

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina



Agradecimiento:

Nico y Mora, por ser la luz de mi vida.

Paola, porque sin vos no habría logrado esto.

Resumen

La energía nuclear es uno de los métodos de generación eléctrica que existe actualmente en el mundo. Los elementos combustibles representan por su elevado costo el principal insumo de las Centrales Nucleares y la falla de estos incrementa los residuos de alta actividad generados durante la operación. Por tal motivo, la industria invierte grandes esfuerzos en procurar mejorar la calidad de los mismos. El presente trabajo demuestra que el método implementado por Nucleoeléctrica Argentina S. A. en el seguimiento de la calidad de los elementos combustibles fabricados en el país, es óptimo dado que minimiza los costos incurridos y mantiene la tasa de fallas de los mismos en niveles acordes a los internacionales.

Palabras Claves

Elementos Combustibles, Centrales Nucleares, tasa de falla, método de seguimiento de calidad.

Índice

Resumen	3
Palabras Claves	3
Índice	4
Índice de Imágenes, Esquemas, Gráficos y Tablas	6
Introducción	9
Objetivo del trabajo de investigación.....	10
Variables del estudio de investigación	10
Tipo de investigación.....	10
Hipótesis del trabajo de investigación	11
Desarrollo Teórico	12
Capítulo 1. Energía Nuclear en Argentina	12
1.1. Generación nucleoelectrica.....	12
1.2. Generación nucleoelectrica en Argentina.....	13
1.2.1. Central Nuclear Atucha I	15
1.2.2. Central Nuclear Atucha II	16
1.2.3. Central Nuclear Embalse	17
1.3. Ciclo de combustible nuclear	18
1.4. Descripción de los elementos combustibles de las centrales.....	20
1.4.1. Elementos combustibles Atucha I	20
1.4.2. Elemento Combustible Atucha II	23
1.4.3. Elementos Combustible Embalse.	25
Desarrollo de la Investigación	29
Capítulo 2. Descripción de metodología de seguimiento de calidad empleado por Nucleoelectrica Argentina S.A.....	29

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

2.1.	Concepto de seguimiento de la calidad utilizado en el presente trabajo.....	29
2.2.	Estructura de Nucleoeléctrica Argentina para la gestión del suministro de los elementos combustibles.....	30
2.2.1.	Auditorías al sistema de garantía de calidad.....	30
2.2.2.	Inspección de calidad residente en el fabricante de combustibles.....	31
2.2.3.	Aceptación de cambios de ingeniería de producto o desvíos de fabricación.....	33
2.2.4.	Comité de seguimiento de aspectos de calidad.....	34
2.2.5.	Revisión independiente de los procesos de fabricación.....	35
2.2.6.	Comité de fallas de elementos combustibles.....	37
2.3.	Metodología utilizada en otras centrales a nivel mundial.....	38
2.3.1.	Metodología implementada cuando un fabricante produce para varias empresas operadoras de Centrales Nucleares.....	38
2.3.2.	Metodología implementada para un único fabricante que produce para una única empresas operadoras de Centrales Nucleares.....	39
Capítulo 3.	Análisis económico de los métodos de control de calidad.....	40
3.1.	Análisis económico del control realizado por NASA.....	40
3.1.1.	Costos del control de calidad utilizado por NASA.....	40
3.2.	Descripción del método de control de insumos clásico.....	41
3.2.1.	Determinación de tamaño de las muestras.....	46
3.2.2.	Determinación de la cantidad de elementos combustibles a inspeccionar.....	47
3.2.3.	Costo de la implementación de un control de insumos clásico.....	48
3.3.	Comparación de costos de métodos de control de calidad de los elementos combustibles.....	50
Capítulo 4.	Performance de los elementos combustibles nucleares.....	51
4.1.	Performance de los elementos combustibles nucleares a nivel mundial.....	51

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

4.2.	Performance de los elementos combustibles fabricados en Argentina.....	53
4.2.1.	Performance de los Elementos Combustible de la Central Nuclear Atucha I.....	53
4.2.1.1.	Conclusión de la performance de elementos combustibles Atucha I.....	60
4.2.2.	Performance de los Elementos Combustible de la Central Nuclear Embalse.....	61
4.2.2.1.	Conclusión de la performance de elementos combustibles Embalse	66
	Conclusión	70
Capítulo 5.	Conclusiones Finales	70
5.1.	Conclusiones finales.	70
	Bibliografía	72

Índice de Imágenes, Esquemas, Gráficos y Tablas

Imagen 1: Central Nuclear Atucha I.	16
Imagen 2: Central Nuclear Atucha II	17
Imagen 3: Central Nuclear Embalse.....	18
Imagen 4: Cajón de transporte de Elementos Combustibles tipo Atucha.....	22
Imagen 5: Separador rígido del Elemento Combustible Atucha I.....	24
Imagen 6: Separador rígido del Elemento Combustible Atucha II	24
Imagen 7: Elemento Combustible Atucha II	25
Imagen 8: Espaciadores soldados a las barras combustibles	26
Imagen 9: elemento combustible utilizado en la Central Nuclear Embalse	27

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Imagen 10: Cajón de transporte de elementos combustibles embalse	28
Imagen 11: Planes de muestreo simple para inspección simplificada.....	45
Esquema 1: Funcionamiento de una Central Nuclear	12
Esquema 2: Ciclo de Combustible en Argentina	19
Esquema 3: Elemento Combustible Atucha I	21
Esquema 4: barra combustible de un elemento combustible Embalse	26
Gráfico 1: Participación de las distintas fuentes en la generación de energía eléctrica.	15
Gráfico 2: Combustibles fallados cada 1000 extraídos del reactor.....	52
Gráfico 2: Tasa de falla anual de elementos combustibles de la Central Nuclear Atucha I	58
Gráfico 3: tasa de falla anual de elementos combustibles de la Central Nuclear Embalse.....	66
Tabla 1: tamaños de lotes y niveles de inspección	43
Tabla 2: tamaño de lote de elementos combustibles	46
Tabla 3: de tamaño de muestra por central nuclear	48
Tabla 4: de precio de los elementos combustibles.....	48
Tabla 5: de costo total de control de recepción	49
Tabla 5: de cantidad de elementos combustibles irradiados por años en la Central Nuclear Atucha.....	56

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Tabla 6: de elementos combustibles fallados en la Central Nuclear Atucha I..	57
Tabla 7: tasa de falla por tipo de elemento combustible de la Central Nuclear Atucha I	60
Tabla 8: cantidad de elementos combustibles utilizados y factor de carga de la Central Nuclear Embalse.....	63
Tabla de cantidad de elementos combustibles fallados por año en la Central Nuclear Embalse	65
Tabla 9: comparación de tasas de falla de los elementos combustibles CANDU	68

Introducción

El presente trabajo, estudia la metodología utilizada en el control de calidad de la fabricación de los elementos combustibles de las Centrales Nucleares en Argentina, con el objeto de determinar si el mismo es óptimo frente a los métodos de control por muestreo estadístico.

Lograr un método óptimo que ayude a reducir la tasa de falla de los elementos combustibles es de vital importancia, ya que los mismos son el principal insumo de las Centrales Nucleares y responsables de la generación de los residuos de alta actividad.

El presente estudio realiza una breve descripción de las Centrales Nucleares que se encuentran en Argentina y de la industria nacional involucrada en la fabricación y suministro de elementos combustibles nucleares.

Por tal motivo, la presente investigación estará centrada en la industria nuclear Argentina y se la comparará con la performance de los elementos combustibles con respecto a otras centrales en el mundo.

Se describen las acciones realizadas por Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NASA) en el seguimiento de fabricación de los elementos combustibles, a fin de controlar la calidad.

Asimismo se establecen las performance de las distintas centrales Argentinas y se las compara con los resultados de un estudio internacional de la performance de los elementos combustibles en Centrales Nucleares similares a nivel mundial.

Por último, a fin de determinar el método óptimo se determina el costo empleado actualmente por NASA en el seguimiento y control de fabricación y el que implicaría un método de control estadístico de recepción clásico por medio del cual solamente se controlarían los elementos combustibles recibidos en cada Central.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

El trabajo concluye en unas conclusiones finales de la investigación determinando si el método utilizado actualmente es el indicado o si se debería modificar o cambiar.

Objetivo del trabajo de investigación.

El presente trabajo de investigación busca determinar si el método aplicado actualmente por NASA en la verificación de la calidad de los elementos combustibles fabricados a nivel nacional es el óptimo en comparación de un método de control de recepción por muestro estadístico.

La aplicación de un método estadístico mediante un control de recepción sería aplicable, dado que el fabricante de los elementos combustibles está calificado y posee una experiencia de más de 30 años.

Definimos como el método óptimo aquel que minimiza el costo incurrido por NASA en el control de calidad a igualdad tasa de falla.

Variables del estudio de investigación

Se analizarán las siguientes 2 variables en el presente trabajo:

- Calidad de los elementos combustibles: para la medición de dicha variable se determina la performance de los elementos combustibles irradiados en las Centrales Argentinas durante los últimos 20 años. Para la performance se utilizara el indicador de tasa de falla por cada tipo de elementos combustibles, dado que las 3 Centrales Nucleares del país utilizan distintos tipos.
- Costo del método de control de calidad de los elementos combustibles. Se determinan los costos involucrados en la metodología actualmente aplicada por NASA y en la de control por muestreo de recepción.

Tipo de investigación

La investigación del presente trabajo es Descriptiva y No Experimental dado que se basa en la comparación entre metodologías de control de calidad y de

las performance de los elementos combustibles utilizados actualmente por NASA y las obtenidas a nivel internacional.

Hipótesis del trabajo de investigación

La hipótesis que se plantea en el presente trabajo será:

“El método aplicado por NASA actualmente, es el óptimo ya que minimiza los costos incurridos manteniendo la tasa de falla de los elementos combustibles en niveles comparables con los estándares internacionales”

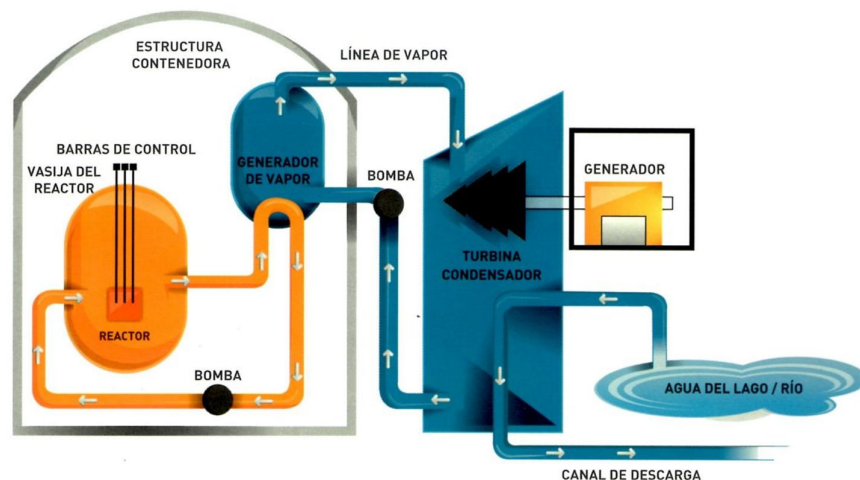
Desarrollo Teórico

Capítulo 1. Energía Nuclear en Argentina

1.1. Generación nucleoelectrónica

Una central nuclear, al igual que una central térmica, hidráulica o eólica, genera electricidad, mediante un generador eléctrico que es puesto en marcha de diferentes formas en cada caso.

En el caso de las centrales nucleares, para que el generador eléctrico instalado pueda producir energía eléctrica, es necesario que gire sobre su eje a una velocidad especificada, para lo que se utiliza una turbina de vapor. La turbina necesita para funcionar contar con un caudal de vapor a presión que, al incidir sobre los álabes la haga girar conjuntamente con el generador eléctrico. El método para lograr dicho caudal de vapor a presión es lo que diferencia a una central térmica convencional de una nuclear, es decir, que se diferencian por el origen del calor (energía primaria) necesario para iniciar el proceso.



Esquema 1: Funcionamiento de una Central Nuclear

Fuente <http://www.na-sa.com.ar/webroot/centrales/funcionamiento/>

Como se observa en el esquema en una central nuclear, el circuito agua-vapor o circuito secundario (circuito de color azul), funciona igual que el de cualquier central térmica convencional. La única diferencia que se observa entre ellas es

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

la forma de producir el vapor. El calor producido en el reactor por las sucesivas fisiones es transportado por el agua pesada del circuito primario (circuito de color naranja) hacia el generador de vapor y cedido al agua del circuito secundario a través de la pared de los tubos. Un reactor nuclear es un componente diseñado para crear las condiciones especiales a los fines que la reacción nuclear en cadena tenga lugar de manera controlada y sostenida dentro de sus límites de seguridad.

El agua (desmineralizada) del circuito secundario entra en ebullición y se transforma en vapor, incidiendo contra los álabes de una turbina que, al girar, arrastra el eje del generador eléctrico produciendo electricidad. El vapor pasa finalmente al condensador, donde su calor excedente es extraído a través de la pared de los tubos por medio del circuito de agua de refrigeración o circuito terciario. El agua condensada es enviada nuevamente al generador de vapor por medio de una bomba de extracción de condensado, cerrando así el ciclo.

1.2. Generación nucleoelectrónica en Argentina

La generación nuclear en el país se inició en la década del 60 cuando la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) comenzó con los estudios para la instalación de una central en la zona del Gran Buenos Aires.

Mediante una licitación internacional se adjudicó en 1968 la construcción al consorcio Siemens AG. En ese mismo año se iniciaron las obras de construcción en la localidad de Lima, Provincia de Buenos Aires de la Central Nuclear Atucha I Juan Domingo Perón (CNA-I), una central de 340 MWe de potencia bruta.

La construcción culminó en el año 1974, logrando la primera criticidad en el mes de enero y la operación comercial en junio de ese mismo año.

Simultáneamente con ello, en 1967 se firmó entre la Empresa Provincial de Energía de Córdoba y la CNEA, un contrato para la realización por parte de CNEA de un estudio de preinversión en la Provincia de Córdoba.

En el año 1973, adjudicó al consorcio formado por las empresas Atomic Energy of Canada Ltd (AECL) e Italmimpianti Societa Italiana S.p.a (IT), la construcción

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

de una central de 648 MWe de potencia bruta, la cual se ubicaría en la localidad de Embalse.

La Central Nuclear Embalse (CNE) comenzó a construirse en mayo de 1974 y entró en servicio comercial el 20 de Enero de 1984.

Por último, en 1979 se llamó a licitación por una central de agua pesada y uranio natural, del orden de 700 MWe de potencia bruta, la cual fue adjudicada a la empresa alemana KWU, subsidiaria de Siemens. Dicha Central tiene un diseño similar a la de CNA I con una potencia bruta de 745 MWe.

En 1980 se inició la construcción de la Central Nuclear Atucha II (CNA II), ubicada adyacente a la homónima. Luego de numerosos retrasos y detenciones de la construcción de la misma, se llegó al 6 de junio de 2014 en el cual se logró la primera criticidad de la CNA II.

En 1994 el Poder Ejecutivo resolvió reestructurar el sector nuclear y separar las actividades de investigación y desarrollo de las regulatorias y de generación. A tales fines se crearon, la empresa Nucleoeléctrica Argentina S.A (NASA) con el objeto de operar y construir las centrales nucleares de potencia en el país; la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) con el fin de regular la actividad; quedando la CNEA con el objetivo de la investigación y desarrollo.

Las Centrales Nucleares por su diseño funcionan como base de la generación de energía eléctrica, lo que implica que las mismas se encuentren en funcionamiento las 24 horas del día.

La participación de las Centrales Nucleares en la generación eléctrica del país ha disminuido desde un 15% al 4,23% en el año 2014, como se muestra en el siguiente gráfico. Esta disminución se debe a que las últimas cuatro décadas el incremento de la demanda energética ha sido cubierta con otras fuentes de generación principalmente térmicas (gas, fuel oil, etc.), perjudicando la matriz energética del país y elevando la generación de gases de efecto invernadero.

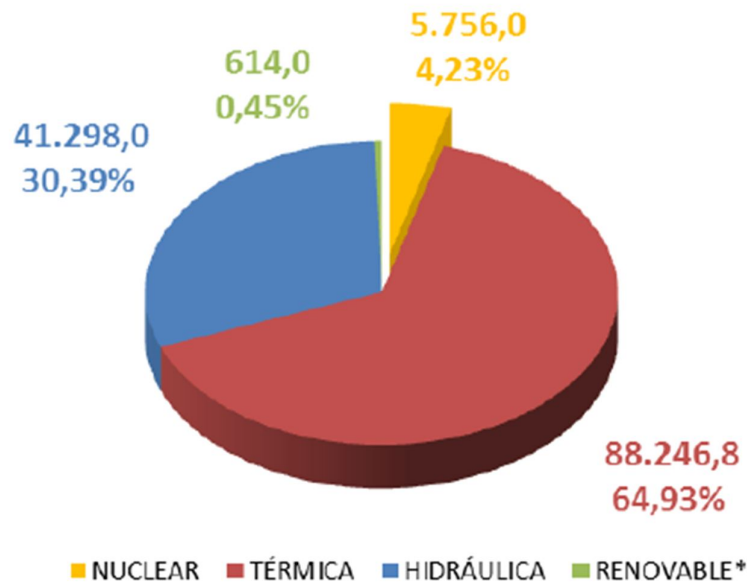


Gráfico 1: Participación de las distintas fuentes en la generación de energía eléctrica.

Fuente: Informe del Mercado Eléctrico, Diciembre de 2014, Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Comercial.

1.2.1. Central Nuclear Atucha I

La Central Atucha I es del tipo PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor) diseñado por Siemens, con una potencia neta de 335 MWe. Hasta 1997 el combustible utilizado era uranio natural (0,71% U^{235}), el que fue modificado a Uranio Levemente Enriquecido (ULE = 0,85% U^{235}). Se utiliza agua pesada como refrigerante y moderador y el reactor es del tipo de vasija presurizada.

Este cambio implicó una reducción del consumo de combustible del 45%, con la consiguiente disminución del costo de generación y la reducción de los residuos generados.

Esta modificación coloca a CNA I en ser la única central en el mundo que utiliza este tipo de combustibles.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Desde el punto de vista del diseño de los elementos combustible, la modificación aumentó los márgenes de seguridad de los mismos y optimizando la producción debido a la estandarización de distintos los componentes.

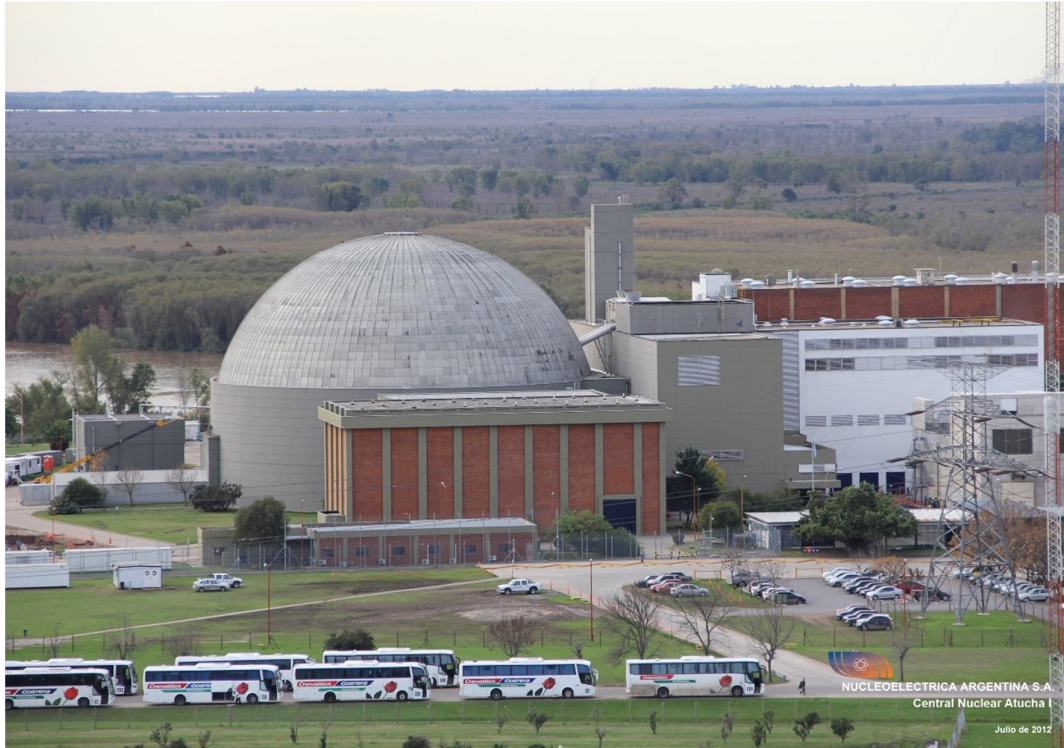


Imagen 1: Central Nuclear Atucha I.

Fuente: <https://www.flickr.com/photos/nucleoelectrica/8250096824/in/album-72157627915299046/>

1.2.2. Central Nuclear Atucha II

Al igual que CNA I, la CNA II es del tipo PHWR con una potencia neta de 700 MWe. Como medio refrigerante y moderador utiliza agua pesada y como combustible uranio natural.

CNA II es una evolución de CNA I, con mejoras atinentes a la seguridad y a postulados de diseños más exigentes.

Respecto a los combustibles, los mismos son similares a los de CNA I con excepción de los separadores los cuales son una estructura de chapa.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Asimismo, los elementos combustibles de CNA II poseen un 20% más de masa de uranio que los de su predecesora.



Imagen 2: Central Nuclear Atucha II

Fuente: <https://www.flickr.com/photos/nucleoelectrica/9518306172/in/album-72157627791169957/>

Las Centrales CNA I y CNA II son las únicas en su tipo en el mundo, por lo que no se posee una similar con la cual poder compararse.

1.2.3. Central Nuclear Embalse

La CNE es del tipo CANDU-PHW con una potencia neta de 600 MWe. Su diseño es un reactor tipo CANDU 6 refrigerado y moderado por agua pesada. El combustible utilizado es uranio natural.

A diferencia de los reactores diseñados por Siemens, existe actualmente 11 reactores en funcionamiento del tipo CANDU 6 (CANDU Energy, 2011) .

La Central está ubicada a orillas del embalse Río III en la localidad de Embalse, provincia de Córdoba.



Imagen 3: Central Nuclear Embalse

Fuente: <https://www.flickr.com/photos/nucleoelectrica/6253780133/in/album-72157627790697007/>

1.3. Ciclo de combustible nuclear

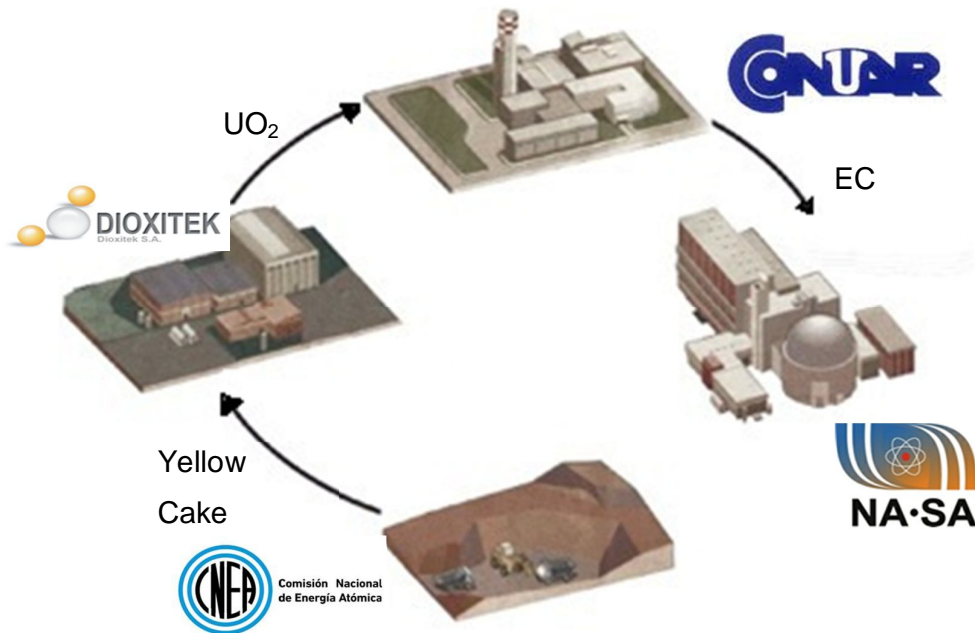
Se llama ciclo de combustible nuclear a todo el proceso involucrado desde la minería de uranio, pasando por la fabricación de los elementos combustibles, la irradiación en las centrales hasta su disposición final.

Existen 2 tipos de ciclos, el llamado abierto en el que al combustible una vez irradiado se le realiza su disposición final. En cambio el ciclo cerrado, al combustible irradiado se le realiza un reproceso mediante el cual se recupera el uranio no utilizado y el plutonio generado para fabricar nuevamente combustibles. Con los restantes componentes de alta actividad se procede a su disposición final.

En Argentina por distintos motivos, se ha decidido optar por el ciclo de combustible abierto.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

En la siguiente figura siguiente se esquematiza el ciclo de combustible y las empresas que existen en cada proceso.



Esquema 2: Ciclo de Combustible en Argentina

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Dado que el proceso de enriquecimiento de uranio es oneroso y complicaciones políticas ya que es necesario para producir bombas atómicas, Argentina decidió optar por Centrales Nucleares utilizaran uranio natural y agua pesada de manera de lograr una independencia energética. Este punto fue modificado en la Central Nuclear Atucha I en la década de los 90', ya que comenzó a utilizar elementos combustibles fabricados con una mezcla de uranio natural y enriquecido.

La minería de uranio realiza la extracción del mineral utilizando distintos métodos, procediendo posteriormente a realizar la concentración del material llegando a un contenido entre el 60 y 70% de uranio. Dicho material es el concentrado de uranio o como se lo conoce comercialmente Yellow Cake.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

El uranio utilizado en las centrales nacionales se extraía de minas ubicadas en el país, siendo la mina de Sierra Pintada de Mendoza la última que estuvo operativa. La misma fue operada por la Comisión de Energía Atómica pero por razones económicas, el precio del uranio en esos años fueron los mínimos históricos, en el año 1994 se debió comenzar a importar el Yellow Cake de distintos países entre los que se encuentran Canadá y Kazajstán.

Este material es recibido por la firma DIOXITEK que en su planta radicada en Córdoba, convierte el concentrado de uranio en 99,9% dióxido de uranio calidad nuclear.

El polvo de dióxido de uranio, es transportado a CONUAR donde se fabrican los elementos combustibles.

Estos combustibles son irradiados en las Centrales Nucleares para la generación de energía eléctrica. Luego de su utilización, son depositados en piletas ubicadas en las centrales o en silos en el caso de la Central Embalse.

1.4. Descripción de los elementos combustibles de las centrales

En el presente apartado se describe brevemente cada tipo de elemento combustible utilizado en las Centrales Nucleares en Argentina.

Como definición general, un elemento combustible es una estructura formada por un conjunto de barras combustibles, las cuales son básicamente tubos de Zircaloy cargados con pastillas de dióxido de uranio. El mismo posee un arreglo específico para ser cargados en un determinado reactor nuclear.

1.4.1. Elementos combustibles Atucha I

Los elementos combustibles fueron diseñados por KWU-RBU, empresa subsidiaria de Siemens de Alemania, la cual diseñó la Central,

Dichos elementos combustibles estaban formados por un conjunto de 36 barras combustibles en un arreglo circular, de 6.020,5 mm de longitud por un diámetro de cada barra de 10 mm.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Las barras combustibles son de sección circular y contienen uranio natural como material fisil.

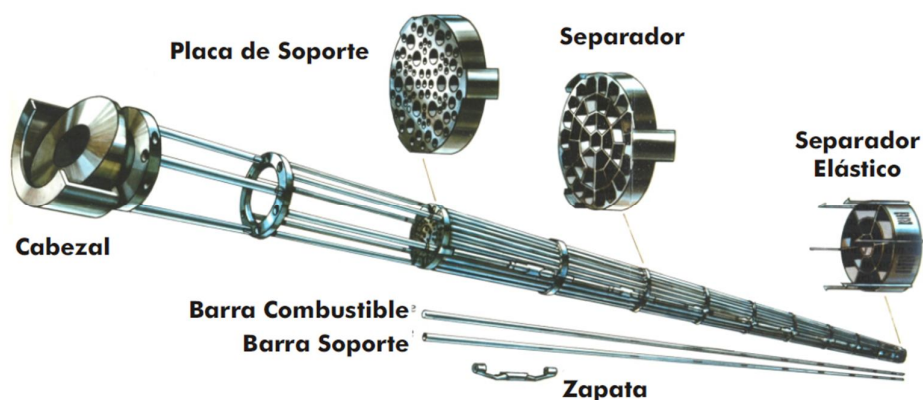
Dichas 36 barras junto a una barra estructural se encuentran fijadas en sus extremos superiores por medio de una placa portante y a distancias especificadas se encuentran 15 separadores rígidos de Zircaloy que poseen la finalidad de mantener la configuración del elemento combustible. Adicionalmente en el del extremo inferior se encuentra un separador elástico adicional, para dotar de mayor rigidez al conjunto.

La mencionada barra estructural cumple la función de sostener en su posición a cada uno de los separadores, como así también, de ajustar a los combustibles a los canales ubicados en el reactor mediante unas zapatas elásticas.

En la parte superior del elemento combustible se encuentra un acople el cual vincula los EC con el cuerpo de relleno y el cuerpo de cierre, configurando este arreglo una columna combustible.

Dicha columna combustible se introduce en uno de los 250 canales del reactor de la Central para su utilización en la generación eléctrica.

La siguiente figura es un esquema básico de un combustible Atucha I.



Esquema 3: Elemento Combustible Atucha I

Fuente: <http://www.cnea.gov.ar/sites/default/files/Consideraciones%20Particulares%20del%20Combustible%20Nuclear.pdf>

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

El diseño original alemán, fue modificado a fines de los 90' con el remplazo del uranio natural por uranio levemente enriquecido en un 0,85% de U^{235} .

Este cambio hace que la Central Nuclear Atucha I sea la única Central en el mundo que utilice uranio levemente enriquecido.

Posteriormente se remplazó la barra estructural por una barra combustible de modo de incrementar en un 3% la masa del uranio contenida en los elementos combustibles.

Gracias a ambos cambios realizados en el país, el consumo de elementos combustibles se redujo en un 50%, lo que reviste en una reducción de al menos un 15% en los costos de generación.

Los combustibles son embalados en el fabricante y cargados en cajones especiales para su transporte a las Central Nuclear. En la siguiente imagen se muestra el contenedor para transporte.



Imagen 4: Cajón de transporte de Elementos Combustibles tipo Atucha

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

1.4.2. Elemento Combustible Atucha II

El elemento combustible utilizado en la Central Nuclear Atucha II es similar al utilizado en Atucha I con la salvedad de las siguientes diferencias:

- El combustible utiliza Uranio Natural, el cual posee una concentración de 0,72% de U^{235} como material fisil.
- Los separadores están conformados por un conjunto de chapas plegadas y soldadas.
- Posee 13 separadores siendo 12 de Zircaloy y en inferior de Inconel.
- Las barras tienen un diámetro de 11 mm.

Las diferencias que existen respecto a los elementos combustibles de Atucha I, con excepción del Uranio Natural, se deben en principio a la optimización del combustible, ya que se incrementa la masa de uranio y se reduce las pérdidas de material con el cambio de diseño de los separadores.

En las siguientes imágenes se muestra un separador rígido utilizado en los elementos combustibles tipo Atucha I y el separador de chapa de los elementos combustibles tipo CNA-II.

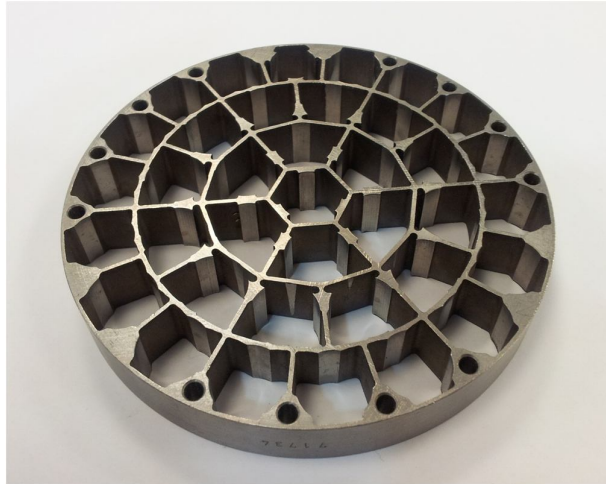


Imagen 5: Separador rígido del Elemento Combustible Atucha I

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

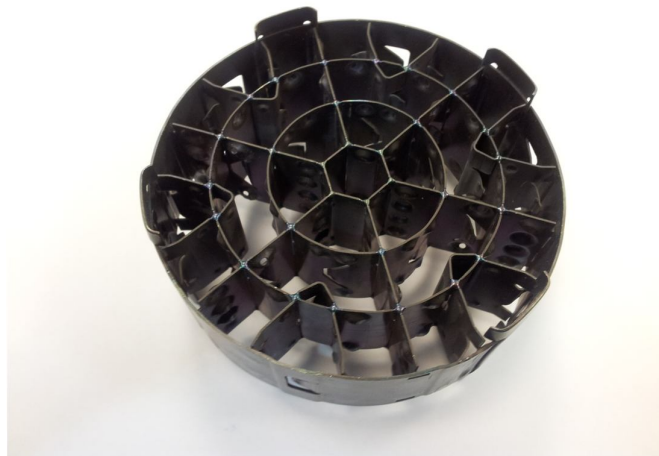


Imagen 6: Separador rígido del Elemento Combustible Atucha II

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

En la siguiente imagen se muestra un elemento combustible Atucha II colocado en el banco de montaje de los mismos.

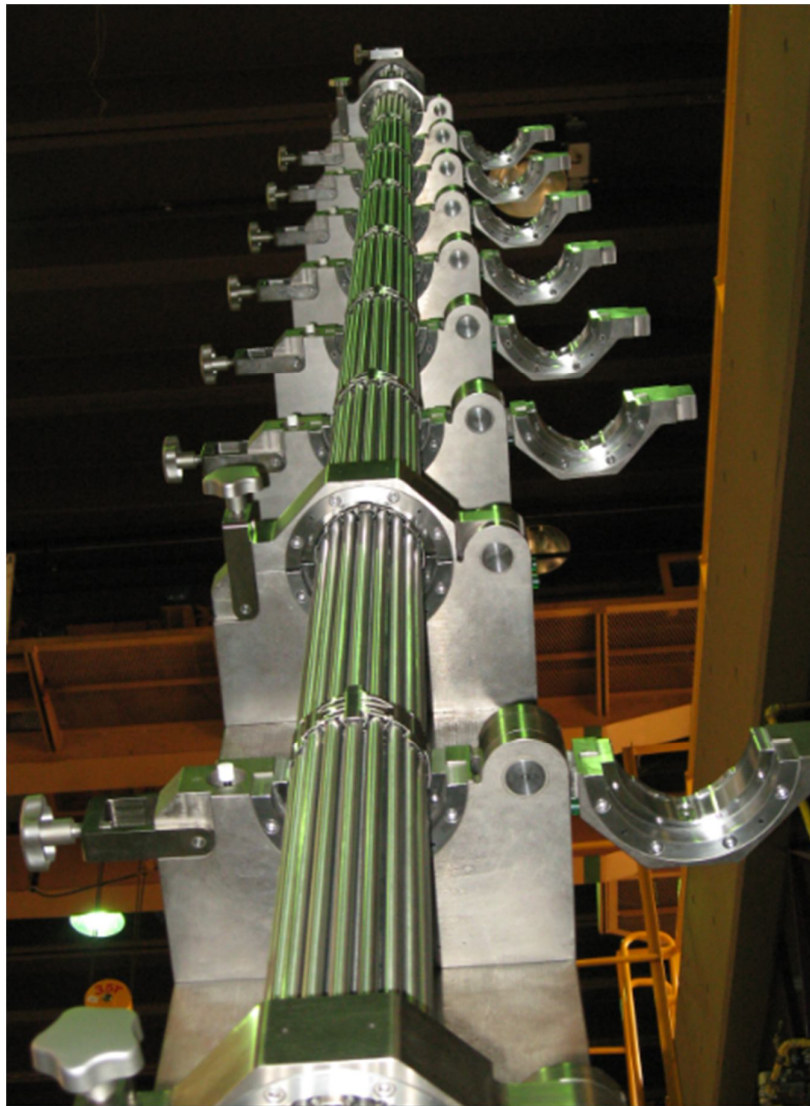


Imagen 7: Elemento Combustible Atucha II

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

1.4.3. Elementos Combustible Embalse.

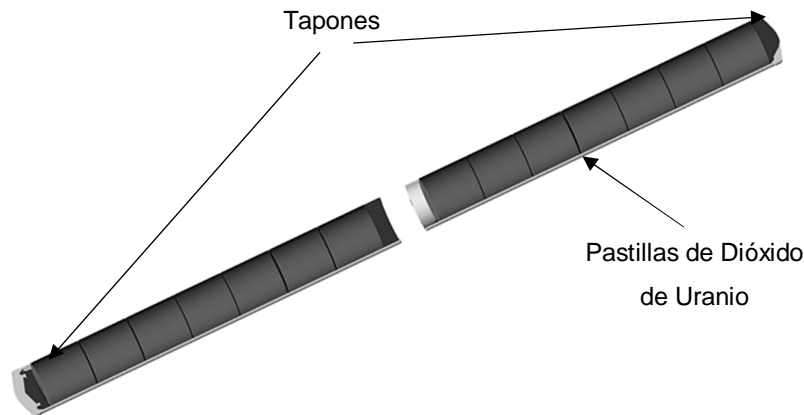
Los elementos combustibles utilizados en la Central Nuclear Embalse, posee una configuración circular de 37 barras, pero a diferencia de los anteriores, la longitud es de 520 mm.

Las barras combustibles son de sección circular de 13 mm y en sus extremos se encuentran soldados sendos tapones. El interior de la barra combustible se

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

cargan las pastillas sinterizadas de dióxido de uranio. Asimismo en la cara externa, posee soldados espaciadores los cuales mantienen separadas a las barras combustibles entre sí.

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente una barra combustibles y una imagen de los espaciadores:



Esquema 4: barra combustible de un elemento combustible Embalse

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible



Imagen 8: Espaciadores soldados a las barras combustibles

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Estas barras combustibles en un arreglo circular están soldadas en sus extremos a unas grillas, por medio de la cual mantienen sus posiciones relativas.

En la siguiente imagen se puede observar una foto de un elemento combustible típico de los utilizados en la Central Nuclear Embalse. En el extremo se puede visualizar la grilla combustible que sostiene a las barras combustibles.



Imagen 9: elemento combustible utilizado en la Central Nuclear Embalse

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Estos elementos combustibles son embalados en cajones, como el de la siguiente imagen, para el transporte en camión a la Central Nuclear Embalse.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina



Imagen 10: Cajón de transporte de elementos combustibles embalse

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Por su menor dimensión, su fabricación y manipuleo es más simple, aunque el consumo de este tipo de combustibles es entre 10 y 20 veces superior a los tipo Atucha.

Desarrollo de la Investigación

Capítulo 2. Descripción de metodología de seguimiento de calidad empleado por Nucleoeléctrica Argentina S.A.

2.1. Concepto de seguimiento de la calidad utilizado en el presente trabajo.

El sistema de gestión de la calidad básicamente es el conjunto de normas adoptadas por una empresa u organización, en base a las cuales desarrolla las actividades necesarias para obtener un producto o servicio de calidad con el fin de satisfacer al cliente.

Dentro de la gestión de la calidad se encuentra el concepto de mejora continua lo que posibilita que el sistema sea dinámico y que evolucione para lograr la máxima calidad posible con las restricciones existentes. Por tal motivo, el sistema de gestión de la calidad debe vincular los recursos, equipamiento, materiales y el conocimiento que posee la organización, para alinearlos en el cumplimiento de los objetivos de la organización.

Existen diversas organizaciones de normalización que establecen los requisitos que se deben cumplir para implementar un sistema de calidad, entre los cuales el más conocido es ISO "International Standard Organization" (Organización Internacional de Normalización). Estos organismos generan la ventaja a los clientes, dado que otorga a los mismos una idea de la organización de la calidad que posee un proveedor que está certificado

En el presente trabajo se considerará el seguimiento de la calidad desde el punto de vista del cliente, por lo que se incluye, además del requerimiento al proveedor poseer vigentes las certificaciones de las norma ISO 9001, ISO 14000, OHSAS 18000 y ASME, las acciones directas que realiza NASA en la verificación de la calidad del producto.

Estas acciones se describen detalladamente en el punto 2.2 del presente y es lo que distingue a NASA respecto a similares compañías.

2.2. Estructura de Nucleoeléctrica Argentina para la gestión del suministro de los elementos combustibles.

Al ser los elementos combustibles el principal insumo de NASA, esta posee dos contratos exclusivos de provisión de dióxido de uranio (DIOXITEK-NASA) y de suministro de elementos combustibles (CONUAR-NASA), los cuales reglan los suministros y estipula el derecho de NASA a tener acceso a toda la documentación y acciones del proveedor probatoria de la calidad de los productos.

Dada la importancia que posee estos insumos es que NASA en su estructura posee el Departamento Gestión Ciclo de Combustible, el que tiene por objetivo entender en todo lo referente al suministro a las Centrales de los Elementos Combustibles.

En ese marco, el mencionado Departamento realiza distintas acciones, que se describen a continuación, de forma de asegurar la calidad de los elementos combustible.

2.2.1. Auditorías al sistema de garantía de calidad

NASA dentro de su estructura posee una Gerencia de Garantía de Calidad, la cual realiza auditorías a los distintos sectores de la institución verificando el cumplimiento de los procedimientos establecidos.

Dicha gerencia por tal motivo posee el conocimiento y la experiencia en la realización de auditorías a los sistemas de garantía de calidad. Por tal motivo, adicionalmente a las auditorías que realiza el ente certificador de las Normas ISO que posee CONUAR, NASA realiza anualmente una auditoría al sistema de gestión de la calidad.

A diferencia de las auditorías realizadas por los entes certificadores de Normas ISO que verifican en forma global al sistema de garantía de calidad de la compañía, las realizadas por NASA son específicas y determinadas en función del seguimiento realizado al fabricante durante el último año.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Cuando se habla de auditorías específicas se refiere a que se aborda en cada una un área en particular, a modo de ejemplo son: laboratorios de calibración de instrumentos, gestión documental de ingeniería de producto, calificación de personal, etc. Asimismo se busca que el área a auditar tenga vinculación directa con la calidad del producto o del proceso de fabricación.

En las mismas se realiza un plan de auditoría en el que se analiza toda la documentación aplicable al proceso o área a auditar, el cual es comunicado a CONUAR con 30 días de anticipación.

Las auditorías tienen una extensión de 3 días, comenzando con una reunión inicial en que están presente las jefaturas involucradas donde se expone los objetivos, el alcance y la documentación aplicable. Luego se pasa a la etapa de inspección en campo verificando el cumplimiento de lo establecido en el manual, procedimiento, instrucciones y/o formularios.

En estas inspecciones en campo, también se observa el grado de conocimiento y cumplimiento de la documentación aplicable en cada caso por parte del personal involucrado, de forma de conocer el grado que posee la gente respecto a la cultura de la calidad y de la seguridad.

Por último, en el tercer día se realiza una reunión de cierre en la cual el auditor de NASA hace un resume de las acciones realizadas y de las observaciones halladas, las cuales son tratadas con el auditados con el fin de evitar alguna mala interpretación.

Las no conformidades, observaciones y áreas de mejoras son comunicadas formalmente, para lo cual CONUAR debe presentar el plan de acciones correctivas con el cronograma pertinente. Las acciones correctivas son seguidas en el comité de seguimiento de aspectos de calidad y verificadas en la auditoría del siguiente año.

2.2.2. Inspección de calidad residente en el fabricante de combustibles

NASA posee 3 inspectores que residen permanentemente en la planta de CONUAR, cuya misión es verificar el cumplimiento por parte del proveedor de planos y especificaciones del producto, como así también, verificar las

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

calificaciones tanto de los procesos de producción como el personal involucrado.

Dicha tarea se encuentra especificada en Instrucciones de Trabajos las cuales establece desde la documentación con que debe contar la inspección de NASA, los parámetros de procesos que se deben verificar, la frecuencia que se debe realizar los controles, las verificaciones de registros de calidad para la aceptación de los elementos combustibles, hasta las formas y medios de comunicaciones con el proveedor.

Esta tarea es cumplida por los inspectores en recorridas diarias de la planta verificando en cada punto las novedades y los resultados de cada procesos, los cuales son registrados en protocolos de la inspección.

Los inspectores tienen derecho a presenciar cualquier proceso, ensayo y/o verificación del producto que realice el proveedor, como así también solicitar la repetición de los mismos.

Adicionalmente a los controles de los procesos efectuados sobre los productos realizados por los inspectores, se verifican de las calibraciones de la instrumentación de control, como así también, la vigencia de la habilitación del personal involucrado en el proceso.

Antes de cada entrega el fabricante entrega a la inspección un Certificado de Liberación, mediante el cual el proveedor documenta el cumplimiento de todos los controles y ensayos, y que los Elementos Combustibles se ajustan a planos, especificaciones y a toda otra documentación técnica aplicable. Con la firma de este documento el fabricante libera los productos para su uso nuclear, haciéndose responsable ante cualquier falla de los mismos.

Dicho certificado, es suscripto también por los inspectores de NASA aceptando los combustibles involucrados en la entrega.

El mantener permanentemente inspectores en la planta del fabricante, posee la ventaja de que el cliente verifica la calidad del producto desde la recepción de la materia prima e insumos, los procesos de fabricación y hasta los controles finales. De esta forma, NASA se evita la realización de controles de recepción

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

que demandaría la realización de ensayos destructivos con la pérdida de producto.

Otra de las ventajas es que NASA puede hacer un seguimiento de los cambios y/o acciones correctivas que realice, como así también, solicitar rápidamente controles adicionales ante desviaciones detectadas.

2.2.3. Aceptación de cambios de ingeniería de producto o desvíos de fabricación

Contractualmente NASA requiere que la ingeniería de producto sea contratada por CONUAR a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

Sin embargo, NASA posee el derecho de veto a las decisiones adoptadas por CNEA respecto a cambios o resoluciones de desviaciones de fabricación.

Para ello, el fabricante debe comunicar simultáneamente a CNEA y NASA los pedidos de cambio y/o desviaciones, de modo de poder analizar las mismas.

De esta forma NASA se reserva el derecho de no aceptar resoluciones que desde un punto técnico son correctas, pero que su aplicación produciría un perjuicio económico.

A modo de ejemplo, se podría mencionar el caso en que se produzca una desviación de baja isotopía en el uranio. Desde el punto de vista técnico, esta desviación sería aceptable técnicamente ya que esta merma en la isotopía exigiría menos al combustible, pero es inaceptable comercialmente porque estos combustibles generarían menos energía por lo que aumentaría el consumo de los mismos.

La presente configuración del suministro de ingeniería de producto tiene la ventaja de que NASA consigue el aporte técnico y de know how que posee CNEA, que es la mayor institución científica de Argentina en la actividad nuclear, paralelamente a que NASA posea la posibilidad de decisión de aplicación de las distintas resoluciones.

2.2.4. Comité de seguimiento de aspectos de calidad

Existe un comité de seguimiento de aspectos de calidad el cual está integrado por la Gerencia de Garantía de Calidad de CONUAR y NASA, el cual se reúne trimestralmente.

El objetivo es generar un ámbito en el cual poder abordar exclusivamente los temas relacionados a calidad, por lo que en el mismo no puede estar presente personal de producción o ingeniería del proveedor, dado que son los sectores que básicamente reciben el control. También al excluir a estos sectores genera la oportunidad al cliente de empoderar al personal de calidad frente al resto de los sectores.

En el comité se realizan el seguimiento de las observaciones encontradas en las restantes actividades realizadas por NASA, como así también, se acuerdan mejoras en los controles de procesos.

A modo de ejemplo se expone un proyecto de mejora que se encuentra en desarrollo que es la eliminación de los controles 100% humanos mediante la aplicación de alguna de las siguientes alternativas:

- Modificando el control de proceso que haga innecesario el control humano.
- Modificación del control de modo de mejorar su performance, no dependiendo tanto del humano. Ejemplos puede ser en controles dimensionales utilizar calibres pasa - no pasa, o un dispositivo de medición asociado a un software que registre e indique al operador el resultado.
- Reemplazo del control 100% humano por un control automático. En este punto básicamente se está desarrollando mediante la aplicación de la visión artificial.

El proyecto se enfoca en los controles humanos 100%, ya que sabemos que estos fallan. A esto se adiciona que al revisar la totalidad de las piezas en un proceso se las asume controladas, por lo que no se las vuelve a verificar en los

siguientes, entonces de producirse un error en el control el mismo avanzaría en la línea.

El comité en cada reunión define las acciones y proyectos a desarrollar en el próximo trimestre el cual es verificado en la siguiente reunión. También anualmente se realiza una reunión con las máximas autoridades de ambas empresas, en donde se exponen los avances y se definen los proyectos que serán implementados en el año siguiente.

2.2.5. Revisión independiente de los procesos de fabricación

Todos los controles, revisiones o seguimientos se realizan con las piezas o productos ya fabricados, por lo que siempre se realizan acciones reactivas y con un costo asociado a los retrabajos o rechazo de las piezas observadas.

En función de ello se desarrolló un método de revisión de procesos el cual tenga por objeto detectar apartamientos de procesos de lo establecido, evaluar el cumplimiento de los operadores de los requerimientos y determinar posibles mejoras.

El método consiste en las siguientes etapas:

1. Selección del proceso a estudiar. Se debe elegir un conjunto de tareas que se puedan identificar y agrupar de todo el proceso productivo, al que se lo llamará proceso. Se identifican los insumos y productos del proceso, las variables controladas del mismo y toda la documentación técnica aplicable (especificaciones de producto, instrucciones de trabajo, calificaciones de procesos involucrados, listado de parámetros, formularios de controles, etc).
2. Recolección de documentación aplicable del proceso y búsqueda de estándares, metodologías y normas de procesos similares realizado en otras industrias.
3. El grupo que realizará la inspección independiente realiza un estudio exhaustivo de toda la documentación, determinando el estándar esperado del proceso que se estudiará. Para ello, deben reunirse medio

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

día full time y utilizar distintos métodos para determinar el estándar requerido al proceso.

4. Inspección en el campo. La misma consiste en la visualización del proceso estudiado durante las inspecciones que hacen los inspectores rutinariamente. En esta etapa se intenta de interferir lo menos posible en el proceso, de forma de no afectar el comportamiento del operador. De esta forma se podrá identificar la diferencia entre lo requerido en el procedimiento o instrucción aplicable y lo realmente realizado por los operadores. Este punto es fundamental, ya que al ser tareas repetitivas generalmente se dejan de hacer pasos que estaban estipulados. Siempre existe la fatídica frase de “*siempre lo hice así no pasó nada*”.

Todos los hallazgos producidos en esta etapa deberán ser detallados en un formulario específico, en donde se describe lo observado y una justificación del porque es un hallazgo.

Este seguimiento se realiza durante uno 10 días aproximadamente, de forma de poder observar todos pasos del proceso, los distintos operadores que realizan operaciones y el nivel de control que ejerce la supervisión.

5. Determinación del estado real del proceso. Con todos los hallazgos realizados y los estándares establecidos previamente, el grupo de la inspección independiente se vuelve a reunir analizando cada observación agrupándolas en áreas de mejoras y/o fortalezas.

A cada área de mejora se propone una acción correctiva, las cuales se plasman en un informe.

El grupo de la inspección independiente se reúne con el responsable de calidad del fabricante y se le comunica los resultados obtenidos. En dicha reunión se acuerda las acciones que se implementarán, las cuales integrarán el seguimiento realizado trimestralmente por el comité de seguimiento de aspectos de calidad.

La inspección independiente tiene la ventaja en que se logra analizar detalladamente la performance de un proceso, detectando los pequeños apartamientos no detectados por los controles generales.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

También genera una oportunidad de analizar críticamente tareas, controles y equipamiento, que debido al acostumbramiento no se realizan. Por ese motivo, se deben respetar los tiempos de cada etapa y principalmente cuando se reúne el grupo debe ser full time asignada a esa tarea.

La revisión independiente es el principal método de control preventivo debido a que se logra hacer un análisis crítico de los procesos individualmente encontrando las mejoras que hacen el proceso sea más robustos y que la calidad del producto del mismo sea uniforme y sostenible en el tiempo.

2.2.6. Comité de fallas de elementos combustibles

Contractualmente está definida una cantidad de elementos combustibles fallados a partir del cual se debe convocar a un comité de fallas, el cual está integrado por representantes de CNEA, CONUAR y NASA.

Se fija un nivel de fallas de manera de definir límite, más allá del cual, la investigación de la causa la debe realizar el fabricante en conjunto con todos los sectores nacionales que poseen el conocimiento sobre combustibles nucleares.

El Comité debe realizar la búsqueda de la causa raíz, para ello, puede solicitar documentación de la fabricación y utilización de los combustibles, convocar a distintos especialistas y realizar ensayos adicionales. El mismo tiene independencia de las instituciones y posee presupuesto propio.

Los informes elaborados son presentados a las máximas autoridades de cada institución, como así también, responder a los requerimientos emitidos por el ente regulador de la actividad.

Para el análisis y determinación de la causa raíz el Comité tiene 6 meses, los que pueden ser prorrogados por las máximas autoridades de las instituciones involucradas.

2.3. Metodología utilizada en otras centrales a nivel mundial

Las metodologías aplicadas de control de la calidad de los elementos combustibles a nivel mundial se las puede dividir en dos grandes grupos: el formado por un fabricante de elementos combustibles para múltiples Empresas operadoras de Centrales Nucleares, y por el que el fabricante solo produce a un operador.

2.3.1. Metodología implementada cuando un fabricante produce para varias empresas operadoras de Centrales Nucleares

En este grupo se destacan las Centrales tipo PWR y BWR que utilizan uranio enriquecido y el caso de las Centrales tipo CANDU que se encuentran en Canadá que son provistas por solamente dos fabricantes (General Electric y CAMECO).

En este caso las operadoras de Centrales Nucleares realizan licitaciones por la provisión de los elementos combustibles por un cierto tiempo.

En dichas licitaciones solo participan fabricantes previamente calificados por el cliente y se establece en los contratos multas por fallas de los elementos combustibles.

Entre todos los fabricante calificados existe una gran competencia, por lo que la tasa de falla obtenida por ellos es uno de los principales datos que requieren los compradores a la hora de seleccionarlos.

Este hecho, hace que los fabricantes realicen grandes esfuerzos para controlar la calidad del producto, lo que hace que los consumidores de los elementos combustibles no necesitan hacer un control por ellos mismos.

Asimismo, los fabricantes son grandes compañías con volúmenes de producción que logran economías de escala, lo que permite al proveedor distribuir los costos de los controles de calidad en diferentes clientes.

2.3.2. Metodología implementada para un único fabricante que produce para una única empresas operadoras de Centrales Nucleares

En este grupo se encuentran países en que todo el ciclo de combustibles nuclear es administrado por una única empresa estatal.

Por tal motivo, al estar tanto el sector que fabrica los elementos combustibles, como el que opera las Centrales Nucleares dentro de una misma empresa, no existen verificaciones cruzadas respecto al control de calidad.

Capítulo 3. Análisis económico de los métodos de control de calidad

3.1. Análisis económico del control realizado por NASA

En el presente apartado, se analizará los costos involucrados en las acciones que realiza NASA en el seguimiento y control de la calidad de los elementos combustibles utilizados en las Centrales Nucleares del país.

Para poder evaluar si los costos asumidos por NASA en mantener un sector específico para el seguimiento de la calidad de fabricación son óptimos, se realizará una comparación con el costo que implicaría la verificación de la calidad mediante control de recepción de insumos clásico.

Nos referimos a un control de recepción de insumos clásico, al que habitualmente realizan las empresas cuando reciben insumos, que consiste en un control de recepción por muestreo estadístico.

3.1.1. Costos del control de calidad utilizado por NASA

Nucleoeléctrica Argentina posee un sector específico para el seguimiento tanto de los temas comerciales, como así también, de la fabricación y el control de la calidad de los elementos combustibles fabricados nacionalmente para las Centrales Nucleares de Potencia.

Este sector, entre otras, realiza las acciones descriptas precedentemente, para lo cual cuenta con 7 personas abocadas al seguimiento de los aspectos técnico del suministro de los elementos combustibles.

Dichas personas se distribuyen en 3 inspectores residentes en el fabricante como se describió anteriormente y 4 personas en las oficinas centrales que se dividen en 2 jefaturas y 2 profesional de asistencia.

Por otra parte el sector posee 3 personas adicionales que entre las tareas que realizan, brindan apoyo al personal involucrado en el control de calidad.

A valores de 2014 para NASA los salarios de las 10 personas (7 involucradas directamente y 3 de apoyo) tenían un costo total anual de AR\$ 6.900.000 los cuales incluyen salarios, aguinaldos, premios, aportes y viáticos.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Se desprecian los costos de asistencia al sector como serían de recursos humanos, de finanzas y de compras, ya que por el tamaño del sector no es significativo frente a toda la empresa (10 personas frente a ≈ 3.000 personas).

A este costo se adiciona un 10% en concepto de infraestructura, papelería, recursos informáticos, amortización de bienes de oficina, telefonía, etc.

Considerar un 10% es extremadamente conservativo, ya que el trabajo del personal de las oficinas centrales es netamente administrativo, por lo que su labor no representa grandes costos para NASA, en cambio el costo de infraestructura para el desarrollo de las tareas, que también son netamente administrativas, de las 3 personas residentes en el fabricante es asumido por el proveedor. Nos referimos a tareas administrativas, ya que el sector no requiere de maquinaria o equipamiento sofisticado ni de la realización de ensayos técnicos.

En función de ello, el costo total de que afronta conservativamente NASA para el seguimiento del suministro de los elementos combustibles es de AR\$ 7.590.000 a valores del año 2014.

Otro valor a tener en cuenta, es que el costo total que debe asumir NASA del sector representa aproximadamente el 1% del monto involucrado en los suministros gestionados y controlados por el área.

3.2. Descripción del método de control de insumos clásico

En el caso del presente estudio un control de insumos consistiría en que NASA realice un control de muestreo en la recepción de cada lote de elementos combustibles en cada Central.

Para la determinación del tamaño de la muestra en el presente trabajo se utilizará la Norma IRAM 15.3, "Sistemas de muestreo para la inspección por atributos. Parte 3 - Sistemas de muestreo de lotes salteados", que se encuentra vigente desde el 15/10/10, la cual se basa en la Norma ISO 2859-3.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Dicha Norma ISO se fundamenta asimismo en la Norma MIL. STD. 105 D, la cual fue desarrollada por las fuerzas armadas de EEUU durante la segunda guerra mundial para el control de recepción de los pertrechos.

El método se basa en la determinación de un nivel de calidad aceptable o AQL expresado en porcentaje, el cual es el nivel de calidad aceptado por un cliente al proveedor de un componente.

En el análisis que estamos realizando el nivel AQL sería igual al nivel actual de falla de elementos combustibles para cada Central. Al método de muestro se le exige el mismo nivel que el de las fallas actuales de forma de poder hacer la comparación con el método empleado actualmente por NASA, ya que estarían ambos en un mismo nivel de exigencia.

Otro punto que se debe definir es el tamaño de cada lote, que en el caso del suministro de elementos combustibles será el volumen de cada entrega que se envía a las Centrales.

La Norma establece tres niveles de inspección: Nivel I, reducido; Nivel II, normal (habitualmente usado) y Nivel III, riguroso. La selección del nivel de inspección determina el tamaño de la muestra que se deberá retirar del lote para controlar y determinar la aceptación o no de la entrega del proveedor. O sea, a mayor nivel mayor será la cantidad de elementos que conformarán la muestra. Asimismo el nivel de inspección define cuan riguroso uno quiere ser en el control de recepción de materiales, por lo que dependiendo del material que uno este controlando se pueden definir distintos niveles, por ejemplo si de la calidad del insumo que se quiere controlando depende la vida de personas seleccionaríamos un Nivel III riguroso.

En la industria nuclear, y principalmente debido a que los elementos combustibles son la principal fuente de dosis de radiación del personal de las Centrales se debería seleccionar un Nivel III, lo que daría una cantidad máxima de elementos combustibles que se deberían ensayar en cada envío a las Centrales.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Sin embargo para el presente estudio se seleccionará el Nivel I que establece el número mínimo de elementos combustibles a ensayar, de manera que el costo involucrado sea el menor posible.

Cabe aclarar, que algunos de los controles que se deberían hacer a los elementos combustibles extraídos como muestras son destructivos, por lo que los mismos luego de ser ensayados no podrán ser utilizados para su irradiación en el reactor de las Centrales Nucleares, por lo que se los deberá devolver al fabricante para su re-trabajo y remplazo de las piezas ensayadas.

En el método por muestreo del presente estudio se considerará defecto a cualquier disconformidad que se encuentre en cualquier componente de los elementos combustibles respecto a su especificación técnica. Esto se fundamenta en que un apartamiento de la especificación de producto hace aumentar la probabilidad de que una barra combustible pierda la capacidad de mantener los productos de fisión en su interior.

De acuerdo al método, de la siguiente tabla de los tamaños de lotes y los niveles de inspección, se obtiene una letra clave que definirá el tamaño de la muestra.

Tamaño del lote	Niveles especiales				Niveles generales		
	S1	S2	S3	S4	I	II	III
2 – 8	A	A	A	A	A	A	B
9 – 15	A	A	A	A	A	B	C
16 – 25	A	A	B	B	B	C	D
26 – 50	A	B	B	C	C	D	E
51 – 90	B	B	C	C	C	E	F
91 – 150	B	B	C	D	D	F	G
151 – 280	B	C	D	E	E	G	H
281 – 500	B	C	D	E	F	H	J
501 – 1200	C	C	E	F	G	J	K
1201 – 3200	C	D	E	G	H	K	L
3201 – 10000	C	D	F	G	J	L	M
10001 – 35000	C	D	F	H	K	M	N
35001 – 150000	D	E	G	J	L	N	P
150001 – 500000	D	E	G	J	M	P	Q
≥ 500001	D	E	H	K	N	Q	R

Tabla 1: tamaños de lotes y niveles de inspección

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Fuente: Norma IRAM 15.3, Sistemas de muestreo para la inspección por atributos. Parte 3 - Sistemas de muestreo de lotes salteados.

En la tabla se establecen 4 niveles especiales S1, S2, S3 y S4, los cuales se emplean únicamente cuando sean necesarios tamaños de muestra relativamente pequeños y puedan o deban tolerarse grandes riesgos en la recepción.

En el método están definidas las técnicas de muestreo sencilla, doble y múltiple, las que pueden ser elegidas cualquiera de ella en función de una evaluación de la dificultad del muestreo y su comparación con el tamaño de muestra.

Asimismo en la norma están definidos los niveles de inspección simplificado, normal y riguroso.

Al comenzar las inspecciones se inicia por un nivel normal de control. En caso de cumplirse ciertos criterios de mantenimiento de la calidad del proveedor se puede pasar a un nivel simplificado, y si en cambio, si sucesivos controles resultan rechazados se debería pasar a un nivel riguroso.

En el control de recepción de elementos combustibles nucleares, independientemente de la historia de calidad del proveedor se debería aplicar el nivel riguroso. Este nivel determina los tamaños de muestras superiores, por lo que para el presente estudio maximizaría los costos. Por tal motivo y con objeto de ser conservativo se seleccionará para el presente trabajo un nivel simplificado de controles.

Por otra parte, para disminuir los costos involucrados en este método se utilizará el muestro sencillo, por lo que la tabla para determinar el tamaño de la muestra es la siguiente.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Nivel de calidad aceptable (inspección simplificada) †

Lote de la muestra n	Tamaño de la muestra n	Nivel de calidad aceptable (inspección simplificada) †																					
		0,010	0,015	0,025	0,040	0,065	1,0	1,5	2,5	4,0	6,5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1000	
A	2	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
B	2	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
C	2	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
D	3	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
E	3	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
F	3	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
G	13	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
H	20	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
J	32	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
K	50	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
L	80	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
M	125	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
N	200	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
P	315	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
Q	500	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
R	800	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re

= Utilizar el primer plan de muestreo debajo de la flecha. Si el tamaño de la muestra es igual o excede al del lote, hacer inspección cien por cien.
 = Utilizar el primer plan de muestreo encima de la flecha.
 Ac = Número de aceptación.
 Re = Número de rechazo.
 † Si se excede el número de aceptación, pero no se alcanza el de rechazo, se acepta el lote estableciendo la inspección normal (Ver 3.4.6)

Imagen 11: Planes de muestreo simple para inspección simplificada

Fuente: Norma IRAM 15.3, Sistemas de muestreo para la inspección por atributos. Parte 3 - Sistemas de muestreo de lotes salteados.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Con la letra clave obtenida de la tabla de tamaños de lotes y niveles de inspección y el AQL se ingresa en la tabla precedente, se establece el tamaño de la muestra y el número de defectos que hace que se rechace el lote que se está controlando.

3.2.1. Determinación de tamaño de las muestras

Como ya se expuso se considerará como lote a la cantidad de elementos combustibles que se transportan a las centrales nucleares en cada entrega.

En la siguiente tabla se detallan las cantidades típicas de cada entrega de elementos combustibles a las centrales nucleares.

Central	Central Nuclear Atucha I	Central Nuclear Atucha II	Central Nuclear Embalse
Cantidad de elementos combustible en cada entrega	22	22	504

Tabla 2: tamaño de lote de elementos combustibles

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

En función del tamaño de los lotes de cada Central y el Nivel I de muestreo que hemos seleccionado, se ingresa a la “Tabla de tamaños de lotes y nivel de inspección” y se obtiene las siguientes palabras claves:

- Centrales Nucleares Atuchas = “B”
- Central Nuclear Embalse = “G”.

Con estas letras claves se ingresa a la “Tabla planes de muestreo simple con inspección simplificada” y obtenemos los siguientes tamaños de muestras:

- Centrales Nucleares Atuchas = 2 elementos combustibles.
- Central Nuclear Embalse = 13 elementos combustibles.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Esta determinación quiere decir que el personal que realice el control de calidad de recepción de los elementos combustibles en cada Central deberá seleccionar al azar el tamaño de muestra determinado precedentemente. O sea en el caso de las Atuchas en cada envío de 22 elementos combustibles se deberán seleccionar al azar 2 y analizarlos. En cambio, en Embalse de los 504 elementos combustibles recibidos en cada envío se deberá controlar 13.

Si optamos por un AQL menor a 0,1 (tasa de falla muy elevada) si en los controles de recepción de las muestras retiradas se encontrara al menos 1 elementos combustibles con un desvío respecto a su especificación se debería rechazar el lote. Esta condición de aceptación se obtiene ingresando con la palabra clave y el AQL a la "Tabla planes de muestreo simple con inspección simplificada"

Cabe hacer notar que dichas cantidades serían menores a las que se deberían controlar para el nivel de rigurosidad de los controles de calidad requeridos en la industria nuclear. Se optaron por los niveles mínimos para determinar el tamaño de lote menor, a fin de que el costo del presente método sea el menor posible.

3.2.2. Determinación de la cantidad de elementos combustibles a inspeccionar

Para determinar la cantidad total de elementos combustibles que se controlaran como mínimo por año, se considera un factor de carga de las centrales nucleares de 85%, o sea 310 días de funcionamiento por año. Las Centrales argentinas normalmente superan holgadamente este valor.

En la siguiente tabla se determinan el número total de elementos combustibles que se deberían controlar anualmente al mencionado nivel de productividad de las centrales:

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Central	Consumo anual	Cantidad mínima de envíos	Cantidad anual de elementos combustibles a controlar
Central Nuclear Atucha I	190	8	16
Central Nuclear Atucha II	500	22	44
Central Nuclear Embalse	4800	9	117

Tabla 3: de tamaño de muestra por central nuclear

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

3.2.3. Costo de la implementación de un control de insumos clásico

El precio de un elemento combustible lo podemos dividir en dos componentes, uno por uranio que sería el costo de producir el dióxido de uranio contenido en los elementos combustibles. El otro componente sería la fabricación de los mismos, que consistiría en la producción de toda la estructura para contener el uranio, el montaje, controles y transporte a las Centrales.

En la siguiente tabla se detallan los precios de cada componente de los elementos combustibles de cada central nuclear redondeados en defectos:

Componente	Central Nuclear Atucha I	Central Nuclear Atucha II	Central Nuclear Embalse
Uranio (AR\$)	300.000	300.000	37.000
Fabricación (AR\$)	900.000	400.000	22.000
Precio total (AR\$)	1.200.000	700.000	59.000

Tabla 4: de precio de los elementos combustibles

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Para el análisis del costo de una inspección clásica por muestreo se harán las siguientes consideraciones conservativas:

- Se considerará que la totalidad del uranio que contengan los elementos combustibles se reprocesara sin cargo y que el proceso de recuperación no tenga ninguna pérdida. La presente suposición es muy beneficiosa para el método de muestreo, ya que el costo de del proceso de reconversión a dióxido de uranio nuevamente representa el 20% del costo del componente uranio y dicho proceso de conversión tiene una merma del 1,5% del material.
- Respecto al componente de fabricación, se considerará que el proceso de recuperación tendrá solo un costo del 50% del de dicho componente. Esta consideración igualmente es muy beneficiosa para el muestro ya que más del 50% de los costos de fabricación son costos variables de producción que son inevitables para realizar el retrabajo sobre los elementos combustibles ensayados en el control por muestreo

En función de las consideraciones, muy conservativas respecto al control de insumos clásico, el costo de aplicar este método es:

Central Nuclear	Cantidad anual de muestra	Costo de reproceso de cada combustible	Costo total
Atucha I	16	AR\$ 450.000	AR\$ 7.200.000
Atucha II	44	AR\$ 200.000	AR\$ 8.800.000
Embalse	117	AR\$ 11.000	AR\$ 1.287.000
Costo total control de recepción clásico			AR\$ 17.287.000

Tabla 5: de costo total de control de recepción

De aplicarse esta metodología, el costo total debería ser asumido por NASA directamente, que sería abonar al proveedor el costo de retrabajo sobre los

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

elementos combustibles ensayados; o indirectamente al proveedor en el caso que se exigiera en el contrato de provisión el retrabajo sin cargo.

Se dice que NASA asumiría los costos totales dado que la relación que se posee con el proveedor es oligopsónica, por lo que el proveedor cargaría en el precio de los elementos combustibles el costo del retrabajo si se optara por la forma indirecta.

De igual manera sucedería si se opta por la opción que el proveedor se haga cargo del costo de retrabajo en los casos que el lote sea rechazado, ya que en ese caso el fabricante haría una provisión que la cargaría al costo de los elementos combustibles.

3.3. Comparación de costos de métodos de control de calidad de los elementos combustibles

En el presente apartado se analizaron los costos incurridos actualmente por NASA en el control de calidad que realiza sobre la provisión de elementos combustibles, y los que implicarían para dicha Sociedad la implementación de un control de recepción de insumo clásico.

- Método de control actual = 7.590.000 AR\$/año
- Método de control por muestreo = 17.287.000 AR\$/año

Como se observa los costos del método actual son claramente inferiores al control por muestreo, máxime que el método empleado actualmente se hizo suposiciones de manera de incrementar el costo y en este último, se han hecho consideraciones conservativas de modo de reflejar el menor costo posible.

Cabe aclarar que no se han considerado tampoco en el método de control por muestreo, el costo de los ensayos que se harían a los elementos combustibles para analizar la aceptación o rechazo de un lote ni del personal que intervendría en los mismos.

Por tal motivo, el método implementado actualmente por NASA es más económico frente al control por muestreo, sin considerar otras ventajas que hacen que el control desarrollado por NASA sea el óptimo.

Capítulo 4. Performance de los elementos combustibles nucleares

4.1. Performance de los elementos combustibles nucleares a nivel mundial

Para analizar los resultados obtenidos por la industria a nivel mundial, se estudió la publicación International Atomic Energy Agency (2010). Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors, Vienna: IAEA Nuclear Energy Series N° NF-T-2.1.

Dicha publicación realiza un análisis la falla de los elementos combustibles de los distintos tipos de reactores nucleares en operación a nivel mundial, abarcando al 93% de los reactores que están operando en el mundo y al 95,6% de los años de experiencia en operación de reactores. Por tal motivo, la misma es una publicación completa de la performance de los combustibles en la industria para el periodo comprendido entre los años 1994 y 2006.

Datos de mayor actualidad compilados en forma imparcial y completa no se poseen. Se obtiene datos de fabricantes y/o operadores de centrales que no son estrictamente confiables, ya que el dato de tasa de falla es sensitivo comercialmente por ser una medida de la performance del fabricante o de la central nuclear.

Debido a ello, no existe internacionalmente una unidad de criterio para publicar los datos de fallas de los elementos combustibles, por tal motivo la mencionada publicación define para el trabajo una metodología de cálculo única de la tasa de falla para poder hacer una comparación.

Para el presente trabajo se analizan solamente los datos para las centrales tipo CANDU ya que la Central Nuclear de Embalse se encuentra en este grupo.

Al 2006 se encontraban operando 22 centrales nucleares CANDU (Argentina 1; Canadá 14; China 2, Corea 4 y Rumania 1). Asimismo, se incorpora a la estadística 13 centrales de diseño PHWRs (India 12 y Pakistán 1), las cuales son una copia, no autorizada por el diseñador, del diseño CANDU.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

En cambio no se cuenta con una estadística de referencia para las Centrales Nucleares Atucha debido a que las mismas son prototipos y únicas a nivel mundial.

En el siguiente gráfico se muestra la cantidad de combustibles fallados cada 1000 extraídos de los reactores de las centrales.

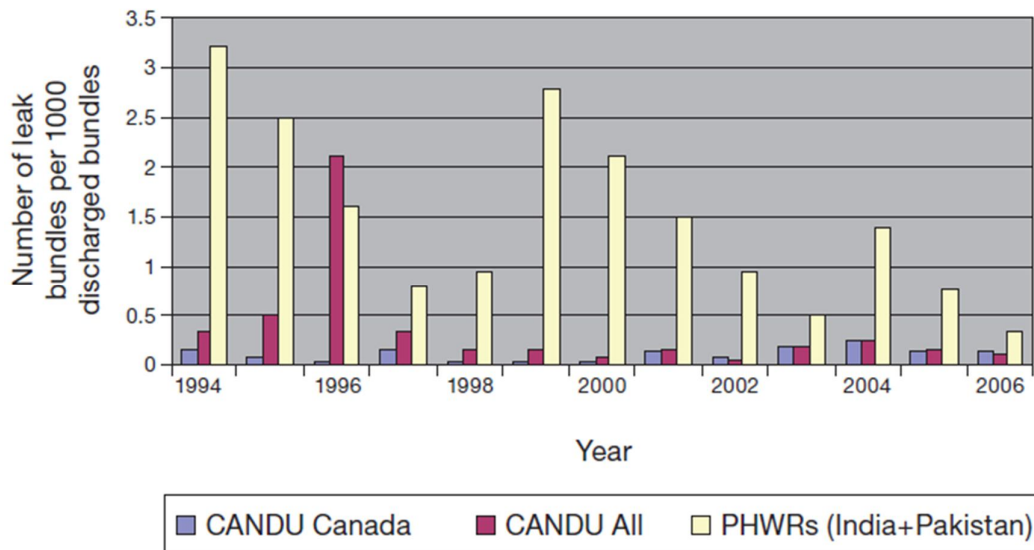


Gráfico 2: Combustibles fallados cada 1000 extraídos del reactor.

Fuente: publicación International Atomic Energy Agency (2010). Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors, Vienna: IAEA Nuclear Energy Series N° NF-T-2.1

En primera medida, se visualiza la gran diferencia en la performance de los combustibles fabricados en India y Pakistán respecto al resto de los países que producen combustibles para centrales tipo CANDU.

Las tasas promedio anuales en todas las Centrales CANDU es de 0,035%, para las centrales tipo PHWRs es de 0,15%. Considerando solamente las 14 centrales ubicadas en Canadá la tasa de falla anual es de 0,01%.

La diferencia entre todos los CANDU y los ubicados en Canadá se debe principalmente a la falla de 96 elementos combustibles en la central de Wolsong-1 de Corea en el año 1996 y a 21 elementos combustibles que

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

fallaron en la Central Nuclear de Embalse de Argentina. La causa de la falla de los elementos combustibles en Argentina será descrita en el capítulo respectivo a la performance de los mismos.

4.2. Performance de los elementos combustibles fabricados en Argentina

En Argentina se fabrican los combustibles para las tres centrales que se encuentran en operación en el país. Dado que cada central utiliza un tipo de combustible distinto a las otras las performances también lo son.

En el presente apartado no se expondrá la performance de los elementos combustibles de la Central Nuclear Atucha II, ya que no se conoce la misma debido a que la Central logro su primera criticidad el 3 de junio de 2014 y al 31 de diciembre del mismo año no se extrajo del reactor ningún combustible del núcleo inicial ni se tenía información de algún elemento combustible fallado.

4.2.1. Performance de los Elementos Combustible de la Central Nuclear Atucha I

La Central inició la operación en 1974 utilizando elementos combustibles de uranio natural, fabricados en Alemania por KWU-RBU. Dicha compañía era una subsidiaria de Siemens, la cual realizó el diseño de los elementos combustible, de los procesos de fabricación y la fabricación de los mismos.

Estos elementos combustibles eran transportados por vía aérea desde Alemania hasta la Argentina. En la Central se ensamblaba el acople (parte superior) a los combustible y se hacía un control visual final.

KWU-RBU suministró un total de 3380 elementos combustibles de uranio natural con 36 barras combustibles, los cuales se irradiaron durante los primeros 10 años de operación de la Central.

Del total de elementos combustibles irradiados fabricados por KWU-RBU fueron extraídos del reactor de Atucha I un total 25 elementos combustibles fallados.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Un elemento combustible se lo considera como fallado cuando al menos una barra combustible pierde la capacidad de contener los productos de fisión, por lo que los mismos escapan de ella transfiriéndose al agua de refrigeración. Dichos productos de fisión son registrados por los sistemas destinados a tal fin, detectándose el elemento combustible fallado, de modo que se programa su extracción.

Dado el total de suministro y de fallas de elementos combustibles fabricados por KWU-RBU se registró una tasa promedio de falla de 0,74%.

KWU-RBU durante todo el periodo en que suministro los elementos combustibles a Argentina no realizó ningún cambio en el diseño de los mismos, por lo que la tasa de falla del párrafo anterior es la promedio de todos los elementos combustibles germanos, por lo que en el presente estudio será considerada como la tasa de falla estándar de los elementos combustibles de la Central Nuclear Atucha I.

Cabe aclarare que KWU-RBU aparte de ser el diseñador de los elementos combustibles de la Central Nuclear Atucha I, era un fabricante de elementos combustibles nucleares calificados, ya que lo hacía también para las Centrales Nucleares de Alemania y de otros países.

Desde fines de la década de los 70', la Comisión Nacional de Energía Atómica inició un programa de desarrollo para lograr la fabricación en el país de este tipo de combustibles. Este programa incluía el desarrollo de los procesos de fabricación en una planta piloto, la producción de prototipos, su irradiación y la construcción de una planta fabril.

En el año 1978 se logró la fabricación de 2 prototipos que se irradiaron en la Central Nuclear. Luego de ello se fabricaron 200 elementos combustibles en la planta piloto que se irradiaron en forma satisfactoria.

En el análisis de la performance de los elementos combustibles del presente capítulo no se incluirá los 200 elementos combustibles pertenecientes al programa de desarrollo de fabricación nacional.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Una vez logrado la tecnología, el conocimiento y las capacidades para el suministro en forma continua de elementos combustibles, en el año 1982 se creó la sociedad mixta CONUAR con el objeto de la fabricación de dicho insumo.

A partir de ese año y hasta la fecha CONUAR ha suministrado ininterrumpidamente elementos combustibles a las Centrales Nucleares de Argentina.

Durante la década de los 90' NASA en conjunto con CNEA y CONUAR realizaron un programa de optimización de la utilización de los elementos combustibles, de modo de disminuir el costo de generación de Atucha I. Este programa se fundamentó en el incremento de la masa de uranio contenida en los elementos combustibles. En este marco se pasó de utilizar Uranio Natural que posee 0,72% de U^{235} a Uranio Levemente Enriquecido con 0,85% de U^{235} y el remplazo de la barra estructural por una barra combustible pasando los elementos combustibles de 36 BC a 37BC

En la siguiente tabla se muestran la utilización de cada tipo de elementos combustibles de fabricación nacionales en Atucha I.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Año	Elemento Combustible UN 36 BC	Elemento Combustible ULE 36 BC	Elemento Combustible ULE 37 BC	Total de Elementos Combustibles
1982	287			287
1983	388			388
1984	286			286
1985	250			250
1986	354			354
1987	227			227
1988	127			127
1989	0			0
1990	295			295
1991	436			436
1992	353			353
1993	387			387
1994	410			410
1995	394	18		412
1996	308	20		328
1997	325	23		348
1998	139	133		272
1999	32	123		155
2000		146		146
2001		125		125
2002		89	2	91
2003		182	2	184
2004		260		260
2005		200		200
2006		188		188
2007		236		236
2008		217		217
2009		215		215
2010		240	8	248
2011		213		213
2012		118	96	214
2013		7	210	217
2014			221	221
Total	4.998	2.753	539	8.290

Tabla 5: de cantidad de elementos combustibles irradiados por años en la Central Nuclear Atucha

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

De la tabla se observa claramente que a partir del año 1999 con la implementación de los elementos combustibles con uranio levemente enriquecido en forma masiva, el consumo de los mismos se reduce prácticamente a la mitad que los años anteriores.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

En la siguiente tabla se detallan la cantidad total de elementos combustibles fallados por año.

Año	Cantidad de Elementos Combustibles Fallados
1982	2
1983	2
1984	0
1985	11
1986	1
1987	0
1988	0
1989	0
1990	5
1991	3
1992	1
1993	3
1994	0
1995	0
1996	1
1997	4
1998	1
1999	0
2000	4
2001	1
2002	1
2003	1
2004	27
2005	27
2006	0
2007	3
2008	0
2009	2
2010	4
2011	0
2012	0
2013	5
2014	1
Total	110

Tabla 6: de elementos combustibles fallados en la Central Nuclear Atucha I

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Como se observa en los años 2004 y 2005 en la Central Nuclear Atucha I hubo una epidemia de elementos combustibles fallados. Dado ello, se convocó al Comité de fallas de elementos combustibles y se procedió a realizar una

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

investigación para la determinación de la causa raíz. También se convocó a expertos internacionales a efectos de evitar una parcialidad en el análisis que afectara el resultado de la investigación. Del análisis, se detectó un elevado contenido de hidrógeno en las pastillas de uranio que producía una hidruración prematura de la vaina de la barra combustible que hacía que los mismos fallaran.

Por otro lado, en el año 1985 hubo otra epidemia de elementos combustibles que la causa raíz fue detectada, en una mala operación de arranque de la Central, dado que en esos años Atucha I operaba haciendo un seguimiento de carga.

En el siguiente gráfico se muestra la tasa de anual de falla calculada como la relación entre los elementos combustibles fallados y los irradiados en cada año, en el cual se observa claramente los años en que hubo una epidemia en la Central.

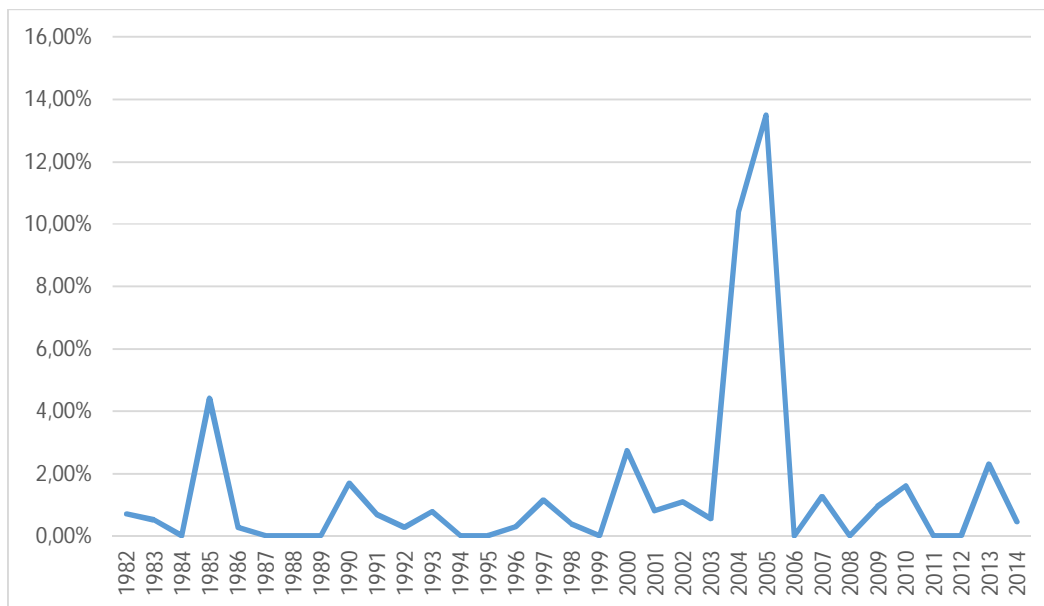


Gráfico 2: Tasa de falla anual de elementos combustibles de la Central Nuclear Atucha I

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Cabe hacer notar, como se expuso precedentemente que con la introducción en forma masiva de elementos combustibles ULE el consumo se redujo a la mitad, por lo que, a partir de ese año, la falla de un elemento combustible en forma porcentual implica el doble que en los años anteriores. Este hecho se observa en el gráfico en que a partir del año 1999 las variaciones de la tasa de falla son mayores que en los años precedentes.

Dado que, como fue dicho anteriormente, la Central Nuclear Atucha I es un prototipo por lo que no existe otra central en el mundo que utilice este tipo de combustible con la que uno pueda compararse. Por tal motivo, en el presente trabajo se tomara como referencia la tasa de falla obtenida por los elementos combustibles fabricados en Alemania, y se comparará con la performance de los combustibles nacionales.

En la siguiente tabla se resume la cantidad de elementos combustibles irradiados y fallados totales por tipo de elemento combustible. Para el caso de los elementos combustibles ULE con 36 barras combustibles, en la tabla se muestra una línea en la que no se consideran los años 2004 y 2005, ya que por su singularidad no se los debe incluir en un estudio estadístico y deben ser tratados independientemente.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Tipo de elemento combustible	Cantidad de elementos combustible irradiado	Cantidad de elementos combustible fallados	Tasa de falla promedio
Elementos combustibles fabricados por KWU-RBU	3.380	25	0,74%
Elementos combustibles uranio natural	4.998	34	0,68%
Elementos combustibles uranio levemente enriquecido 36 BC	2.753	71	2,58%
Elementos combustibles ULE 36 BC sin años 2004 y 2005	2.293	17	0,74%
Elementos combustibles uranio levemente enriquecido 37 BC	539	5	0,93%

Tabla 7: tasa de falla por tipo de elemento combustible de la Central Nuclear Atucha I

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

4.2.1.1. Conclusión de la performance de elementos combustibles Atucha I

Los elementos combustibles durante toda la historia han tenido cambios tanto de fabricante como de diseño, lo que obliga a hacer un estudio de cada etapa.

En el mundo no existen datos de tasa de falla de elementos combustibles de centrales comparables a Atucha I, dado que es única en su tipo por ser un prototipo diseñado por Siemens. Por tal razón, dado que KWU-RBU fue la diseñadora y fabricante inicial de los elementos combustibles de la Central Nuclear Atucha I, la tasa de falla de 0,74% observada durante todo el periodo

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

de provisión por parte de dicha Sociedad se la considerará como la referencia para esta Central.

Si consideramos la totalidad de los elementos combustibles de fabricación nacional independientemente del diseño de los mismos se obtendría una tasa de falla igual a 1,33% (110 / 8.290). Sin embargo, si extraemos del análisis la epidemia de combustibles de los años 2004 y 2005, la tasa de falla promedio del suministro nacional sería 0,72% (56 / 7830), la cual es comparable a la obtenida por los elementos combustibles fabricados por KWU-RBU. Asimismo, si también se extrae del presente análisis el año 1985, la tasa se reduce a 0,59% (45 / 7580), la que sería la real tasa de falla promedio de la industria nacional de este tipo de elemento combustible, no se debería incluir ambas epidemias en el análisis dado que en su conjunto conforman el 60% de los elementos combustibles fallados en la Central Nuclear Atucha I, entonces en el estudio estadístico no deben ser considerados.

También conviene aclarar, que como se expresó anteriormente, a partir de la implementación del diseño de elementos combustibles con uranio levemente enriquecido el consumo anual se redujo prácticamente a la mitad, por lo que cada elemento combustible que falla posee doble de peso porcentualmente que los elementos combustibles con uranio natural.

El actual diseño posee una tasa superior a la obtenida por KWU-RBU. Sin embargo, se considera que no es significativa ya que a la fecha no se cuenta con suficiente estadística, dado que solo se han irradiado 539 elementos combustible (3 años de operación normal) con uranio levemente enriquecido con 37 barras combustibles.

4.2.2. Performance de los Elementos Combustible de la Central Nuclear Embalse

La Central Nuclear Embalse fue diseñada por la empresa Atomic Energy of Canadá Limited (AECL) y es del tipo conocida mundialmente tipo CANDU (Canada Deuterium Uranium).

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

La Central comenzó su operación comercial en el año 1984, manteniendo una muy buena performance de operación desde ese año. El factor de carga de la central, que se calcula como el cociente entre la energía total generada respecto al total de energía teórica que podría generar, ha sido superior al 80% en los 30 años de operación, esto quiere decir, que la Central ha estado generando energía el equivalente de más de 24 años continuamente de los últimos 30 años.

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de elementos combustibles irradiados y el factor de carga de cada año desde el inicio de la operación comercial de la Central:

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Año	Elementos combustibles Irradiados	Factor carga
1984	1928	48%
1985	4233	72%
1986	3160	58%
1987	4544	87%
1988	4504	87%
1989	4928	89%
1990	3755	95%
1991	4886	86%
1992	4628	83%
1993	5116	90%
1994	5360	98%
1995	4368	74%
1996	5176	93%
1997	4980	89%
1998	4884	87%
1999	5420	99%
2000	4308	77%
2001	5456	98%
2002	4770	84%
2003	5308	95%
2004	4928	87%
2005	4676	83%
2006	5268	97%
2007	4416	76%
2008	4804	83%
2009	5584	99%
2010	4268	74%
2011	3908	69%
2012	3808	66%
2013	3668	63%
2014	1736	30%
Promedio	4477	81%

Tabla 8: cantidad de elementos combustibles utilizados y factor de carga de la Central Nuclear Embalse

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Cabe aclarar que la Central Nuclear Embalse a partir del año 2010 inició el proyecto de extensión de vida por medio del cual se extenderá la operación de la misma por 30 años más. Debido a este proyecto, la Central ha tenido que

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

realizar paradas de mantenimiento más extensas que las normales por lo que se ha visto afectado el factor de carga de los últimos años.

El núcleo inicial de la Central fue cargado con elementos combustibles fabricados por General Electric, pero luego durante la operación se utilizaron elementos combustibles fabricados por CONUAR en el país.

Lamentablemente hasta el año 1994 no se posee un registro detallado de los elementos combustibles fallados ni del fabricante de los mismos, mediante el cual se puedan hacer una comparación de la performance de los elementos combustibles nacionales respecto de los importados irradiados en un mismo reactor, tal como en el presente trabajo se realizó con los elementos combustibles de Atucha I. Por tal motivo, en la siguiente tabla se detallan los elementos combustibles fallados durante los últimos 20 años.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Año	Elementos Combustibles Fallados
1995	2
1996	21
1997	3
1998	2
1999	4
2000	0
2001	2
2002	0
2003	3
2004	0
2005	0
2006	1
2007	2
2008	3
2009	8
2010	3
2011	4
2012	3
2013	3
2014	0

Tabla de cantidad de elementos combustibles fallados por año en la Central Nuclear Embalse

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

De la tabla se destacan especialmente los años 1996 y 2009 en los cuales el número de elementos combustibles fallados es superior a 5. La epidemia del año 1996 se debió al proceso de fabricación del material empleado en los tapones de las barras combustibles, el cual dejaba poros interconectados en la estructura del material lo que producía que se generara una vía para el escape de los productos de fisión contenidos.

Respecto a las fallas del año 2009, las mismas se debieron a una desalineación de una boquilla que alinea a las pastillas de dióxido de uranio en el proceso de carga de las mismas en la vainas, esta desalineación provocaba que las pastillas rozaran con el extremo de la vaina lo que hacía que quedaran

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

restos de uranio que contaminaba la soldadura posterior del tapón en el extremo de la vaina. La causa raíz fue hallada mediante una investigación, generando las acciones preventivas para evitar la repetición de las mismas.

En el siguiente gráfico se muestra las tasas de fallas anuales calculadas como la relación entre la cantidad de elementos combustibles fallados y los irradiados en cada año.

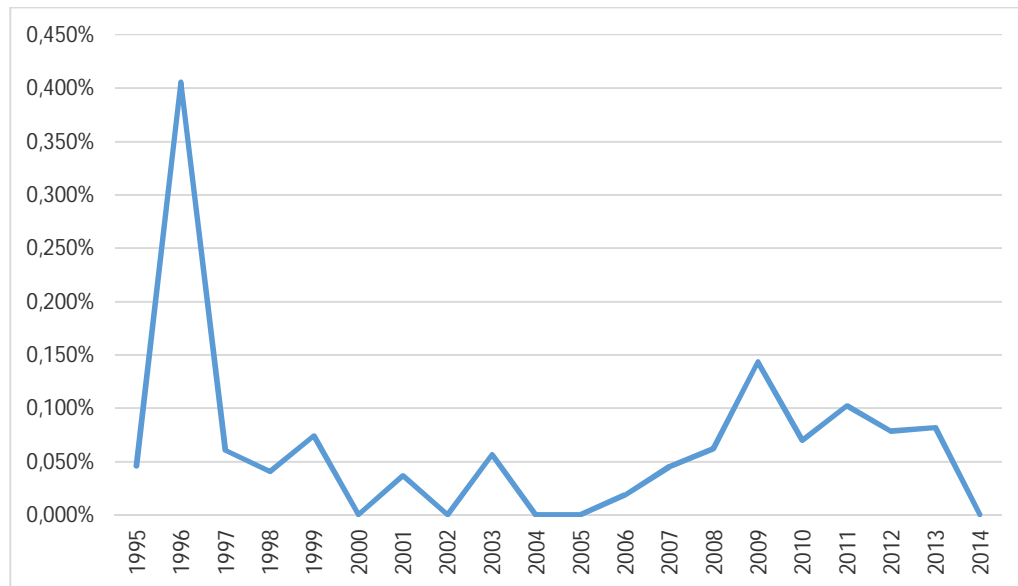


Gráfico 3: tasa de falla anual de elementos combustibles de la Central Nuclear Embalse

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Del gráfico se observan los 2 picos correspondientes a los años en que la cantidad de elementos combustible fallados fueron superiores a la normalidad.

4.2.2.1. Conclusión de la performance de elementos combustibles Embalse

Como se observa en el gráfico, la tasa de falla de elementos combustibles en la Central Nuclear Embalse es muy fluctuante entre los años.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Si se analiza la tasa promedio de los últimos 20 años (1995-2014), nos daría que la misma es igual a 0,070% (64/91.734), la cual es muy superior a la obtenida en las 14 Centrales Nucleares de Canadá (0,01%) y es el doble que el promedio mundial de las Centrales CANDU de 0,035%.

Una razón de que la tasa de falla de la Central Nuclear Embalse es superior a las restantes Centrales de igual diseño es que en los cálculos las fallas producidas en los años 1996 y 2009 tiene un peso relativo muy superior en la Central Argentina en comparación la media mundial. Esto se debe a que en el cálculo de la tasa de 0,070% de Embalse los 21 elementos combustibles fallados en el año 1996 se lo promedia en una sola Central, en cambio las tasa con que nos estamos comparando las performances individuales están promediadas respecto a 22 Centrales CANDU en el caso de la tasa mundial y respecto a 14 en el caso de las canadienses.

Por tal motivo, si del promedio se eliminan las performances de Embalse los años 1996 y de 2009 la tasa de falla disminuye a 0,044%.

En la siguiente tabla se expone un resumen de los valores descriptos:

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Año	Total de Elementos Combustibles irradiados	Total de elementos combustibles fallados
1995	4368	2
1996	5176	21
1997	4980	3
1998	4884	2
1999	5420	4
2000	4308	0
2001	5456	2
2002	4770	0
2003	5308	3
2004	4928	0
2005	4676	0
2006	5268	1
2007	4416	2
2008	4804	3
2009	5584	8
2010	4268	3
2011	3908	4
2012	3808	3
2013	3668	3
2014	1742	0
Promedio general	4587	3
Promedio sin 96 y 09	4499	2
Tasa de Falla General	0,070%	
Tasa de Falla sin 96 y 09	0,044%	
Tasa de Falla Centrales CANDU	0,035%	
Tasa de Falla Centrales de Canadá	0,010%	

Tabla 9: comparación de tasas de falla de los elementos combustibles CANDU

Fuente: Nucleoeléctrica Argentina S.A., Departamento Gestión Ciclo de Combustible

Sin embargo también corresponde hacer una comparación con las 14 Centrales Nucleares de India y Pakistán, las cuales tienen una tasa de falla de 0,15%.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

Los programas de reducción de tasa de falla de los procesos de fabricación, poseen la dificultad de que los desvíos que se quieren controlar tienen una tasa de falla extremadamente bajas. Para tomar dimensión de la falla de procesos que se busca disminuir, tomemos por ejemplo el proceso de soldadura de tapones a la barra combustible. Cada combustible tiene 37 barra combustibles las cuales tiene 2 tapones, por lo que en cada elemento combustible hay 74 soldaduras. Si la Central consume 4550 elementos combustibles, CONUAR realiza por año 336.693 soldaduras, entonces si suponemos que las 3 fallas anuales en promedio se deben a este proceso la tasa de falla que se quisiera eliminar o disminuir es igual a 0,0009% lo que es igual 9 de cada millón de soldaduras fallan.

Como se ve la tasa de falla de los procesos de fabricación que se buscan controlar son extremadamente bajas por lo que en muchos casos no existe un método para detectarlas, ya que la tasa falla que se busca es inferior al errores del método de control.

Conclusión

Capítulo 5. Conclusiones Finales

5.1. Conclusiones finales.

El objeto del presente trabajo es analizar el método de seguimiento de la calidad de los elementos combustibles empleado actualmente por NASA.

El método utilizado por NASA consiste en realizar un seguimiento permanente, desde el inicio de la fabricación de los elementos combustibles, mediante la presencia de inspectores residentes en el proveedor, sumado a otro tipo de acciones de control.

NASA para la aplicación de todas las acciones involucradas en el seguimiento posee un sector específico de 10 personas con un costo anual total de AR\$7.590.000.

Por otro lado, se determinó un costo anual de AR\$ 17.287.000 que implicaría la aplicación de un método de control estadístico de recepción establecido en la Norma IRAM 15.3.

En función de la diferencia en los costos de ambos métodos se puede asegurar, con un amplio margen, que el método implementado por NASA es óptimo. Asimismo, el costo que implica para NASA es de solamente el 1% del costo anual de dicho insumo, lo que demuestra también, que esta estructura no es onerosa para NASA.

Por otra parte, se comparó las performance de los elementos combustibles utilizados en las Centrales Nucleares nacionales con el estándar internacional.

La Central Nuclear Atucha I es un prototipo por lo que no existe otra a nivel mundial para su comparación, por lo que se definió como estándar para esta Central la tasa de falla de 0,74% obtenida por el fabricante alemán KWU-RBU. A esta se la compara con la tasa de falla de 0,59% obtenida históricamente por los elementos combustibles fabricados nacionalmente.

Método de Aceptación de Elementos Combustibles Nucleares en la Argentina

La Central Nuclear Embalse registra una tasa de falla de 0,044%, la cual es similar a la tasa estándar de 0,035% a la obtenida por 22 Centrales Nucleares que se encuentran operando en el mundo de igual diseño.

Respecto a la Central Nuclear Atucha II, la misma logro la primera criticidad en junio de 2014 y hasta diciembre del mismo año no se extrajo ningún elementos combustible irradiado, por lo que en el presente trabajo no se la analiza debido a que no se cuenta con una estadística de tasa de falla de elementos combustibles.

Ante la precedente argumentación se concluye que el método aplicado por NASA actualmente, es el óptimo ya que minimiza los costos incurridos manteniendo la tasa de falla de los elementos combustibles en niveles comparables con los estándares internacionales

Bibliografía

- Norma IRAM 15.3, “Sistemas de muestreo para la inspección por atributos. Parte 3 - Sistemas de muestreo de lotes salteados”, vigente desde el 15/10/10.
- International Atomic Energy Agency (2010). Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors, Vienna: IAEA Nuclear Energy Series N° NF-T-2.1.