una producción de aproximadamente 400 kg de pastillas de  $UO_2$  por día.

La acción combinada del sistema flotante de matriz (mejor distribución de presiones de compactación), el accionamiento compensado (obtención más uniforme de densidades) y la lubricación periférica (eliminación de aglomerante y minimización de impurezas introducidas) permiten fabricar pastillas combustibles a niveles industriales de alto rendimiento y dentro de esquemas productivos económicos.

La sinterización se efectúa en hornos industriales continuos de 100 t/a de capacidad, con calentamiento eléctrico y atmósfera reductora de hidrógeno y

gradientes de temperatura compatibles con las curvas características de sinterización del polvo utilizado.

Completan la línea de fabricación de pastillas los sistemas auxiliares de recuperación de "scrap" de fabricación.

La automatización de los sistemas y la operatoria empleada aseguran una producción continua y repetitiva de  $6 \times 10^6$  pastillas combustibles por año (aprox. 65 t de  $UO_2/a$ ) con rechazos totales menores del 10%.

En la fabricación de las barras combustibles, donde se emplean procesos de soldadura TIG para la unión tapón-vaina, tiene una relevante importancia la soldadura por resistencia de patines a vainas, cuya función es guiar las barras combustibles a través de los separadores.

Dicha importancia radica en la necesidad de minimizar la afectación de la estructura metalúrgica en la zona de soldadura.

Previo a las soldaduras de patines mencionadas, se realizan técnicas de electropulido de las vainas de Zircaloy-4 (Zry-4) para dotar a la interfase de las condiciones apropiadas para la unión patín-vaina.

Todos los procesos desarrollados o puestos a punto satisfacen la producción, a nivel industrial, de barras combustibles requerida y con rechazos totales menores del 15% en la etapa de planta piloto.

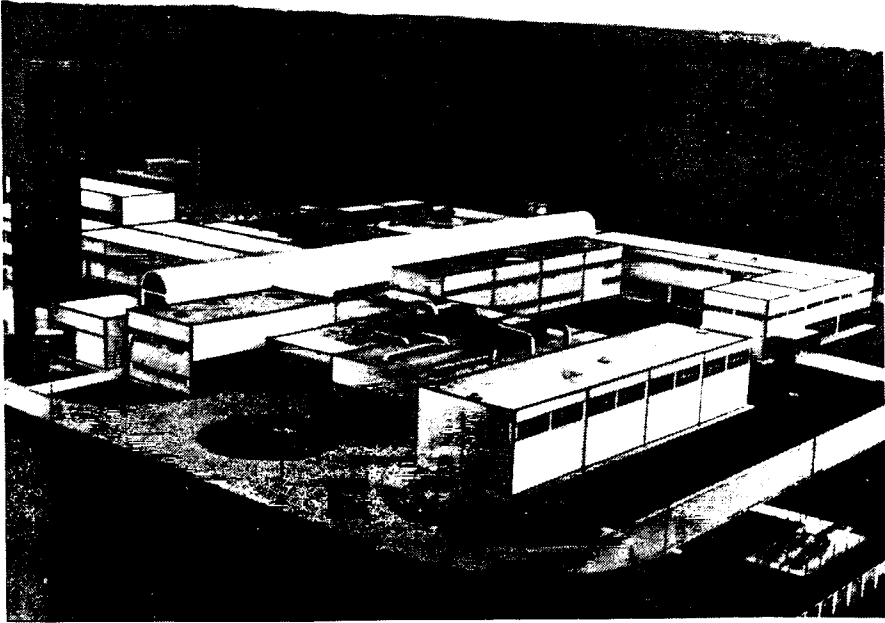
La fabricación de piezas estructurales, cuya mayor parte fue llevada a cabo por la industria privada nacional, previo a la formación de un plantel de subproveedores calificados, tuvo como principal actividad la puesta a punto de procesos y técnicas intervinientes en la manufactura de los separadores.

Dada la especial geometría de dichos separadores, la fabricación correspondiente se lleva a cabo por técnicas de electroerosión, previo maquinado por arranque de viruta y tratamiento superficial posterior por electropulido y rectificado de asiento de las mallas, donde se deslizan con ajustada precisión las barras combustibles. En función de la alta producción de estos separadores (aproximadamente 6000 por año), la fabricación de los electrodos (aproximadamente 240 000 por año) se realiza por la yuxtaposición de placas electrodos.

La fabricación de estas placas electrodos (aproximadamente 3 500 000 por año), cuyas dimensiones deben encontrarse dentro de la tolerancia de 0,01 mm, se lleva a cabo en una prensa especial Feintool dotada de matriz especial de corte preciso y velocidades de producción de 80 placas por minuto.

Asimismo, la fijación de las zapatas a los separados se efectúa mediante soldadura "brazing" con aporte de Zry-5% Be y en equipos automatizados de fabricación especial, dada la peligrosidad del manipuleo del material con Be. La producción total a nivel industrial de separadores se obtiene con rechazos menores del 8%.

Los programas de control de calidad desarrollados comprendieron tanto los de evaluación y calificación de procesos y medios de producción, como los de control intermedio y final de partes componentes y elemento combustible



*FIG.5. Fábrica de Elementos Combustibles Nucleares operada por CONUAR S.A.*



*FIG.6. Vista interior de la Fábrica Línea Atucha I de la Planta de fabricación de pastillas cerámicas de  $UO_2$ .*

respectivamente, lo que permitió obtener, dentro de un esquema de producción económica, lotes de los mismos que cumplieron un servicio nuclear en la CNA I, con rendimientos comparables con los que al presente tienen los elementos combustibles de procedencia del anterior fabricante, la firma Reaktor Brennelement Union de la República Federal de Alemania.

Durante los programas de desarrollo se fabricaron 243 elementos combustibles (4 lotes de fabricación), que fueron totalmente sometidos a servicio nuclear normal en la CNA I (1978-1982), con un porcentual defectuoso de barras combustibles del 0,023%.

### 8.3. Fábrica de elementos combustibles

La tecnología de fabricación desarrollada en planta piloto, el personal capacitado y los equipos han sido transferidos a la Fábrica de Elementos Combustibles Nucleares (FECN). La fábrica está preparada para producir el combustible que utilizan por lo menos tres centrales nucleares: Atucha I, Embalse y Atucha II. Su producción permitirá generar 11 500 millones de kW·h de energía eléctrica por año. Para ello se requerirán 240 t anuales de uranio y 55 de Zircaloy.

Dicha fábrica, construída por la CNEA para abastecer sus centrales nucleoelectricas, está ubicada en el predio del Centro Atómico Ezeiza, en las afueras de Buenos Aires (Fig.5). Tiene una superficie cubierta de 11 600 m<sup>2</sup> y está dotada de servicios de infraestructura adecuados al objeto específico, en particular el control de humedad y temperatura en los locales principales de fabricación y el control de calidad. (Fig.6 )

## 9. SOCIEDAD INDUSTRIAL

Para operar la FECN, la CNEA ha constituido, junto con empresas locales de capital nacional, la sociedad anónima Combustibles Nucleares Argentinos (CONUAR S.A.). CONUAR alquila a CNEA las instalaciones de la FECN y adquiere de CNEA y de terceros los equipos e insumos necesarios para fabricar los elementos combustibles, con excepción del dióxido de uranio que recibe en uso.

La CNEA cede a CONUAR, mediante el pago de una regalía, los derechos de uso de las tecnologías de fabricación de los elementos combustibles y mantiene el derecho de propiedad de su tecnología y de las licencias a su nombre, en el caso de que existan. La CNEA mantiene el control estratégico de la empresa.

Los insumos de la FECN son, fundamentalmente, Zry-4 y dióxido de uranio (UO<sub>2</sub>). CONUAR comienza la fabricación de los elementos combustibles tipo Atucha I utilizando vainas y semiterminados de Zry-4 actualmente de origen importado.

En forma progresiva se utilizarán vainas y semiterminados de Zry-4 producidos en la Fábrica de Aleaciones Especiales de CNEA (FAE), para la fabricación de los elementos combustibles para las centrales nucleares Atucha I, Embalse y Atucha II. Se prevé que a partir de 1984, todos los elementos combustibles tipo Atucha I utilizarán Zry-4 nacional. A nivel planta piloto ya se han producido 11 000 m de tubos de Zry-4.

El  $UO_2$  natural es la materia fisionable usada en los reactores de potencia nacionales. Para las tres líneas se requieren aproximadamente 275 t/a de este material (140 t de uranio).

CONUAR utiliza para la fabricación  $UO_2$  producido en Alemania a partir del concentrado de uranio nacional. Se prevé que a partir de 1983 CONUAR comenzará a fabricar polvo de  $UO_2$  producido en el Complejo Fabril Córdoba de la CNEA.

La FECN inició su actividad industrial con la fabricación del combustible para abastecer la Central Nuclear Atucha I, con un consumo previsto de 400 elementos combustibles anuales. Las primeras entregas se produjeron a partir de mayo de 1982 a un ritmo aproximado de 30 elementos combustibles nucleares por mes.

Durante 1983 y 1984 se producirán, además, series reducidas de elementos combustibles de tipo CANDU destinados a la Central Nuclear Embalse. A partir de 1985, se prevé que CONUAR S.A. producirá la totalidad de los elementos combustibles necesarios para abastecer el funcionamiento de dicha Central.

Respecto de Atucha II, CONUAR S.A. fabricará los elementos combustibles de su primer núcleo durante 1985 y 1986, estando previsto que abastezca la totalidad de los elementos combustibles requeridos por las tres centrales nucleares: Atucha I, Embalse y Atucha II, a partir de 1987.

Para el estado de régimen de producción correspondiente a tres centrales nucleares, estimado en 237 t de uranio anuales, CONUAR S.A. tendrá una dotación de personal de aproximadamente 300 personas. En 1982, con la única producción de los elementos combustibles tipo Atucha I, el plantel de personal es de 120 personas.

La calidad requerida para los elementos combustibles exige contar con personal altamente calificado, no sólo en las tareas de control de calidad, sino también en todas y cada una de las etapas del proceso de fabricación. Dicho personal ha sido en su mayoría entrenado en la Planta piloto de la CNEA en las tareas específicas correspondientes. Es de hacer notar que, en razón de la alta confiabilidad exigida al combustible nuclear, su fabricación involucra el mantenimiento de una infraestructura de control de calidad muy superior a la usual en la industria electromecánica convencional.

Los procesos de fabricación desarrollados corresponden a los elementos combustibles destinados a la Central Nuclear Atucha I. Dicho elemento mide 6 m de largo, una longitud útil de 530 m, tiene un peso total de aproximadamente

210 kg, de los cuales 173 kg corresponden al  $UO_2$  (153 kg de uranio) y el resto a Zry y aceros especiales. El elemento combustible tiene 36 barras combustibles de 5,50 m de largo cada una, llenas de  $UO_2$ , un tubo vacío que actúa como soporte, 15 separadores intermedios y las estructuras de acoplamiento (Fig.4).

El elemento combustible tipo Atucha II, si bien actualmente en desarrollo, tendrá características similares al de tipo Atucha I, pero con 37 barras de un diámetro mayor en 1 mm y de mayor simplicidad en los separadores intermedios.

Los elementos combustibles del tipo CANDU, a ser utilizados en la Central Nuclear Embalse, de distinto diseño, presentan diferencias notables en sus dimensiones y peso. Su longitud total es de 50 cm, su peso total de 25 kg, de los cuales 21 kg corresponden al  $UO_2$  (19 kg de uranio). Tiene 37 barras combustibles provistas con tapones soldados, las que son mantenidas rígidamente en posición por dos grillas extremas de Zry-4.

La tecnología de fabricación de estos elementos y las maquinarias para el proceso de fabricación industrial están en estado avanzado de desarrollo por parte de la CNEA.

Para la provisión de elementos combustibles de uranio natural se requieren cuatro instalaciones a nivel industrial:

- extracción de mineral de uranio;
- elaboración del polvo de uranio sinterizable;
- fabricación de los semiterminados de Zircaloy;
- fabricación de los elementos combustibles.

El consumo de combustible nuclear, en toneladas de uranio contenido en los elementos combustibles, es de:

Central Nuclear en Atucha (CNA I) – 345 MW(e) netos  
61 t U/a = 400 elementos combustibles/año

Central Nuclear en Embalse (CNE) – 600 MW(e) netos  
92 t U/a = 5000 elementos combustibles/año

Central Nuclear en Atucha (CNA II) – 698 MW(e) netos  
84 t U/a = 450 elementos combustibles/año

Además se requieren : 55 t de Zry para vainas y semiterminados.

Otros materiales especiales utilizados son: acero inoxidable, helio y argón, nitrógeno líquido, hidrógeno de alta calidad, berilio y grafito de pureza nuclear.