

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA INSTITUTO DE
TECNOLOGÍA

"Prof. Jorge A. Sabato"

Desarrollo del plan de calificación basado en condición calificada del
cable de válvulas del circuito del moderador de Atucha I.*

Por Carlos Rodrigo Meza Quiñones

Director: Esp. Jorge Zorrilla

Tutor: Ing. Esteban Maita

(*) Trabajo de Seminario para optar al título de Ingeniero en Materiales

República Argentina

2021

Índice

1. Definiciones.	6
2. Introducción.	6
2.1 Equipamiento Eléctrico en la Industria Nuclear.	6
2.2 Descripción de Cables Eléctricos.	7
2.2.1 Materiales presentes en Cables Eléctricos.	9
2.2.2 Problemática de Cables en Centrales Nucleares.	9
2.2.3 Situación de los cables instalados en Centrales Nucleares Argentinas.	10
2.3 Degradación de polímeros en Centrales Nucleares.	11
2.3.1 Aspectos Generales.	11
2.3.2 Mecanismos de envejecimiento y degradación.	11
2.3.3 Diagrama de predominancia.	14
2.3.4 Modelo de envejecimiento acelerado (Arrhenius).	15
2.4 Calificación de equipos.	17
2.4.1 Ensayo de tipo.	17
2.4.2 Experiencia operativa.	18
2.4.3 Análisis.	18
2.4.4 Métodos combinados.	18
2.4.5 Calificación de cables.	18
2.4.6 Vida calificada.	19
2.4.7 Condición calificada.	19
2.5 Normativa existente para la Calificación de equipos.	20
2.6 Diseño Atucha y valvula FIAT.	21
2.6.1 Descripción y función.	21
2.6.2 Condiciones de ambiente normales.	22
2.6.3 Accidente de base de diseño (DBA).	23
2.7 Experiencia previa en calificación de cables.	24
2.8 Sistema de calidad vigente en la GCPCN.	26
3. Desarrollo de la documentación.	29
3.1 Situación del proyecto Calificación del cable de la válvula FIAT.	29
3.2 Descripción técnica del cable.	29
3.3 Energía de activación en los materiales del cable.	32
3.3.1 Goma siliconada.	32
3.3.2 PVC.	33
3.4 Condiciones de operación.	35
3.4.1 Condiciones de operación normales.	35
3.4.2 Condiciones de operación durante DBA.	35
3.5 Función de seguridad y requerimientos de desempeño.	36

3.6	Mission Time.	36
3.7	Secuencia de calificación.	36
3.7.1	Recepción del ítem de ensayo	37
3.7.2	Preparación de las muestras	38
3.7.3	Ensayo funcional	39
3.7.4	Envejecimiento	40
3.7.5	Montaje y la orientación de la muestra durante el envejecimiento	43
3.7.6	Ensayo funcional	43
3.7.7	Fotografías	43
3.7.8	Registros asociados	43
3.8	Envejecimiento por ciclado	43
3.9	Otros envejecimientos (Humedad, tensión eléctrica, vibración, etc)	43
3.10	Ensayos	44
3.10.1	Ensayo de desenrollado y enrollado	44
3.10.2	Ensayos funcionales	44
	Registros asociados	44
3.10.3	Ensayo de rigidez dieléctrica o tensión resistida	45
	Parámetros del ensayo y condiciones según sección 6.5.2 de la norma [7]	45
3.10.4	Ensayo LOCA (HELB)	46
3.10.5	Ensayos funcionales y/o requisitos operativos	46
3.10.6	Ensayo de inundación	49
3.11	Inspección post ensayo	49
4.	Ejecución de la calificación.	50
4.1	Caracterización del exudado.	50
4.1.1	Presentación del problema.	50
4.1.2	Procedimiento experimental de envejecimiento térmico acelerado y generación del producto de degradación.	50
4.1.3	Caracterización de exudados.	53
4.2	Ejecucion del plan de calificación.	55
4.2.1	Preparativos previos	55
4.2.2	Preparacion de muestras	57
4.2.3	Registros de inspeccion visual	58
4.2.4	Envejecimiento por radiacion.	58
4.2.5	Envejecimiento térmico.	58
5.	Discusión y resultados.	58
5.1	Documentación de ingeniería.	58
5.2	Resultados Experimentales.	59
5.2.1	Exudado.	59
5.2.2	Fragilizacion de la envoltura	59
6.	Recomendaciones.	61
6.1	Compatibilidad química del exudado.	61
6.1.1	Goma Siliconada	61
6.1.2	PVC.	62
6.1.3	Otros Materiales.	62



6.2	Presencia de humo al iniciar el ensayo.....	62
6.3	Trabajos futuros.	62
7.	<i>Bibliografía.</i>	63

Resumen.

En el presente trabajo se desarrolló y llevó a cabo el plan de calificación del cable de válvulas del circuito del moderador de la central nuclear Atucha I (CNAI) en el marco del proceso de su extensión de vida. Para esto se escribió la documentación necesaria requerida por el área de calidad de la Gerencia de Coordinación de Proyectos CNEA NA-SA (GCPCN). Se prepararon las muestras necesarias y se comenzó a llevar a cabo el mismo. Se encontraron problemas durante la etapa de envejecimiento térmico que requirieron la caracterización de distintas partes del cable y, de acuerdo con esto se dejaron planteadas algunas recomendaciones al respecto que deberán ser tenidas en cuenta a la hora de continuar con el plan de calificación de los cables.

Palabras clave: plan de calificación, calificación de equipos, central nuclear Atucha I, calificación de cables.

Abstract.

In the present work, the qualification plan for the valve cable of the moderator circuit of the Atucha I nuclear power plant (CNAI) was developed and carried out within the framework of its life extension process. For this, the necessary documentation required by the quality area of the CNEA NA-SA Project Coordination Management (GCPCN) was written. The necessary samples were prepared and carried out. Problems were found during the thermal aging stage that required the characterization of different parts of the cable and, in accordance with this, some recommendations were made in this regard that should be taken into account when continuing with the cable qualification plan.

Key-words: plan de calificación, calificación de equipos, central nuclear Atucha I, calificación de cables.

1. Definiciones.

CNAI: Central nuclear Atucha I

CNAII: Central nuclear Atucha II

ET: Especificación técnica

AC: Corriente alterna

DC: Corriente continua

T: Temperatura

P: Presión

PVC: Poli Cloruro de Vinilo

LOCA: Loss of Coolant Accident

MSLB: Main Steam Line Break

HELB: High Energy Line Break

T-t: Temperatura en función del tiempo

P-t: Presión en función del tiempo

Hr-t: Humedad relativa en función del tiempo

Ea o equiv.: Energía de activación o parámetro equivalente.

SiR: Silicone Rubber

LTO: Long Term Operation.

NASA: Nucleoeléctrica Argentina S.A.

IR: Insulation Resistance (resistencia a la aislación)

2. Introducción.

2.1 Equipamiento Eléctrico en la Industria Nuclear.

Vista la creciente demanda de fuentes de energía limpia y sostenible de los últimos tiempos, es esperable que, tanto la implementación de programas nucleares a nivel global como la aplicación de programas de extensión de vida de centrales nucleares existentes aumente marcadamente. La Figura 1, muestra el número de reactores nucleares ordenados por edad. Puede verse que la mayor parte se encuentra en la fase de operación a largo plazo (LTO). Esto significa que muchos de ellos han atravesado algún tipo de proceso de extensión de vida o están en vías de hacerlo. En este marco, el equipamiento eléctrico en la Industria Nuclear es una parte vital tanto para el funcionamiento como para la seguridad y operación de cualquier instalación. En todos los años de vida de esta industria, se ha acumulado una vasta experiencia en todo lo que refiere al diseño, operación y calificación de este tipo de equipos. De acuerdo con la bibliografía [1], este equipamiento eléctrico se puede dividir en:

- a) Cables
- b) Conectores y splices
- c) Terminales
- d) Actuadores eléctricos
- e) Motores

f) Etc...

En este trabajo nos centraremos únicamente en la descripción y calificación de cables (a). Aunque muchas de estas consideraciones pueden ser fácilmente extrapolables a otro tipo de equipos eléctricos que también están contemplados en los programas de calificación. La calificación propiamente se definirá y describirá mas adelante en la sección 2.4 de este trabajo.

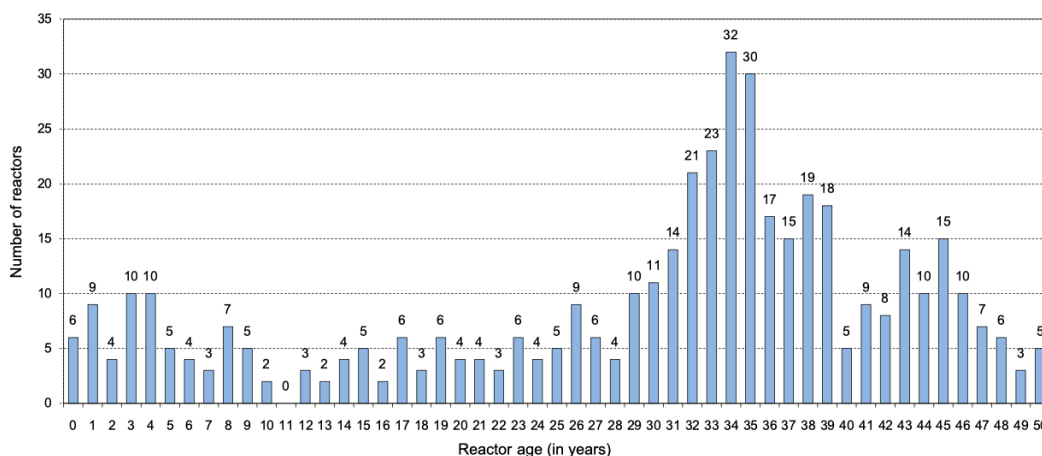


Figura 1. Numero de reactores nucleares operacionales en función de su vida útil. Tal como se muestra en [2].

2.2 Descripción de Cables Eléctricos.

Los cables eléctricos, son utilizados para transmitir señales de instrumentación y control entre sistemas, suministrar potencia o cualquier otro tipo de señales eléctricas utilizadas. A continuación, se dará una breve descripción tanto de los principales tipos de cables, materiales utilizados como de los componentes de las estructuras mas habituales en los mismos de acuerdo con la bibliografía [2].

- i. **Cables de instrumentación:** Son cables de baja tensión y corriente, utilizados para la transmisión de señales tanto analógicas como digitales entre sistemas de instrumentación.
- ii. **Cables de Control:** Nuevamente son cables de baja tensión y corriente utilizados en circuitos de control tales con *switch*, válvulas, *relays* y conectores.
- iii. **Cables de potencia de baja tensión (1 kV):** dan potencia a componentes que no utilizan un voltaje elevado tales como motores, actuadores, calentadores y pequeños transformadores .

La mayor proporción de cables en una planta nuclear se encuentra repartida en estos 3 tipos de cables mencionados. En la Figura 2, se ve un esquema de un cable retorcido (comúnmente multicolor) utilizado para instrumentación.

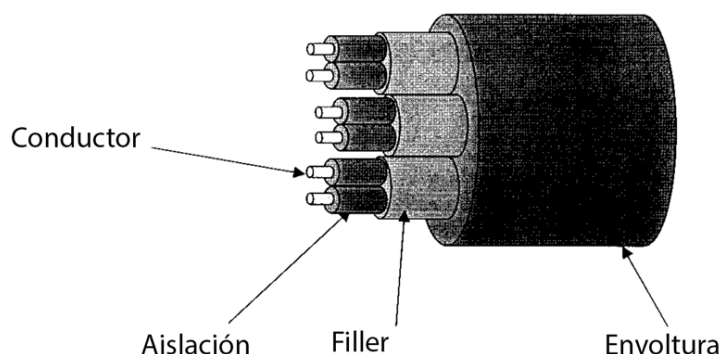


Figura 2 Estructura de cable retorcido, usualmente utilizado para instrumentación.

Los cables individuales van a estar conformados por varios subcomponentes entre los que se encuentran:

- a) **Conductores:** encargados de transmitir la señal eléctrica propiamente dicha
- b) **Aislación:** que evita el intercambio eléctrico entre conductores
- c) **Blindaje:** Que aumenta la resistencia mecánica del cable en cuestión
- d) **Envoltura:** que contiene al conductor, blindaje y aislación.

En algunos cables también puede haber envolturas adicionales, *fillers*, que ocupen el espacio entre conductores en cables multiconductores o cintas que provean resistencia eléctrica adicional, aumente la resistencia mecánica del cable o actúe también como retardante de fuego.

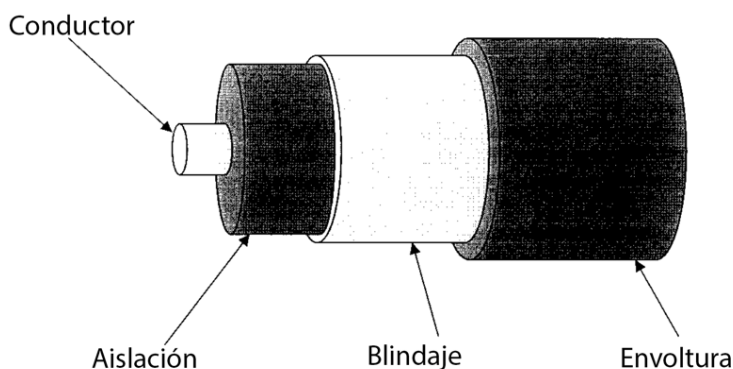


Figura 3. Estructura de un solo conductor, usualmente utilizado para instrumentación.

2.2.1 Materiales presentes en Cables Eléctricos.

Si bien los conductores de los cables son de naturaleza metálica, en este trabajo se analizará particularmente el envejecimiento y degradación de los subcomponentes que presenten un origen orgánico como pueden ser, la aislación, blindaje y envoltura, debido a que estos son los que ejercen la función de seguridad de los cables y son, además, susceptibles al envejecimiento en condiciones de operación, este tema se tratará en la sección 3.8 de este trabajo. Estos subcomponentes suelen estar contruidos en materiales poliméricos dada su flexibilidad, baja densidad y elevada resistencia a la aislación. Si bien algunos subcomponentes descriptos anteriormente tales como cintas y *fillers* también suelen estar fabricados de materiales poliméricos, el estudio de estos es de menor importancia, ya que no son elementos que cumplan funciones de seguridad en los cables.

Por lo general, la envoltura externa y materiales de aislación son de origen orgánico, como se ha mencionado anteriormente. Formulados a partir de un polímero o copolímero base con el agregado de aditivos que provean al material con determinadas propiedades que lo adecuen para su procesado o propiedades finales deseadas. Los aditivos pueden ser, plastificantes, aceites, pigmentos, cargas minerales, etc. Los principales tipos de polímeros utilizados son Polietileno (XLPE) o Poliolefina entrecruzado (XLPO). Elastómeros basados en etileno Propileno, (EPR y EPDM), El Polivinil Cloruro (PVC), este ultimo en plantas mas antiguas ya que esta siendo reemplazado en los diseños mas modernos **Error! Reference source not found.**]. Existen también muchos otros materiales utilizados como aislación que son usados en menores cantidades, un ejemplo de esto es el Polyeter Éter Cetona (PEEK), que es usado cuando las condiciones de operación requieran especial resistencia de alta radiación y temperatura.

2.2.2 Problemática de Cables en Centrales Nucleares.

Los cables eléctricos en centrales nucleares están expuestos a una serie de condiciones que deterioran fuertemente muchas de sus propiedades. En primer lugar, la exposición prolongada a elevadas temperaturas y radiación ionizante en presencia de oxígeno, es una de las principales causas de deterioro de cables eléctricos en la industria nuclear, aunque también existen otros factores como la humedad o influencias mecánicas tales como vibraciones, tensiones, flexión, etc.

Todo esto sumado a los largos periodos de operación que suelen presentar este tipo de instalaciones hacen que sea necesaria la calificación de este tipo de equipos, que mas adelante se describirá en detalle, pero en esencia, esta condición asegura que un componente cumplirá con los requerimientos operativos durante el servicio.

Muchos de los equipos eléctricos mencionados, además, deben cumplir funciones de seguridad, por lo que también es necesario asegurar su correcto funcionamiento antes, durante y después de cualquier accidente de base de diseño (DBA), ejemplos de estos DBA son accidente de pérdida de refrigerante (LOCA), rotura de línea de vapor principal, etc.

Bajo las condiciones típicas de operación en la industria nuclear, en los materiales poliméricos que componen cables se suelen dar cambios a nivel molecular, que dan lugar a cambios completamente irreversibles en sus propiedades. Cambios típicos de acuerdo con la documentación técnica de IAEA[1], son:

- a) Reducción de la elongación a la rotura del material, usualmente asociado a una baja en la resistencia mecánica.
- b) Aumento de la dureza, sobre todo en materiales utilizados como envolturas.
- c) Aumento de la densidad.
- d) Cambios en las propiedades eléctricas.

Si bien a primera vista se puede llegar a pensar que lo mas importante para un cable son los cambios en las propiedades eléctricas, se ha encontrado que estas no son lo suficientemente importantes como para que afecten de manera significativa al funcionamiento del cable, en contraposición, fallas mecánicas pueden llevar a la aparición de roturas o fisuras que en ultima instancia terminan provocando la falla eléctrica del cable.

2.2.3 Situación de los cables instalados en Centrales Nucleares Argentinas.

La situación de los cables en las Centrales Nucleares que actualmente operan en el país es distinta en cada una de las plantas. Para el caso de la Central Nuclear Atucha I, que fue conectada a la red en el año 1974, algunos de los cables fueron fabricados por la empresa SIEMENS (que actualmente no se encuentra como proveedora de cables.) y otros por la empresa italiana CEAT, que tampoco existe en el mercado actual como proveedora. De cara al proyecto de extensión de vida de esta central debe verificarse que muchos de los equipos eléctricos puedan funcionar bajo sus respectivas condiciones de operación durante 30 años más.

La central nuclear Embalse, por otro lado, fue conectada a la red en el año 1984, si bien para la construcción de esta central hubo una mayor participación de proveedores nacionales, muchas de las empresas involucradas no continúan en el mercado como proveedoras de cables, un ejemplo de esto es Pirelli.

La central nuclear Atucha II, es la más reciente y fue conectada a la red en el año 2014. Para las aplicaciones generales de esta central fueron utilizados tanto cables nacionales como importados, aunque para las conexiones eléctricas de equipos que se encuentren dentro de la esfera de contención se utilizaron proveedores mayormente extranjeros, ya calificados por los propios proveedores. Al ser la central de más reciente construcción, todavía no está prevista una extensión de vida.

2.3 Degradación de polímeros en Centrales Nucleares.

2.3.1 Aspectos Generales.

Se ha nombrado anteriormente que existe un deterioro en determinadas propiedades de cables eléctricos en condiciones de operación típicas en una nuclear, y fueron atribuidos a estos, ciertos cambios dados a nivel molecular, se vera entonces a continuación algunos de estos cambios que ocurren, así como también los posibles mecanismos físicos y químicos que los producen.

2.3.2 Mecanismos de envejecimiento y degradación.

Las condiciones de operación a la que son expuestos los materiales poliméricos que conforman los cables son de las mas variadas, temperatura, humedad, radiación actúan muchas veces de manera sinérgica para producir cambios en el material que esta expuesto a este ambiente. Por lo tanto, para el estudio del envejecimiento será necesario que el modelo teórico contemple el actuar conjunto de todos estos mecanismos.

Un Ejemplo de esto es el modelo de la auto oxidación básica o Basic Auto-oxidation Scheme (BAS), presente en la bibliografía [4]. En este esquema, la radiación y el estrés térmico se muestran como iniciadores de radicales libres, tal como se ve en la Figura 4.

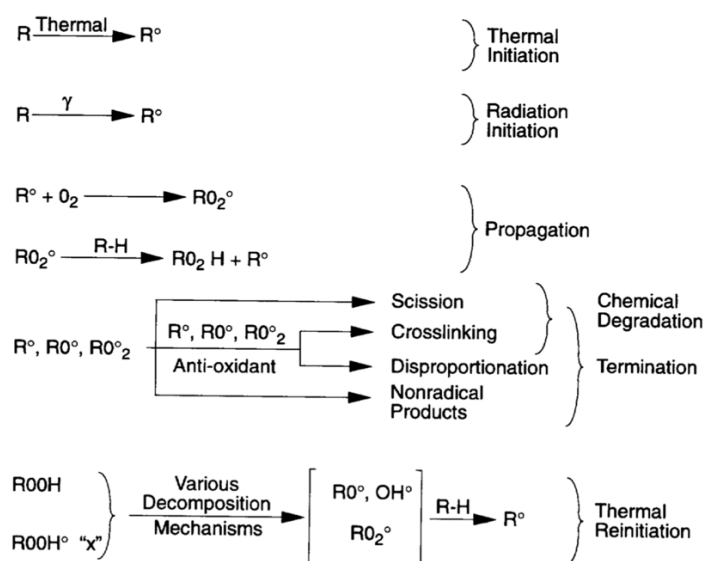


Figura 4. Ejemplo mecanismos de degradación de polímeros, obtenida de la IEEE-775 [4].

El oxígeno reacciona con estos radicales generando varios tipos posibles de degradación que se explicarán brevemente a continuación de acuerdo con el documento de IAEA TECDOC-1188. En

principio, se puede hacer una división entre mecanismos de envejecimiento químico y físico. Dentro de la primera categoría, nos podemos encontrar con:

- a) Ruptura de cadenas macromoleculares: dos nuevas cadenas son creadas luego de la ruptura de una, como se ve en la Figura 5.

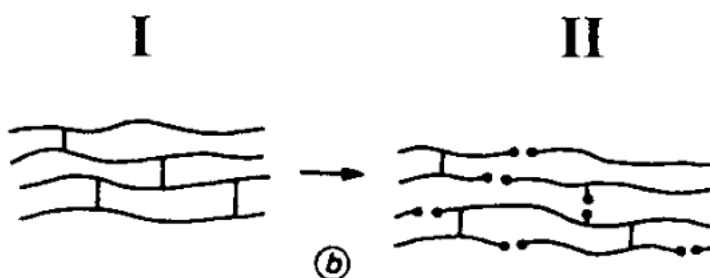


Figura 5. Ruptura de cadenas poliméricas, imagen tomada de IAEA-TECDOC-1188 [1]

- b) Reacciones de entrecruzamiento: consisten en la formación de enlaces covalentes entre dos cadenas macromoleculares adyacentes. Esto va formando una red tridimensional a la vez que aumenta la densidad de entrecruzamiento (y del material en sí).

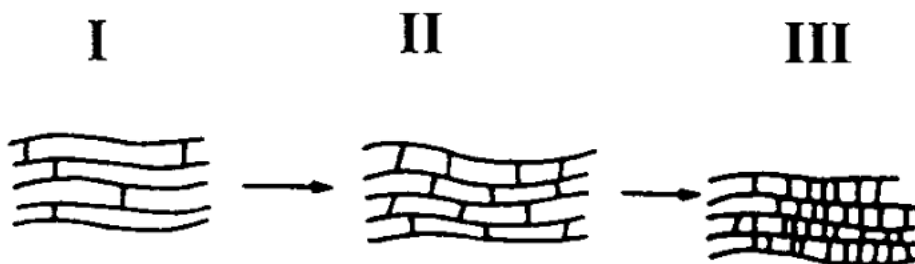


Figura 6. Representación de entrecruzamiento, también de TECDOC 1188.

- c) Reacciones de Oxidación: Iniciado con la formación de radicales libres (en este caso podría ser por efecto térmico o por radiación), seguido de un paso de propagación en donde se generan radicales de peróxido e hidropéroxido.
- d) Procesos controlados por difusión de oxígeno: La cinética de esta reacción está controlada por la difusión del oxígeno cuando el proceso de iniciación de radicales libres es más rápido que el proceso de difusión de oxígeno en el material polimérico.

- e) Eliminación de HCl: esta reacción corresponde a la eliminación de una molécula de HCl a partir de una cadena macromolecular de PVC. Un mecanismo similar ocurre en polímeros fluorados, pero se elimina en este caso HF.

Por otro lado, existen algunos mecanismos físicos que pueden llevar a la degradación del material bajo ciertas condiciones.

- a) Evaporación de plastificantes: El plastificante se ira evaporando de la superficie provocando la difusión de este desde el centro del polímero hacia la superficie. Este mecanismo afecta polímeros con alto contenido de plastificantes como el PVC. Tal como se ve en la Figura 7.

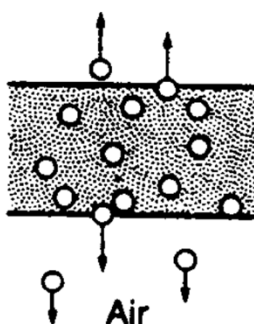


Figura 7. Migración de plastificante a la atmósfera, también de TECDOC 1188.

- b) Migración de plastificante: cuando se utilizan varias capas de material polimérico puede ocurrir que el plastificante de uno o varios de ellos migre impulsado por el gradiente de concentraciones.

La bibliografía recomienda también tener en cuenta el diagrama de flujo que se ve en la Figura 8, para detectar posibles mecanismos dominantes durante un envejecimiento acelerado (que se presentará mas adelante), en donde las referencias son:

- A: Efectos de recristalización, debe ser considerada la extrapolación dentro del rango de temperatura de fusión.
B: Competencia entre evaporación/difusión de plastificantes y liberación de HCl debe ser considerada.
C: Para el programa de envejecimiento se debe elegir una baja tasa de dosis para evitar oxidación limitada por difusión.
D: Pueden ocurrir ciertas interacciones tales como migración de plastificante, efectos catalíticos, etc.
E: No hay consideraciones especiales que realizar.

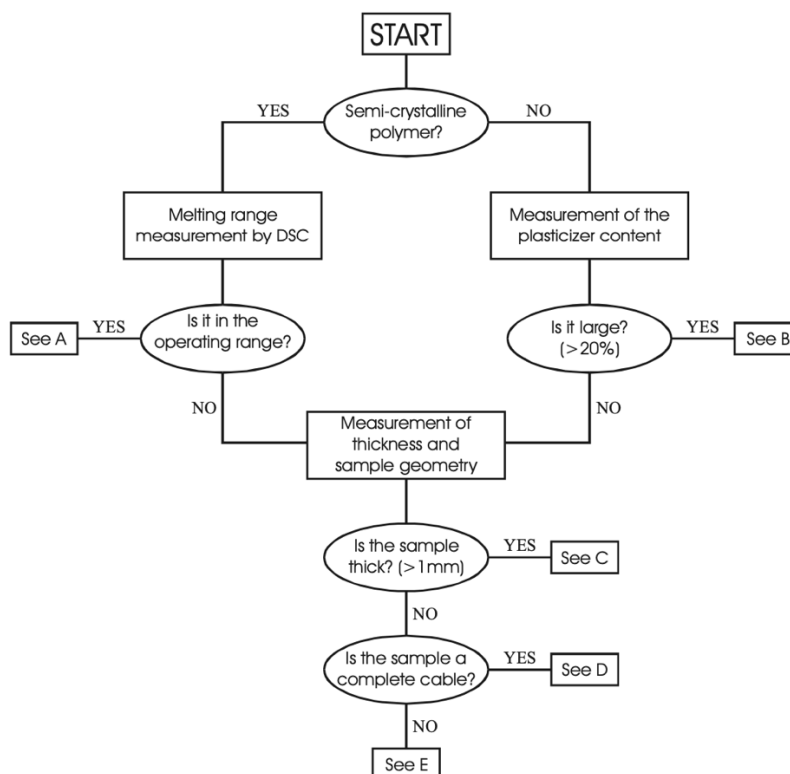


Figura 8. Diagrama de flujo para evitar problemas a la hora de realizar un envejecimiento acelerado.

2.3.3 Diagrama de predominancia.

Se muestra a continuación, en la Figura 9, un diagrama esquemático en donde están presentes los dominios de envejecimiento predominantes en función de la tasa de dosis y la temperatura. Para cada una de estas zonas los mecanismos de envejecimiento son distintos y se puede establecer ecuaciones que modelicen cada uno de estos procesos.

Se ve en el Dominio I, que el envejecimiento es típicamente por radiación, mientras que en el dominio II es preponderantemente térmico. La zona marcada como III presenta ambos tipos de envejecimiento, una mezcla entre envejecimiento térmico y por radiación. Finalmente, a partir del dominio IV, el envejecimiento se producirá preponderantemente por oxidación controlada por difusión. El envejecimiento acelerado debería realizarse, además, en el mismo dominio para evitar agregar incertezas adicionales.

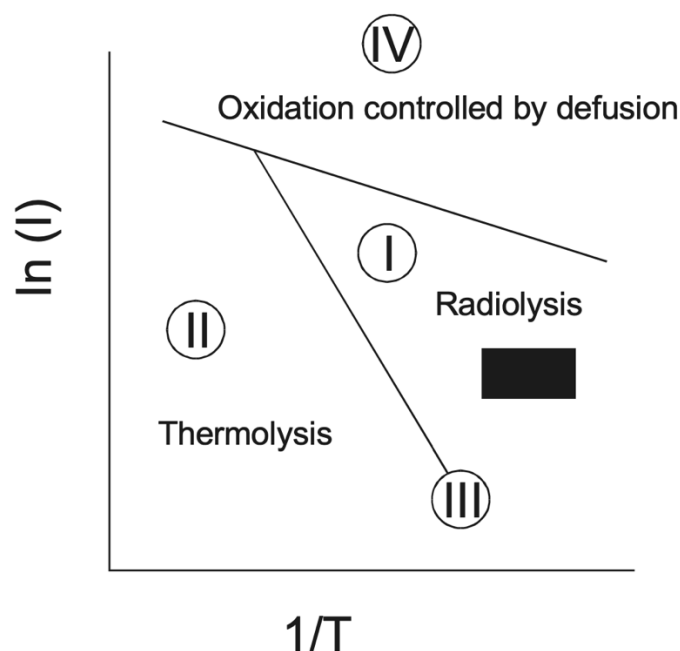


Figura 9. Diagrama de predominancias.

2.3.4 Modelo de envejecimiento acelerado (Arrhenius).

Como modelo físico para la predicción de la variación de las propiedades mecánicas durante la vida de servicio se suele utilizar la ley de Arrhenius, método que suele ser aceptado en todas las normas de calificación. La cual asume que la constante de velocidad (k), la cual representa la velocidad a la cual varía una propiedad decrece con la inversa de la temperatura.

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{RT}$$

Ecuación 1

En donde A es una constante para cada material, E_a es la energía de activación para un determinado proceso, R es la constante de los gases y T , la temperatura absoluta.

La Ecuación 1, en escala logarítmica y en función de $1/T$, es la ecuación de una recta, cuya pendiente, es proporcional a la E_a del proceso. Sin embargo, cuando se lleva a cabo un envejecimiento acelerado en un amplio rango de temperaturas, se suele ver un “punto de quiebre” que corresponde a un cambio en el régimen cinético del mecanismo actuante. Es común encontrar menores valores de energía de activación a menores temperaturas [5]. Un ejemplo de esto puede verse en la Figura 10.

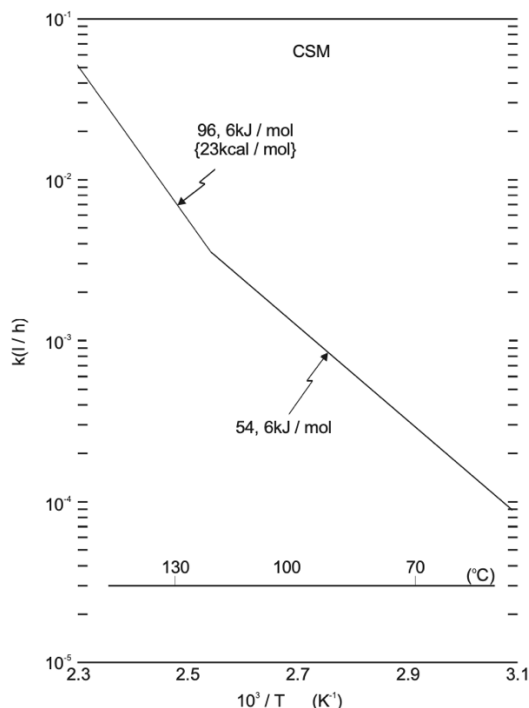


Figura 10. constante de velocidad (k) en función de la inversa de la temperatura ejemplo sacado de literatura [5].

Puede verse que si se intenta extrapolar datos obtenidos a altas temperaturas a temperaturas mas bajas se podría subestimar fuertemente la tasa de envejecimiento térmico y se podrían llegar a predecir tiempos de vida útil mucho mayores a lo que realmente ocurrirá. Es recomendable entonces, que el intervalo entre temperaturas utilizadas en envejecimientos acelerados no supere los 25 °C.

La E_a , es una característica propia para cada material y, como puede verse en el grafico anterior, es relativamente constante dentro de determinados rangos de temperatura. Esta energía se obtiene a través de ensayos de envejecimiento acelerado en hornos. Se colocan muestras de un mismo material y se determina el tiempo que tarda a distintas temperaturas en llegar a un determinado valor de cierta propiedad. Por ejemplo, cuanto demora en llegar al 50% de elongación respecto del material sin envejecer.

Obtenida la E_a , es posible calcular los tiempos de envejecimiento a temperaturas de servicio a partir de la temperatura ensayada en el laboratorio (que suele ser mas alta para que los tiempos de ensayo sean menores).

$$t_1 = Ae^{\frac{Ea}{RT_1}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$t_2 = Ae^{\frac{Ea}{RT_2}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{Ea}{R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Las ecuaciones 2 y 3 corresponden a dos condiciones de envejecimiento dadas, una de ellas son las condiciones en servicio y otra, las condiciones de laboratorio indistintamente. Si dividimos ambas ecuaciones, obtenemos la ecuación 4, de la que se puede despejar el tiempo que tardará el material en degradarse a altas temperaturas.

2.4 Calificación de equipos.

En la Industria Nuclear de potencia, el correcto funcionamiento de equipos y sistemas de seguridad es de vital importancia. Se puede definir entonces la calificación de equipos (EQ) como la demostración de que los mismos, junto con los sistemas de seguridad puedan llevar a cabo las funciones para las que fueron diseñados.

Por otro lado, el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) define la calificación de equipos como “la generación y mantenimiento de evidencia para asegurar que el equipo operará bajo demanda, para cumplir con los requisitos de desempeño del sistema durante condiciones de servicio normales y anormales (o transitorios) y eventos de base de diseño postulados” [6].

Para llevar a cabo estas tareas de generación y mantenimiento de evidencias, se utilizan procedimientos normalizados y avalados por años de evidencia empírica.

Los métodos de calificación comúnmente utilizados se describirán a continuación.

2.4.1 Ensayo de tipo.

En un ensayo de tipo se somete una muestra representativa del equipo, incluidas sus interfaces, a una serie de pruebas, que simulan los efectos de los principales mecanismos de envejecimiento durante el funcionamiento normal. Los ensayos de calificación del equipo se suelen realizar con el mismo en funcionamiento y en un estado que represente su uso previsto en la operación real (incluido cualquier software). Luego, el equipo se somete al ensayo DBE que simulan y, por lo tanto, establecen la configuración probada para el servicio del equipo instalado, incluida la orientación, las interfaces, el sellado de conductos y los entornos esperados. Una prueba de tipo

exitosa demuestra que el equipo al final de su vida calificada puede realizar las funciones de seguridad previstas durante el tiempo de funcionamiento requerido.

2.4.2 Experiencia operativa.

Cuando se requiere la calificación para un ambiente moderado (mild environment), se pueden utilizar los datos de rendimiento de un equipo de diseño similar que ya ha funcionado con éxito en condiciones de servicio conocidas. Siempre y cuando, las condiciones de operación sean iguales o menos severas. La aplicabilidad de estos datos va a depender de que las condiciones de servicio anteriores estén correctamente documentadas, el rendimiento del equipo y la similitud con el equipo que se va a calificar.

2.4.3 Análisis.

El análisis de datos y otros ensayos para determinar las propiedades de los materiales, la clasificación del equipo y la tolerancia ambiental se pueden utilizar para complementar la demostración de la calificación. Sin embargo, el análisis por sí solo no se puede utilizar para realizar la calificación. Esta debe comprender una evaluación lógica, una evaluación de similitud o un modelo matemático válido del equipo a calificar. Las bases para el análisis generalmente incluyen leyes físicas, resultados de los datos de prueba y la experiencia operativa.

2.4.4 Métodos combinados.

El equipo puede calificarse mediante combinaciones de ensayo de tipo, experiencia operativa y análisis. Por ejemplo, cuando no sea posible realizar una prueba de tipo de un conjunto completo, se pueden utilizar pruebas de componentes complementadas con análisis.

2.4.5 Calificación de cables.

De acuerdo con la sección 5.2 de la norma Std. IEEE 383 [7], La calificación por ensayo de tipo es el método de calificación preferido. Este ensayo debe ser diseñado para demostrar que el cable o equipo es capaz de llevar a cabo las funciones clase 1E luego de ser sometido a condiciones de estrés causadas por determinadas condiciones de servicio (incluido un DBE) por el tiempo que dure la vida calificada. El ensayo debe simular conservativamente las condiciones de servicio en el lugar donde el cable se encuentre cumpliendo su vida de servicio.

Además, en una calificación de ensayo de tipo se debe incluir datos que prueben que las muestras son representativas, que las condiciones del ensayo son tan o mas severas que las condiciones de operación de planta y que la información reunida relacionada al ensayo es suficiente como para asegurar que las funciones de seguridad del equipamiento serán correctamente ejecutadas.

Los ambientes severos (harsh environment), son aquellos que en caso de accidente cambian sustancialmente, por ejemplo, algunos recintos dentro y fuera de la contención de centrales tipo Atucha durante un LOCA .

2.4.6 Vida calificada

Un objetivo de la calificación es establecer la llamada vida calificada para cables y equipamientos que se encuentran instalados en ambientes severos y que además deban llevar a cabo alguna función de seguridad durante un DBE. La vida calificada puede ser expresada en años a una dada temperatura de operación. La calificación de equipos clase 1E debe ser llevada a cabo usando un proceso de calificación específico o genérico. En el caso de la calificación específica, los criterios de calificación son establecidos para una serie de requerimientos que deben cumplirse para que el equipamiento pueda llevar a cabo una única aplicación, mientras que, en el caso genérico, los requerimientos deben asegurar el cumplimiento de múltiples aplicaciones.

2.4.7 Condición calificada.

Se define a la condición calificada como el valor de los Parámetros de Monitoreo (PM) para los cuales se garantiza la capacidad del cable a tener un desempeño satisfactorio según diseño ante un DBE.

En el proceso de calificación se somete a una muestra representativa, a través de ensayos de laboratorio, a un envejecimiento acelerado equivalente al envejecimiento en condiciones de trabajo por el tiempo de vida útil. Dicho envejecimiento acelerado se lleva a cabo bajo algunos supuestos tales como: unicidad de mecanismo de degradación actuante, ciertos modelos de equivalencia de condiciones de trabajo y condiciones de envejecimiento acelerado, no variación de parámetros asociados a dichos modelos, etc. Posteriormente deben medirse los PM elegidos a distintos tiempos y finalmente someter al cable al ensayo de DBE. Si el cable tiene un desempeño satisfactorio los valores de PM medidos antes de la prueba DBE más un cierto margen de seguridad constituirán la Condición Calificada.



Figura 11. Esquema de PM vs tiempo para determinación de condición calificada tomada de **Error! Reference source not found.**

2.5 Normativa existente para la Calificación de equipos.

La norma principal en lo que respecta a calificación de equipos de clase 1E (aquellos que cumplen funciones de seguridad) es la IEEE Std 323, inicialmente publicada en 1971 y revisada en 1974, 1975, 1983 y 2003 [8]. En la norma se introducen conceptos importantes, define requerimientos específicos para cada tipo de ambiente, entre otras cosas. En el 2016, en un esfuerzo conjunto IEC (Europa), IEEE (América) se fusiona esta norma con la con IEC 60780, dando lugar a la IEC-IEEE 60780-323 [9], norma globalmente aceptada hoy en día.

La norma IEC-IEEE Std. 60780-323 puede ser considerada una norma general aplicable a todos los equipos eléctricos importantes para la seguridad, por lo que es necesario el uso de una norma mas específica para la calificación de cables eléctricos en plantas nucleares, esta es la norma IEEE Std. 383, directamente de esta norma se obtuvieron los principales procedimientos para la generación de documentación de este trabajo. A su vez, también se utilizaron normas mas específicas como por ejemplo la IEEE Std. 775, para el envejecimiento del material polimérico presente en los cables.

Existen, además, normas específicas que también fueron utilizadas y están debidamente referenciadas en la documentación redactada, por ejemplo, la IEC/IEEE 62582-3[10] que describe procedimientos aplicables al ensayo de elongación a la rotura en sistemas de instrumentación y control importantes para la seguridad. No es la intención describir todas las normas utilizadas sino dar un pantallazo general de la normativa existente y utilizada. En la Figura 12, se puede ver un diagrama completo con la estructura jerárquica de la documentación referente a calificación de equipos.

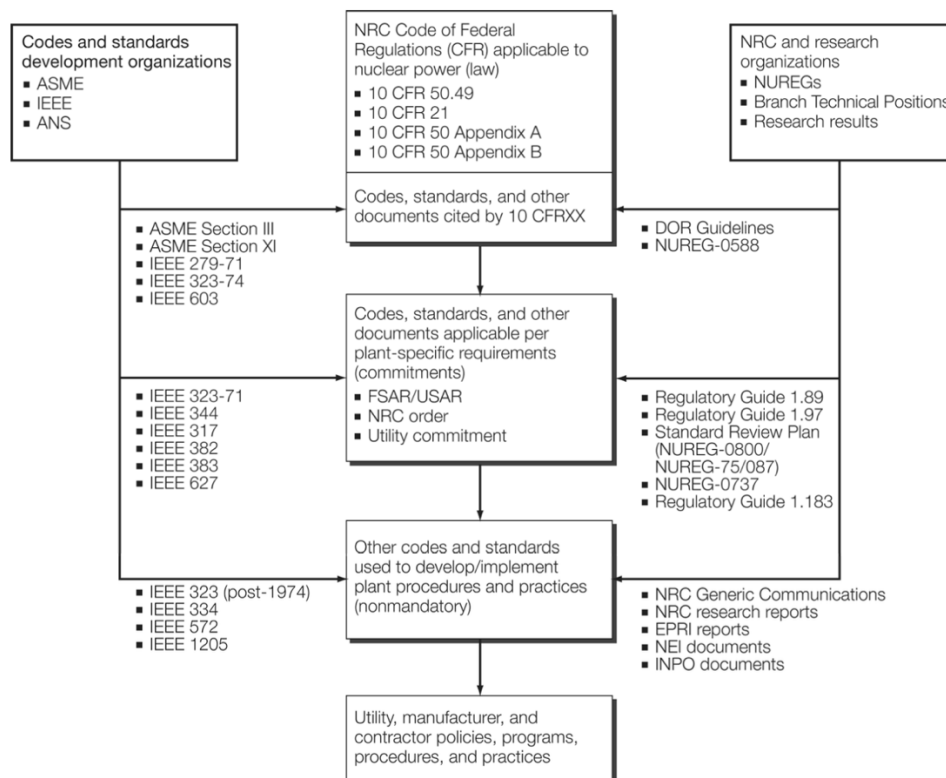


Figura 12. Estructura jerárquica de documentación referente a calificación de equipos.

2.6 Diseño Atucha y valvula FIAT.

2.6.1 Descripción y función.

La central nuclear Atucha I es una central nuclear de potencia que utiliza uranio natural (y también levemente enriquecido) que es moderada y refrigerada por agua pesada. Fue conectada al sistema eléctrico nacional en 1974 con una potencia de 330 MWe. La central cuenta con mas de 40 años de operación y en el marco del programa de su extensión de vida, se hace necesario calificar muchos de los sistemas presentes en la misma.

En el presente trabajo se desarrollará el proceso de calificación de los cables de las válvulas del moderador QM02S01-07 y QM02S02-07, (válvulas FIAT). Para esto deben evaluarse :

- Las funciones de seguridad de las válvulas
- Las características de diseño y constructivas del equipo
- Mecanismos de degradación que podrían afectar al equipo
- Los requerimientos operativos que se desea preservar del equipo

La función de seguridad de las válvulas esta descripta en el manual de operaciones correspondiente de la Central Nuclear Atucha I (CNAI) [12]. En síntesis, su función es conmutar entre los distintos modos de operación del circuito moderador, el mismo es el encargado de la regulación de la temperatura media del moderador, eliminación del calor de decaimiento cuando el reactor esta parado y, en caso de emergencia, refrigerar el reactor alimentando desde el moderador a los canales de refrigeración del reactor, así como la refrigeración del agua de inyección de seguridad.

El cuerpo de la válvula, el actuador y el sensor de posición fueron desarrollados por la división nuclear de FIAT (actualmente fuera del mercado) durante fines de la década del 60. Se muestra en la Figura 13, un esquema de esta.

Marcado en color azul en la imagen de la válvula, se encuentra la frontera de presión que separa el fluido del moderador del ambiente exterior. Para su funcionamiento, se energizan las bobinas (verde, amarillo, rojo) lo que genera un campo magnético que mueve el vástago de la válvula hacia la posición de apertura o cierre. Es importante destacar que la válvula solo permanece energizada un muy breve período de tiempo ya que el vástago queda fijado mecánicamente en la posición.

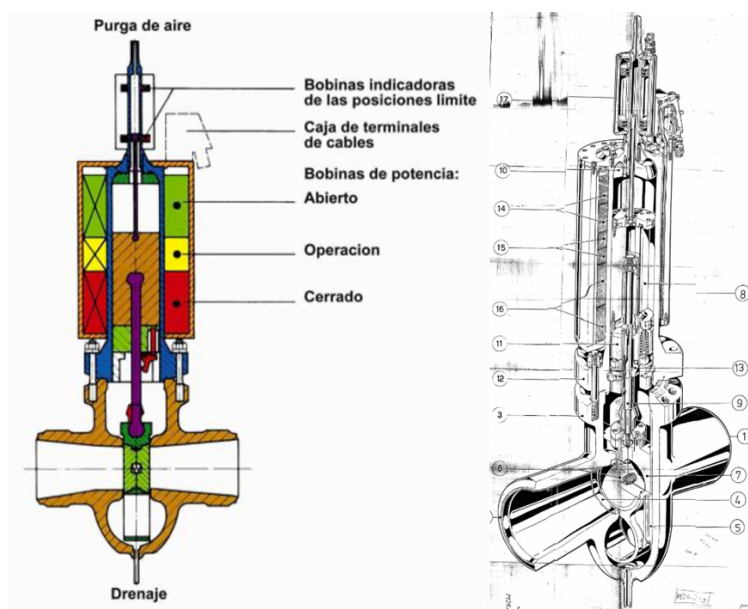


Figura 13. Diagrama constitutivo de la válvula (izquierda) fragmento de plano de la válvula (derecha).

2.6.2 Condiciones de ambiente normales.

Las válvulas se encuentran ubicadas en el recinto 1-107. En este lugar, la principal fuente de calor son las cañerías del moderador, por lo que, para conocer la temperatura local de las

válvulas, se colocaron sensores de temperatura en las mismas en el marco del proyecto de extensión de vida de la central. Se puede ver en la Tabla 1. El registro de temperatura de la válvula. Se toma entonces una temperatura de 95 °C como representativa del cuerpo de la válvula. Puede verse la gran dependencia que tiene la temperatura de las válvulas con la temperatura del moderador, y también se debe notar que es casi independiente de la estación del año.[13]

En cuanto a la tasa de dosis, se realizaron mapas de dosimetría en el recinto y se obtuvo una dosis de 0.881 kGy para 495 días a plena potencia, con lo que se calcula una tasa de dosis de 0.07 Gy/h.

FECHA	TEMPERATURA SENSORES [°C]		TEMPERATURA MODERADOR [°C]		ESTADO DE LA PLANTA
	QM01S002	QM01S003	ENTRADA QP QM01T005(*)	SALIDA QP QM01T006(*)	
06/10/2017	26,1	31,5	55,3	54,6	Parada programada
23/10/2017	90,4	78,5	213,99	161	En servicio al 68%
01/11/2017	91,2	79,2	213,99	160,84	En servicio al 68%
04/12/2017	91,6	79,7	214,33	161,4	En servicio al 68%
12/12/2017	92	80,1	214,59	161,4	En servicio al 68%
20/12/2017	92,4	80,3	214,75	161,48	En servicio al 68%
26/12/2017	92,7	80,1	214,51	160,52	En servicio al 69%
09/01/2018	92,1	78,4	214,25	159,88	En servicio al 69%
31/01/2018	91,9	80,1	215,11	159,88	En servicio al 69%
09/02/2018	92,5	81,2	214,94	159,72	En servicio al 69%
12/03/2018	29,5	30,9	48,58	49,51	Fuera de servicio, parada programada
22/05/2018	93,9	80	219,9	157,17	En servicio al 100%
23/07/2018	33,1	37,6	Sin información	Sin información	Parada fría con presión
23/08/2018	95,9	82,6	221,8	158,29	En servicio 100%

Tabla 1. Medidas de temperatura en contacto con las válvulas.

2.6.3 Accidente de base de diseño (DBA).

La calificación de equipos clase E1 también abarca los accidentes de base de diseño, que están detallados y documentados en el programa de calificación vigente de la planta [14].

Se describirá a continuación brevemente cada uno:

- 1) LOCA: rotura en la barrera de presión del sistema primario con una sección de escape limitada que, dependiendo de su tamaño, puede compensarse parcialmente con la

reserva de agua pesada del sistema de control de volumen o con la inyección de agua liviana desde el ECCS (Sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo)

- 2) LOCA grande: rotura en la barrera de presión del sistema primario con una sección que supere a la del LOCA pequeño y hasta dos veces la sección de la cañería principal (LOCA 2A).
- 3) MSLB: rotura en la línea de vapor vivo entre la salida del generador de vapor y la penetración de la contención.
- 4) FWB: roturas grandes de tuberías de agua de alimentación entre el cabezal de regulación y el generador de vapor.

De todos estos DBAs detallados, el LOCA grande es el mas severo de todos.

De acuerdo con estudios y simulaciones realizadas (ver mas adelante la sección 3.4.2) en un accidente tipo LOCA se espera que el equipo tenga que operar en medio de un rapido aumento de temperatura y presion en una atmosfera de vapor saturado, con temperaturas maximas de 125°C y 2,35 bar.

Bajo estas condiciones ambientales la propuesta de este trabajo es desarrollar el plan de calificacion para los cables que suministran potencia a las bobinas de las valvulas.

2.7 Experiencia previa en calificacion de cables.

El grupo EQ de la Gerencia de Coordinación de proyectos CNEA NA-SA (GCPCN) ha realizado con anterioridad la calificación de un cable de goma siliconada (SiR) para la central nuclear Atucha I, en el mismo marco del proyecto de extensión de vida de esta. Esto ha sido documentado en el informe DC-EQ.CNAI.001-003 [15] los ensayos realizados en este informe se encuentran en consistencia con la normativa IEC-IEEE y con las consideraciones especiales del diseño de los cables.

Se seleccionaron dos muestras, que fueron provistas por NA-SA, de tal forma que sean representativas de las familias de cables SIHF, SIHF-Y, SIHFP y tipo SIHFP-Y instalados en CNA I.

El primero, tiene un código interno: CAB-059 (nomenclatura en desuso en la actualidad), es un cable de 35 metros de largo extraído en la parada programada de octubre de 2017 de una válvula del sistema TL. El cable consta de 4 conductores de 1,5 mm² de colores: rozo, azul, blanco y negro como se ve en la Figura 14.

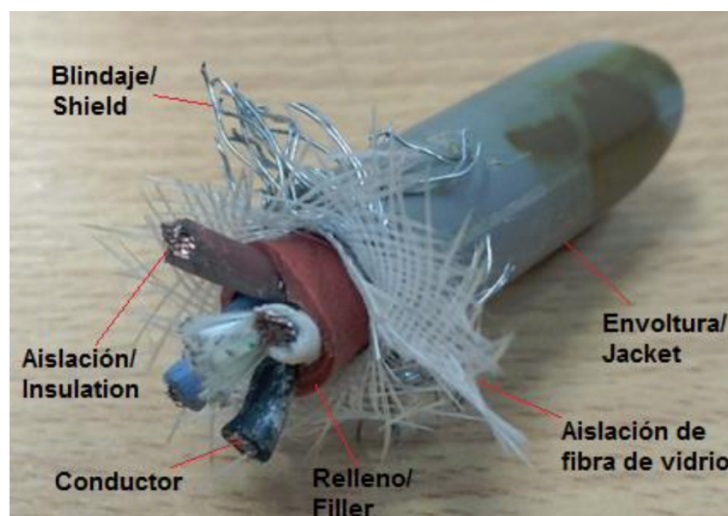


Figura 14. Partes del cable CAB-059.

La segunda muestra, de código CAB-018 es un cable con envoltura y aislaciones de goma siliconada, consta de 33 conductores color gris, y puede verse en la Figura 15.

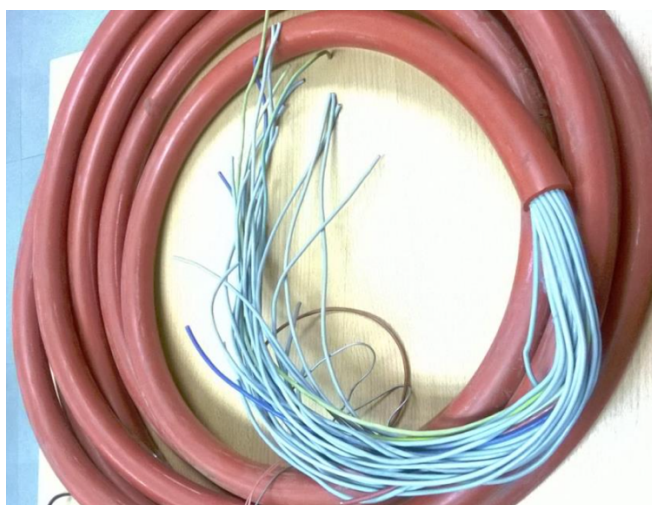


Figura 15. Muestra de cable CAB-018.

Los cables fueron envejecidos térmicamente el equivalente a 72 años a 170 °C. Además, se realizó un envejecimiento por radiación a una tasa de dosis de alrededor de 1kGy/h hasta una dosis total de 174 kGy.

Se realizaron ensayos mecánicos y eléctricos de acuerdo con la normativa vigente además de ensayos de enrollado y desenrollado.

En una de las inspecciones visuales finales de la muestra de CAB-059 se encontró además resquebrajamiento de la envoltura de PVC un liquido oleoso recubriendo la misma. Esto puede ser visto en la Figura 16. Habrá que tener en cuenta este hecho en posteriores calificaciones y analizar si el exudado del cable puede resultar en una interacción negativa para el mismo.

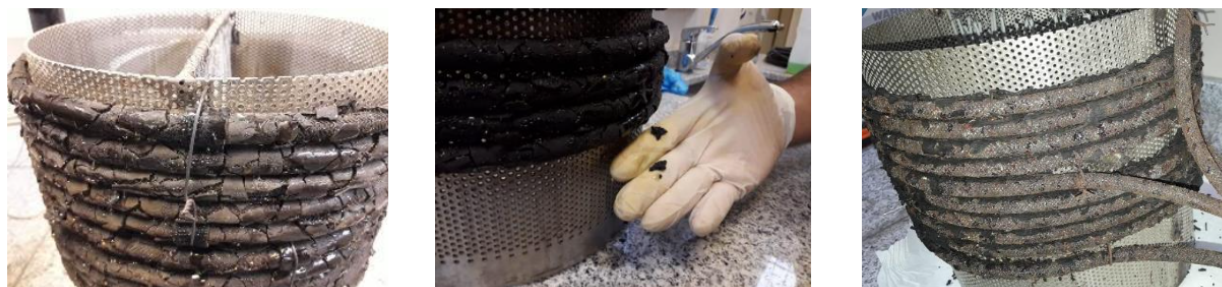


Figura 16. Envoltura de muestras de CAB 059 al cabo del primer envejecimiento térmico (izquierda y centro); desprendimiento de envoltura en muestras de CAB 059 al cabo de sucesivos envejecimientos térmicos (derecha).

2.8 Sistema de calidad vigente en la GCPCN.

La GCPCN, posee un sistema de calidad vigente esquematizado en la Figura 17. Consta de una serie de procesos estratégicos (toda la línea superior), una serie de procesos de apoyo (parte inferior), cuyo propósito es ser complementario a la rama de procesos principales (centro). El primero de ellos es la revisión de contratos (que no tiene incumbencia en este trabajo) pero esta detallado en el procedimiento operativo PO-CPCN_AEDT-006 de la gerencia. Consta básicamente de 4 etapas, en la primera de ellas el jefe de departamento (JDTO) comunica a los involucrados los aspectos técnicos, además del inicio de actividades, seguido por las modificaciones necesarias al contrato, posterior cierre y finalmente una medición de la satisfacción del cliente.

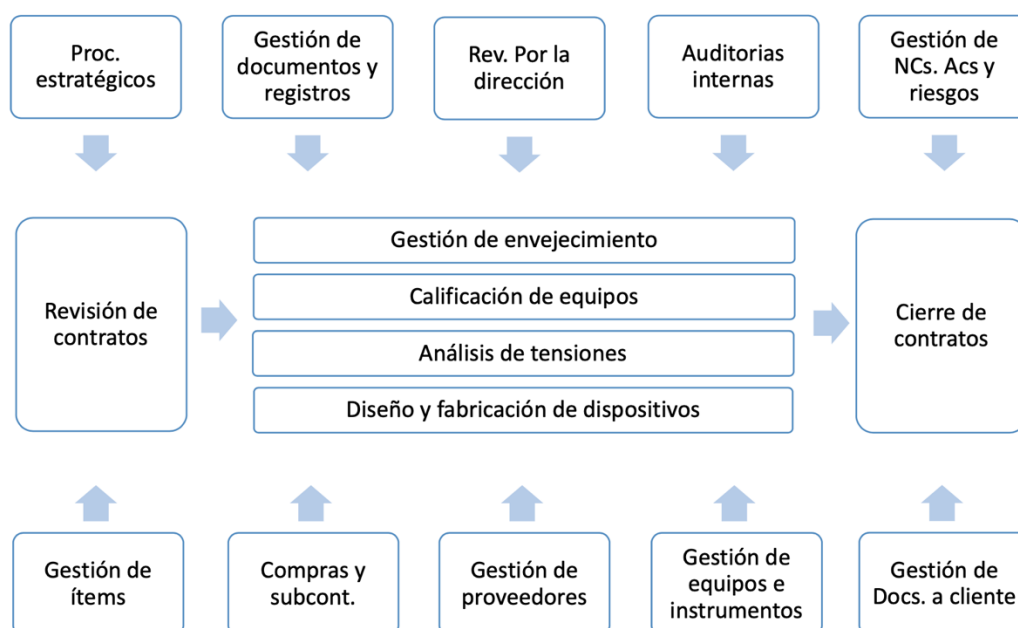


Figura 17. Esquema de trabajos.

Para los alcances de este trabajo nos vamos a centrar en la línea de trabajo “calificación de equipos”, detallada en la Figura 18. El cual es descripto en el procedimiento PO-CPCN_AEDT_EQ-001 “Estudios de factibilidad y elaboración de especificaciones de calificación”.

Existen 4 etapas principales que constituyen el primer ítem, Especificación de calificación que se complementan mutuamente:

- 1) Inicio del trabajo: Luego de informados los aspectos técnicos del contrato y fechas pertinentes al jefe la calificación (JEQ), el responsable de calidad (RC) le asigna el código al proyecto y el JEQ genera la carpeta del proyecto. Finalmente, el JEQ designa al responsable de calificación (REQ).
- 2) Análisis de viabilidad de la calificación: Se analiza la documentación técnica, requisitos y criterios de calificación, así como también características del equipo a calificar. Se tendrán en cuenta luego los escenarios y condiciones de accidente postulados por la central. Es necesario además estudiar mecanismos de falla. Todo este proceso finaliza con la emisión de un informe al cliente con un dictamen sobre la viabilidad.
- 3) Pruebas preliminares: muchas veces para completar la especificación de calificación se pueden requerir algunas pruebas preliminares, estas se registran en el documento interno FO-CPCN_AEDT_EQ-016, “Prueba preliminar”. En las pruebas preliminares hay otros procesos (amarillo) que no se detallaran aquí tales como gestión de ítems, de proveedores, etc.
- 4) Finalmente, estos procesos culminan con la elaboración de la especificación de calificación. De acuerdo con el documento interno FO-CPCN_AEDT_EQ-010 “Especificación de calificación” y elaborada en base al instructivo IT-CPCN_AEDT_EQ-007, “Instructivo para la elaboración de especificaciones de calificación”

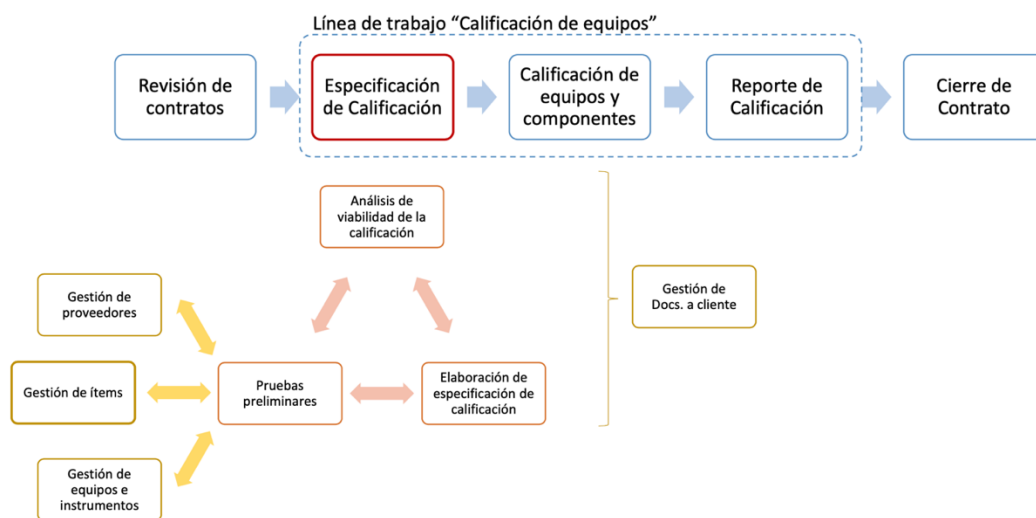


Figura 18. Línea de trabajo “calificación de equipos”.

Dentro de la línea de trabajo, “calificación de equipos” sigue la calificación de equipos y componentes propiamente dicha. Un diagrama de esto se puede ver en la Figura 19, con las correspondientes sub-etapas, que se describirán a continuación y están descriptas en el documento interno PO-CPCN_AEDT_EQ-002, “Calificación de equipos y componentes”.

- 1) Recopilación de la información de entrada: En esta primera etapa el REQ estudia la información de entrada entre la que se encuentra la parte técnica del contrato, Especificación de la calificación y registros asociados, Informes previos emitidos, Normas y regulaciones aplicables, Especificaciones del cliente, Registros de inspección de recepción del ítem, Especificación y/o documentación del ítem entre otras cosas.
- 2) Planificación de la calificación: el REQ elabora un plan de calificación que queda plasmado en el documento FO-CPCN_AEDT_EQ-012, “Plan de Calificación”. Existe un procedimiento operativo, que describe de manera general como completar cada ítem del plan de calificación. PO-CPCN_AEDT_EQ-002, “Calificación de equipos y componentes”. Además del instructivo PO-CPCN_AEDT_EQ-002, “Calificación de equipos y componentes” que brinda los lineamientos básicos para completar el apartado “etapas” del plan de calificación.
- 3) Identificación y análisis de riesgos y oportunidades: el JEQ, REQ y RC evalúan riesgos y oportunidades, que queda registrado en el formulario FO-CPCN_AEDT-029, “Identificación de riesgos y oportunidades”.
- 4) Cronograma: El REQ elabora un cronograma de calificación de acuerdo con el formulario PO-CPCN_AEDT_EQ-002 Calificación de equipos y componentes. El cronograma debe ser aprobado el JEQ y por el cliente si así fuera requerido. Finalmente, el REQ guarda la versión aprobada del cronograma en la carpeta “Ensayos de calificación” dentro de la carpeta del proyecto específico.
- 5) Seguimiento del plan de calificación: Se realiza un seguimiento a cargo del REQ, de acuerdo con el documento PO-CPCN_AEDT_EQ-002, “Calificación de equipos y componentes”.
- 6) Verificación y validación: Al finalizar cada etapa se debe ir verificando cada etapa asegurando que se hayan cumplido los requisitos según corresponda. Se considerará como validación de la calificación a la aceptación conforme del reporte de calificación por parte del cliente. PO-CPCN_AEDT_EQ-002 Calificación de equipos y componentes.

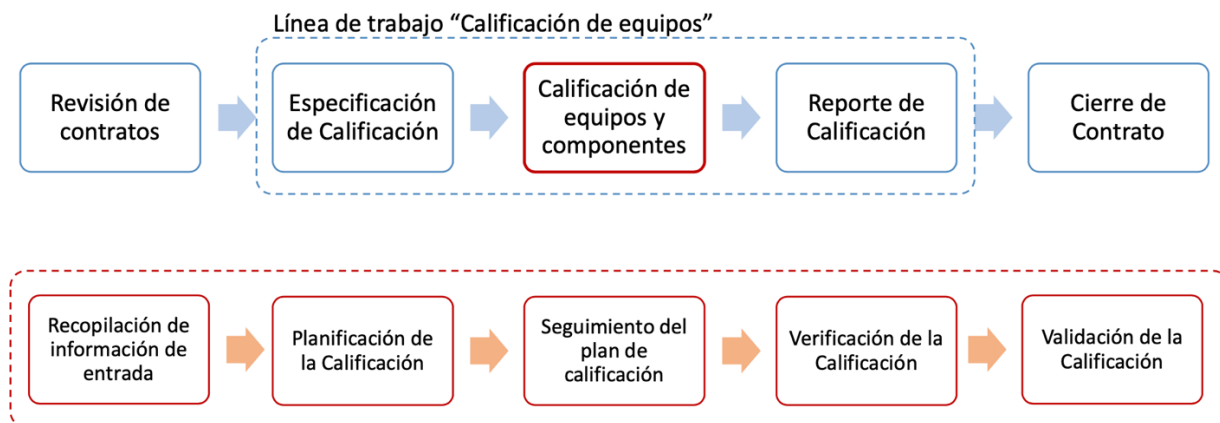


Figura 19. Línea de trabajo "calificación de equipos".

No es de incumbencia a este trabajo la revisión y cierre de contratos, por lo que no se detallaran, aunque son procedimientos requeridos por el área de calidad de la GCPCN. Sí se encuentran en el alcance de este trabajo la revisión de la especificación de calificación, la redacción del plan de calificación, el cronograma de la calificación y los documentos de seguimiento de ítems y registros asociados a los ensayos.

3. Desarrollo de la documentación.

De acuerdo con lo visto en la sección anterior, es requisito elaborar documentación respaldatoria de cada paso, etapa o sub-etapa en cuestión.

3.1 Situación del proyecto Calificación del cable de la válvula FIAT.

La especificación de calificación de los cables de la válvula FIAT, DC-EQ.CNAI.008-002 se encontraba redactada y en la revisión 0. Si bien existieron algunos cambios posteriores, se tomó como base la especificación aprobada para comenzar a hacer la calificación.

Primeramente, hubo que redactar y revisar el plan de calificación, de acuerdo con lo requerido por el área de calidad. Además, conjuntamente hubo que redactar un plan de calificación.

Se describirán en las próximas secciones las principales categorías del plan de calificación, así como una justificación técnica de las decisiones tomadas, dado que el documento es de carácter interno y no puede ser anexado al presente trabajo.

3.2 Descripción técnica del cable.

Tipo de equipo/componente: Cable de potencia tipo CEAT FG 4T 20 G9/3 7x20

Cable de I&C tipo CEAT FG 4T 20 G9/2 8x1

Fabricante: CEAT (Cavi Elettrici e Affini Torino). No disponible en el mercado

Modelo: Desconocido

Parámetro de trabajo: T de trabajo 180°C (temperatura de la aislación); 0.6/1kV

Descripción: CEAT FG 4T 20 G9/3 7x20 se trata de cables que suministran potencia a las válvulas FIAT (QM01S002-007 y QM02S002-007) de CNAI.

Los cables consisten en 7 conductores de cobre flexible, aislación de goma siliconada (SiR) recubierta por un mallado de fibra de vidrio individual para cada conductor. El conjunto de 7 conductores se encuentra recubierto por dos envolturas internas de SiR y esta a su vez por una envoltura externa de PVC.

En cuanto al CEAT FG 4T 20 G9/2 8x1 es un cable de características análogas al anterior, pero de menor sección. A través del informe DC-EQ.CNAI.008-004, Se verificó que los materiales de aislación utilizados en ambos cables son análogos siendo los resultados de la calificación compatible entre sí.

Material:

- Aislación de SiR de espesor: 1 mm
- Conductor de cobre electrolítico
- Envoltura PVC
- Refuerzo de fibra de vidrio

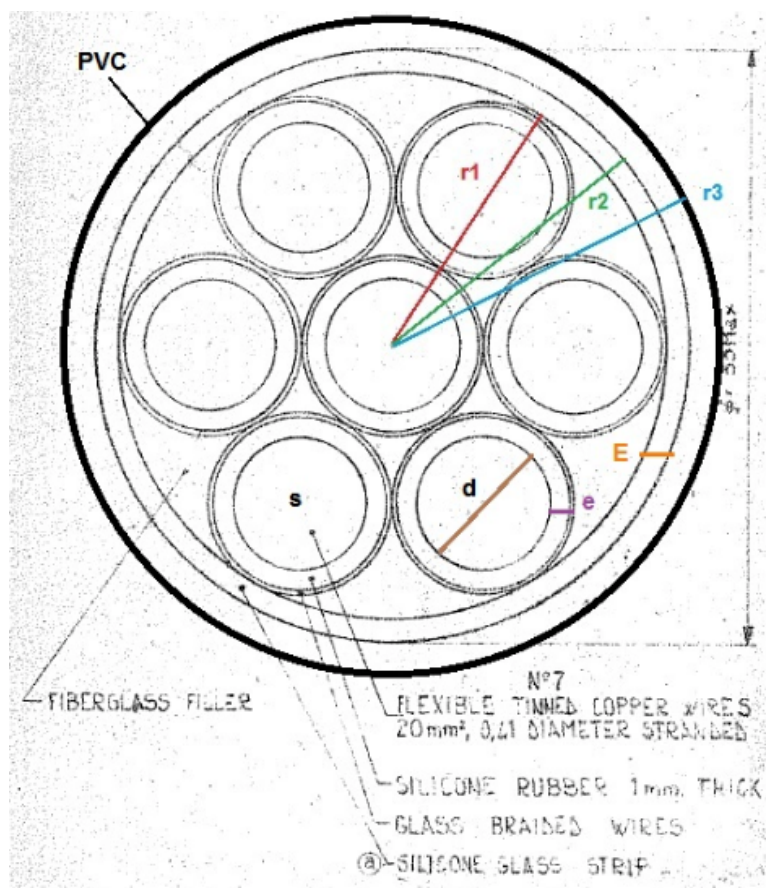


Figura 20. Plano de sección transversal del cable de la válvula FIAT de CNAI, con la descripción de los materiales constitutivos y algunas medidas.

Se destaca el uso de la goma siliconada principalmente debido a su buena resistencia a la radiación. Teniendo en cuenta la poca dureza y resistencia a la rotura de la goma siliconada estos cables presentan una envoltura de PVC. La función de esta última es fundamentalmente la de protección mecánica sumamente útil para el momento del montaje de los cables. Por otra parte, sabiendo que la goma siliconada envejecida y expuesta a humedad por largos periodos de tiempo tiende a absorber agua y en consecuencia bajar su resistencia de aislación, la envoltura de PVC también protege a las aislaciones y aumenta su performance en caso de accidente.

Cabe destacar que el uso de materiales tan disímiles en cuanto a la resistencia térmica como el PVC y la goma siliconada trae como consecuencia que exista una temperatura máxima de servicio de 70°C debido a la limitación de la envoltura externa, ya que para las aislaciones de goma siliconada la temperatura de trabajo puede ser mucho mayor (por ejemplo 180°C). Siendo la aislación eléctrica de goma siliconada el único componente que cumple una función de seguridad, esta especificación técnica está enfocada en dicho componente. Sin embargo, en DC-EQ.CNAI.001-003 [15] se observó una interacción indeseable entre el PVC y SiR al envejecerse a altas temperaturas por lo cual se tendrá en cuenta la integridad de la envoltura externa.

- a) **Materiales:** Envoltura externa de PVC; envolturas internas de SiR; recubrimiento de fibra de vidrio; aislación de SiR, según informe DC-EQ.CNAI.008-001 [16].

b) **Especificación técnica:** desconocida

c) **Planos:**

M24-207 y M24-0210.1: planos generales de la válvula FIAT

M24-0208: caja de conexión del cable a la válvula.

M24-0210 corte transversal de cable de alimentación.

d) **Límites físicos:** se considera como límite de la presente calificación de cables hasta la acometida del cable a una prensa cable, pasamuro, etc.

Queda excluido de este trabajo el estudio de fichas de conexión, borneras, cajas de conexión, estructuras de soportería, terminales conectados en la punta de los cables y soldaduras de cualquier tipo (estaño, plata, etc.). Se excluyen también, cables curvados más allá del radio de curvatura permitido, en caso de que los hubiera.

e) **Configuración de montaje:** este cable se encuentra montado sobre bandejas de cable. Con orientación vertical, horizontal e incluso mixta. El cable se encuentra sujeto mediante precintos y abrazaderas. Presenta tramos rectos y curvos.

Debido a que no se dispone de un catálogo original se asume basado en cables de construcción similar.

Para cables de envoltura de PVC:

-en instalación fija un radio de curvatura mínimo de 4 veces el diámetro del cable

-en tendido libre un radio de curvatura mínimo de 8 veces el diámetro del cable

Interfaces de soporte: Perfiles de acero galvanizado tipo bandeja de cable.

3.3 Energía de activación en los materiales del cable.

3.3.1 Goma siliconada

La determinación de la energía de activación de la aislación de SiR, está documentada en el informe IN-EQ-059-008 [17]. Para esto se realizó un envejecimiento térmico acelerado a 150, 165, 190 y 200°C de un grupo de muestras de la aislación del cable de la válvula FIAT. Se tomaron luego grupos de a 10 probetas a distintos tiempos de envejecimiento y se realizó un ensayo de tracción. Para determinar la elongación a la rotura (EAB) se realizó un promedio de las EAB de cada una de las muestras para cada tiempo. Se hizo una curva de *fitteo* y se calculó así, el tiempo necesario para llegar al 50% de elongación. Esto se hizo para cada una de las temperaturas. Con eso se completó la Tabla 2, que se utilizó para graficar el logaritmo del tiempo en función de $1/T$ (absoluta) como puede verse en la Figura 21. De este grafico, la pendiente es la energía de activación para el envejecimiento térmico dividida la constante de los gases.

Color material:	GRIS			
T [°C]	T [°K]	1/ T [°K]	tiempo [días]	Ln tiempo
150	423	0,00236406	146,59	4,9876
165	438	0,00228310	118,94	4,7786
190	463	0,00215983	50,67	3,9253
200	473	0,00211416	30,32	3,4119

Tabla 2. Tiempo en días para el cual los valores de EAB caen al 50% para cada temperatura.

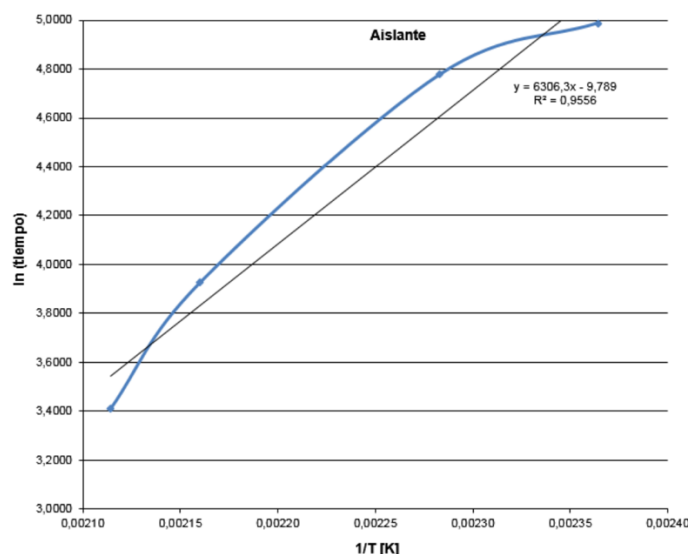


Figura 21. Gráfico de logaritmo del tiempo vs 1/T con datos de la Tabla 2.

El valor de E_a obtenido para la aislación de SiR fue de 0,5427 eV.

3.3.2 PVC

Se realizó una búsqueda de estos datos en documentación del grupo EQ, y se encontró que en el informe técnico IN-CPCN/GE-76 [18], se determina la energía de activación de la aislación de los cables SIEMENS de la central nuclear Atucha II. Para asegurar que los materiales eran equivalentes se utilizó un informe [19] en el cual por medio de espectroscopia FTIR se analizan muestras de cables Siemens de Atucha I y Atucha II y se realiza una comparación de los espectros. Encontrándose evidencia suficiente como para indicar el material es el mismo.

De acuerdo con este informe, para obtener la energía de activación, se colocaron muestras del cable a temperaturas de 80, 90 y 95 °C. Se fueron sacando muestras cada cierta cantidad de días, se sacó una EAB promedio, y se obtuvo el gráfico presente en la Figura 22.

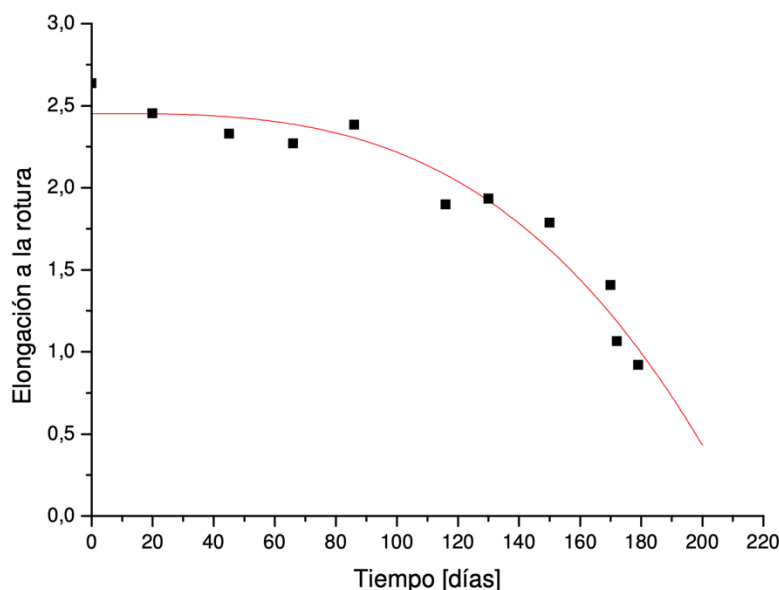


Figura 22. EAB vs tiempo de envejecimiento en días obtenido de [18].

Se realizó un ajuste mediante una ecuación representada por la línea roja, y de ahí se sacó el tiempo necesario para llegar a un valor de EAB del 50% respecto del material sin envejecer. Estos datos se graficaron, se realizó una regresión lineal como se ve en la figura 16d, cuya pendiente es E_a/R , siendo R , la constante de los gases. Con lo que se puede despejar fácilmente la energía de activación.

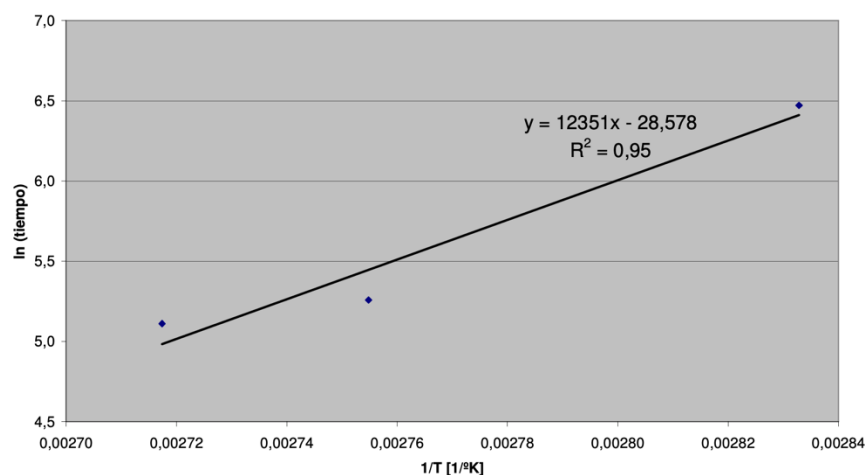


Figura 23 $\ln(t)$ necesario para llegar al 50% de EAB vs inversa de la temperatura absoluta obtenido de [18].

El valor de E_a obtenido es de 1,0629eV.

3.4 Condiciones de operación.

3.4.1 Condiciones de operación normales.

En condiciones normales, el cable debe suministrar una tensión de 520Vcc a en condiciones ambientales de servicio. La corriente que circula por los conductores al suministrar tensión a las bobinas es de entre 103,5 a 130A, estos valores fueron medidos en campo y están presentes en la sección 13.2 de la especificación de calificación, DC-EQ.CNAI.008-002. [20]

Las condiciones ambientales normales a las que está expuesto el cable son entre 20 y 60 °C (siendo esta ultima asumida a modo conservativo, ya que, si bien la temperatura mas alta registrada en planta fue de 54 °C, se vio en secciones anteriores una tendencia al aumento), en un ambiente de humedad al 100%. Aunque la temperatura en el cuerpo de la válvula es de 95 °C el tendido de cables se encuentra a cierta distancia. Si bien por lo general la humedad ambiente no llega al 100% se suele inyectar vapor saturado en el marco de las paradas programadas para disminuir la concentración de tritio. El tipo de radiación es gamma, con una tasa de dosis de 0,074 Gy/h, y en la vida calificada debe poder resistir una dosis total de 22 KGy (calculada como 15 años a la tasa de dosis establecida anteriormente mas un margen del 10%)

3.4.2 Condiciones de operación durante DBA.

El accidente de base de diseño considerado será un Loss of Coolant Accident, LOCA. En este caso, la temperatura responderá al perfil T-t correspondiente, la tasa de dosis será de 1kGy/h, dando una dosis total del 268 Gy durante el mission time, que se definirá en la sección 2.6, ya que el cable pasa por varios recintos, se toma el valor mas alto de dosis y se le aplica nuevamente un margen del 30%.

En la imagen 16b, puede verse el resultado de simulaciones realizadas por NASA, en donde se ve el perfil T-t durante los primeros 4000 s y durante 24 Hs durante este tipo de DBA. En ambas imágenes, las líneas rojas corresponden a márgenes agregados por CNEA a la simulación realizada por NASA de acuerdo con normativa IEC IEEE 60780-323.

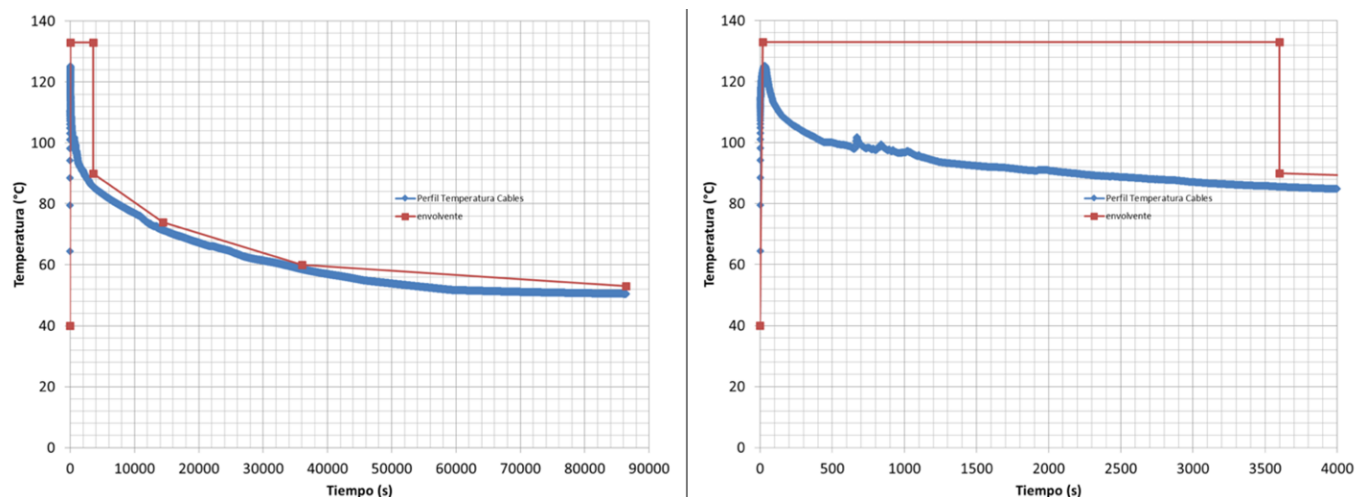


Figura 24. Perfil T-t durante un DBA, simulacion de NA-SA obtenida del informe [8] para las primeras 24 Hs (izquierda) y para 4000 s (derecha).

3.5 Función de seguridad y requerimientos de desempeño.

Función de seguridad: La función de seguridad del cable corresponde a la función de las válvulas asociadas.

Expectativa de desempeño: Continuidad eléctrica del conductor y aislación eléctrica entre conductores

Expectativa de duración: 30 años.

3.6 Mission Time.

Es el tiempo que debe mantenerse operativo tras el DBA. Si bien en la EQML [21] se estipula un mission time de 2Hs, se asumen 24Hs de forma conservativa.

3.7 Secuencia de calificación.

De acuerdo con el plan de calificación redactado [25], la secuencia de etapas propuesta y aprobada contiene a las siguientes instancias:

1. Preparación de muestras
2. Inspección visual y ensayos eléctricos de base

3. Envejecimiento por radiación equivalente a 15 años
4. Inspección post envejecimiento
5. Envejecimiento térmico equivalente a 15/10 años.
6. Inspección post envejecimiento.
7. Ensayos mecánicos
8. Envejecimiento por radiación equivalente a 15 años a fin de acumular 30 años de operación.
9. Inspección post envejecimiento.
10. Envejecimiento térmico equivalente a 15 años a fin de acumular 30 años de operación.
11. Ensayo mecánico.
12. Ensayo de desenrollado enrollado y tensión resistida/rigidez dieléctrica
13. Simulación de DBA
14. Ensayo mecánico
15. Ensayo de tensión resistida/rigidez dieléctrica

En las siguientes secciones se desarrollará cada una de ellas además de los procesos de apoyo correspondientes.

3.7.1 Recepción del Ítem de ensayo

La inspección de recepción de los cables entregados por NASA fue realizada por personal de radiología del CAC y detallada en el reporte de inspección visual y medidas de contaminación en muestras de cable CNAI [22]. Se encontraron algunas marcas de maltrato posiblemente ocasionadas durante la instalación del cable o durante su manipulación para la extracción. Además se notaron algunos niveles de contaminación todavía presentes por lo que se estableció y verificó un procedimiento para la descontaminación de las muestras.

Se verificó que luego de la ejecución del procedimiento de descontaminación todavía existían rastros de esta en la envoltura de uno de los cables. Esto se tuvo en cuenta para la preparación de los ítems de ensayo por lo que para la preparación de la muestra IE-EQ.CNAI.002-001 se retiró la envoltura de PVC y se cortaron algunos centímetros de ambos extremos.



Figura 25. Foto de muestra de cable completo IE-EQ.CNAI.002-001.

3.7.2 Preparación de las muestras

Se prepararán 5 muestras de cable para los ensayos eléctricos. De acuerdo con la sección 6.5.2 de la norma [7], las muestras deben tener una longitud mayor a 3,05 metros, por lo que en todos los casos se tomará, de manera conservativa, una longitud mayor a 4,00 metros para introducir dentro de la cámara de ensayos, enrollados en un mandril, +2,00 metros de cada extremo para sacar el cable fuera de la cámara, teniendo en cuenta un número entero de vueltas en el mandril. Las muestras a preparar, de acuerdo a la especificación de calificación, son:

Código Ítem de ensayo	Descripción
IE-EQ.CNAI.002-001/1 (ex CAB-058)	Muestras de conductores con fibra de vidrio (8 m) Envejecimiento: 15 años
IE-EQ.CNAI.002-001/2 (ex CAB-058)	Muestras de conductores sin fibra de vidrio (8 m) Envejecimiento: 15 años
IE-EQ.CNAI.002-001/3 (ex CAB-058)	Muestras de conductores con fibra de vidrio (8 m) Envejecimiento: 30 años
IE-EQ.CNAI.002-001/4 (ex CAB-058)	Muestras de conductores sin fibra de vidrio (8 m) Envejecimiento: 30 años

IE-EQ.CNAI.002-003/1 (ex CAB-065)	Para probetas EAB SiR 15 años
IE-EQ.CNAI.002-003/2 (ex CAB-065)	Para probetas EAB PVC 10 años
IE-EQ.CNAI.002-003/3 (ex CAB-065)	Para probetas EAB SiR 30 años
IE-EQ.CNAI.002-004 (ex CAB-066)	Muestra cable entero (8 m) Envejecimiento.: 10 años

Tabla 3. Descripción de ítems de ensayo.

Para la muestra de cable entero se utilizara el ítem que no presentaba signos de contaminación. Para el resto de las muestras se utilizara el cable desprovisto del recubrimiento de PVC, el cual contiene 7 conductores de los cuales 2 fueron desprovistos de la cubierta de fibra de vidrio que serán utilizados para envejecer a 15 y 30 años.

De acuerdo a la sección 6.5.3 de la norma [7], se deberían preparar al menos dos muestras de cable para los ensayos, una de las cuales no debe ser envejecida. Sin embargo, dado que los cables ya presentan envejecimiento por haber estado en servicio, no se requiere ensayar una muestra no envejecida ya que no sería representativa del estado real de los cables.

Se fabricaran también 3 sets de probetas para ensayos mecánicos según norma IEC/IEEE 62582-3 [10] teniendo en cuenta el diámetro del conductor. Cada set constará de 5 probetas tipo halterio de la aislación, y 5 probetas tipo halterio de la envoltura externa.

3.7.3 Ensayo funcional

Se medirá la IR según recomendaciones de IEC/IEEE 62582-6 **Error! Reference source not found.**] y registro de los valores obtenidos en formulario asociado CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-004 Medición de resistencia de la aislación (Rev 0)".

Para cada medición se utilizará 500Vcc como tensión de prueba y se registrará el valor al minuto de polarización para cada conductor según el instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-006 Medición de resistencia de la aislación con Megóhmetro Digital MD-5075x". Deberá registrarse la temperatura de manera aproximada al momento de la medición.

Medición de continuidad eléctrica con multímetro digital.

Criterios de aceptación

De acuerdo con la sección 6 de la norma [7], un valor de 100 MΩm es aceptable para la mayoría de las aplicaciones, por lo que este será el valor aceptación.

3.7.4 Envejecimiento

3.7.4.1 Envejecimiento por irradiación

Tipo de radiación

Se irradiará a las muestras con radiación gamma.

Dosis, tasa de dosis y uniformidad de la exposición

- Tasa de dosis: Dado que el material que ejerce la función de protección es el SiR, se determinó la tasa de dosis de acuerdo a él y no a la envoltura externa de PVC. Utilizando la norma [5] sección 6.2.2, se determinó un valor conservativo máximo para la aislación de SiR de 8.7 kGy/h.
- Dosis total: Esta dosis corresponde a una tasa de dosis de 0,074 Gy/h durante 30 años mas un margen del 10%, dando como resultado 22kGy (en 2 etapas, simulando cada etapa 15 años de operación).

Dado que la dosis de accidente es unas 100 veces menor a la dosis de servicio (268 Gy) la misma estará contemplada en la dispersión asociada a las etapas de irradiación de servicio.

Tipo de fuente a utilizar

Fuente de Co^{60}

Se utiliza Co^{60} debido a que es una fuente de radiación gamma de alta energía de 1.25 MeV muy penetrante, siendo además una referencia para el envejecimiento por radiación según el documento IAEA TECDOC-1188.

Ensayos funcionales

No son necesarios ensayos funcionales durante la irradiación. Se realizara medición de IR, antes y después de la irradiación, según recomendaciones de IEC/IEEE 62582-6 [11] y registro de los valores obtenidos.

Para cada medición se utilizará 500Vdc como tensión de prueba y 1 minuto de polarización a cada conductor contra el resto de los conductores. Deberá registrarse la temperatura de manera aproximada al momento de la medición.

Se realizara también una medición de continuidad antes y después del ensayo, con multímetro digital.

Montaje y la orientación de la muestra durante la exposición

Se montarán las muestras enrolladas sobre estructuras o soportes que den un radio de curvatura no mayor a 20 veces el valor del diámetro del cable según sección 6.5.2 de la norma [7].

La orientación de las muestras durante la exposición a la fuente radiactiva será llevada a cabo por personal de la PISI. Se le solicitará a dicho personal la rotación de las muestras al momento de irradiar.

Fotografías

- Antes de iniciado los envejecimientos de simulación de vida útil y accidente
- Post envejecimientos de simulación de vida útil y accidente
- Conexionado para medición de IR

Registros asociados

Se completará el formulario asociado CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-003 Envejecimiento acelerado por irradiación de ítems o muestras (Rev 0)"

La medición de IR se llevará a cabo según el instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-006 Medición de resistencia de la aislación con Megóhmetro Digital MD-5075x".

Se completará el formulario asociado CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-004 Medición de resistencia de la aislación (Rev 0)".

3.7.4.2 Envejecimiento térmico

Se utilizará el modelo de envejecimiento térmico de Arrhenius de acuerdo con la sección 6.4 de la norma [7] y descripto en la sección 2.3.4 de este trabajo.

A continuación, en la Tabla 4, se muestran los cálculos del tiempo de acuerdo con la energía de activación obtenida de acuerdo con lo descripto en la secciones 3.3.1 y 3.3.2 de este trabajo.

Código de Ítem de ensayo (cod.)	Temperatura de servicio (°C)	Tiempo acumulado en servicio (años)	Temperatura de envejecimiento (°C)	Tiempo de envejecimiento (días)
IE-EQ.CNAI.002-004 (Cable Entero)	60	10	85	271
IE-EQ.CNAI.002-003/2 (Probetas EAB PVC)				

IE-EQ.CNAI.002-001/1-2 (Conductores con y sin FV a 15 años) IE-EQ.CNAI.002-001/3-4 (Conductores con y sin FV a 30 años) IE-EQ.CNAI.002-003/1-3 (Probetas EAB SiR 15 y 30 años) IE-EQ.CNAI.002-003/3 (Probetas EAB SiR 30 años)	60	15	190	26,6
IE-EQ.CNAI.002-001/3-4 (Conductores con y sin FV a 30 años) IE-EQ.CNAI.002-003/3 (Probetas EAB SiR 30 años)	60	30	190	53,2

Tabla 4. tiempos de envejecimiento en función de la temperatura.

Determinación de energía de activación y cálculo del tiempo y temperatura de envejecimiento: de acuerdo con recomendaciones de la TSM [23], se harán dos envejecimientos térmicos por separado. Uno teniendo en cuenta las propiedades térmicas de la envoltura de PVC, para el cual se utilizará la energía de activación reportada para los cables Siemens de CNAI y CNAII y el segundo, teniendo en cuenta las propiedades térmicas del SiR, cuya energía de activación ha sido determinado y reportado en el documento IN-EQ-059-008.

De acuerdo al cronograma de calificación [24], la secuencia de envejecimiento será, primero un envejecimiento por radiación, luego envejecimiento térmico, seguido de otro envejecimiento por radiación y finalmente un último envejecimiento térmico, para llegar a la cantidad de días detallada en la Tabla 4 para cada ítem.

3.7.5 Montaje y la orientación de la muestra durante el envejecimiento

El envejecimiento térmico de las muestras se llevara a cabo enrollando el cable en un mandril cuyo diámetro no será mayor a 20 veces el diámetro del cable, de acuerdo con la sección 6.5.2, d, de la norma [7]. El cable estará fijado al mandril utilizando alambres y se procurara no dañar la envoltura ajustando excesivamente los mismos.

3.7.6 Ensayo funcional

Medición de IR, antes y después de los envejecimientos, según recomendaciones de IEC/IEEE 62582-6 y registro de los valores obtenidos.

Para cada medición se utilizará 500Vcc como tensión de prueba y 1 minuto de polarización a cada conductor contra el resto de los conductores. Deberá registrarse la temperatura de manera aproximada al momento de la medición.

Medición de continuidad con multímetro digital.

3.7.7 Fotografías

- Antes de iniciado los envejecimientos de simulación de vida útil
- Montaje dentro de la estufa
- Post envejecimientos de simulación de vida útil
- Conexionado para medición de IR

3.7.8 Registros asociados

El envejecimiento térmico se realizará según el instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-003 Realización de envejecimientos térmicos acelerados".

Se completará el formulario asociado CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-002 Envejecimiento térmico acelerado de ítems o muestras (Rev 0)".

La medición de IR se llevará a cabo según el instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-006 Medición de resistencia de la aislación con Megóhmetro Digital MD-5075x".

Se completará el formulario asociado CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-004 Medición de resistencia de la aislación (Rev 0)".

3.8 Envejecimiento por ciclado

No se requiere envejecimiento por ciclado según norma [7].

3.9 Otros envejecimientos (Humedad, tensión eléctrica, vibración, etc)

No se requieren otros envejecimientos según norma [7].

3.10 Ensayos

3.10.1 Ensayo de desenrollado y enrollado

Se llevará a cabo según la sección 6.5.2 de la norma[7], previo a los ensayos de rigidez dieléctrica. Las muestras deben ser desenrolladas y enrolladas en un mandril de diámetro hasta 20 veces el diámetro externo total del cable para las etapas post envejecimientos por radiación y térmico (etapas 70 y 90 del cronograma de calificación [24]).

Para la etapa posterior a la simulación de accidente (etapa 132 del documento [24]), las muestras pueden ser desenrolladas y enrolladas en un mandril de diámetro igual o menor a 40 veces el diámetro externo total del cable según la sección 6.5.4.2 de la norma [7].

El objetivo de dicho ensayo es demostrar la ausencia de fragilidad y una adecuada flexibilidad en las muestras de cable luego de los envejecimientos.

Inspección de las muestras

Se llevarán a cabo inspecciones visuales para identificar posibles daños en las muestras debido a dicho ensayo.

3.10.2 Ensayos funcionales

Medición de IR, antes y después del ensayo, según recomendaciones de IEC/IEEE 62582-6 y registro de los valores obtenidos.

Para cada medición se utilizara 500Vdc como tensión de prueba y 1 minuto de polarización a cada conductor contra el resto de los conductores. Deberá registrarse la temperatura de manera aproximada al momento de la medición.

Medición de continuidad con multímetro digital.

Criterios de aceptación

Debe pasar un ensayo de rigidez eléctrica y un ensayo de resistencia a la aislación.

Fotografías y videos

- Antes del desenrollado
- Post desenrollado
- Post enrollado

Registros asociados

Se realizará una inspección visual de los ítems una vez finalizado el desenrollado y enrollado según instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-005 Ensayos visuales de muestras de cables"

Se completará el formulario CNEA, "FO-CPCN_AEDT-043 Inspección de ítems o muestras (Rev 0)"

La medición de IR se llevará a cabo según el instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-006 Medición de resistencia de la aislación con Megóhmetro Digital MD-5075x".

Se completará el formulario asociado CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-004 Medición de resistencia de la aislación (Rev 0)".

3.10.3 Ensayo de rigidez dieléctrica o tensión resistida.

Parámetros del ensayo y condiciones según sección 6.5.2 de la norma [7]

- Las muestras requieren primeramente inmersión en agua durante 1 hora como mínimo
- Tensión a aplicar: 1,26 kVA. Dicho valor se obtiene de considerar el espesor de las muestras.
- Tiempo de ensayo: 5 minutos

Montaje de las muestras durante el ensayo

Para el ensayo de rigidez dieléctrica las muestras se enrollarán en el mismo mandril utilizado durante el ensayo descrito en la sección 3.10.1 del presente documento. Se tendrá especial cuidado al fijar las muestras al mandril procurando no dañar la envoltura con un excesivo apriete.

Ensayos funcionales

Medición de IR, antes y después del ensayo, según recomendaciones de IEC/IEEE 62582-6 y registro de los valores obtenidos.

Para cada medición se utilizará 500Vdc como tensión de prueba y 1 minuto de polarización a cada conductor contra el resto de los conductores. Deberá registrarse la temperatura de manera aproximada al momento de la medición.

Medición de continuidad con multímetro digital.

Criterios de aceptación

Deberá pasar el ensayo de rigidez dieléctrica descrito en esta sección.

Fotografías y video

- Antes de iniciado el ensayo
- Montaje de las muestras sumergidas
- Conexión eléctrico

- Falla y/o daño ocasionado por el ensayo
- Post ensayo

Registros asociados

Se completará el formulario asociado CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-005 Ensayo de tensión resistida (Rev 0)".

La medición de IR se llevará a cabo según el instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-006 Medición de resistencia de la aislación con Megóhmetro Digital MD-5075x".

Se completará el formulario asociado CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-004 Medición de resistencia de la aislación (Rev 0)".

3.10.4 Ensayo LOCA (HELB).

Configuración/orientación del montaje

Se montarán las muestras en forma de rollo sobre mandriles metálicos que den un radio de curvatura de 20 veces el diámetro del cable. Estas estructuras irán montadas en un pie diseñado para que la parte inferior del cable no soporte el peso de la estructura.

Requisitos de sellado

Con el objetivo de sacar los extremos de las muestras de cables desde el interior hacia el exterior de la cámara de ensayos para permitir su energización y medición de parámetros, se utilizarán como penetraciones una brida adaptada para tal fin con salida lateral a la cámara. Dicha brida soldados a la misma y, para evitar la fuga de vapor hacia el exterior de la cámara de ensayos, se colocará en el extremo de cada tubo un tapón de silicona resistente a la temperatura con un orificio en el medio de cada tapón para el pasaje de los cables.

3.10.5 Ensayos funcionales y/o requisitos operativos

Las muestras de cables permanecerán energizadas durante todo el ensayo de simulación con una tensión de 380 Vac.

En cuanto al efecto de la corriente en el autocalentamiento del cable, en 13.1 puede observarse que en condiciones de trabajo (donde el tiempo de energización del cable es breve) el mismo es despreciable. En consecuencia será posible a fin de simplificar el ensayo utilizar una corriente menor a la nominal siempre del orden de las decenas de amperes a fin de asegurar que se suministre la energía suficiente para generar un corto entre conductores en caso de falla del cable.

Para analizar el efecto en el stress eléctrico generado en el cable por parte de la corriente alterna y la continua se puede tomar como referencia el ensayo de tensión resistida/rigidez dieléctrica de la norma IEEE 383-2015 cuyos valores de tensión asociados son:

- 3,15 kVac por mm de espesor de aislación a frecuencia nominal de 50 o 60Hz
- 9,45 kVdc por mm de espesor de aislación

Es decir que para una tensión continua de 520 Vdc serian equivalentes a 174 Vac. Cabe destacar que la corriente continua puede presentar eventualmente el efecto de migración de portadores de carga en materiales aislantes lo cual en general se alcanza mayoritariamente al minuto de polarización. Sin embargo dicho efecto puede despreciarse dados los tiempos de polarización acotados del cable en esta aplicación (10 segundos máximos).

Puede concluirse entonces que la aplicación de 380Vac será más conservativo desde el punto de vista del stress eléctrico que la aplicación de 520Vdc.

Durante la medición de IR, según recomendaciones de IEC/IEEE 62582-6 [11], se procederá a la desconexión, y desenergización, del cable sujeto a medición sin la interrupción de corriente para el resto de los cables ensayados. Durante la primera hora de ensayo se medirá IR con una frecuencia de 15 minutos por conductor. Para el resto del ensayo, la medición se realizará cada 1 hora.

Para cada medición de IR se utilizará 500Vdc como tensión de prueba y 1 minuto de polarización a cada conductor contra el resto de los conductores. Deberá registrarse la temperatura de manera aproximada al momento de la medición y los valores obtenidos de resistencia de aislación en el formulario asociado.

La medición de corriente se realizará cada 15 minutos durante la primera hora de ensayo y cada 1 hora el resto del ensayo hasta completar las 24hs.

Se medirá continuidad eléctrica con multímetro digital.

Perfil de temperatura

El perfil de temperatura se muestra en la Figura 26.

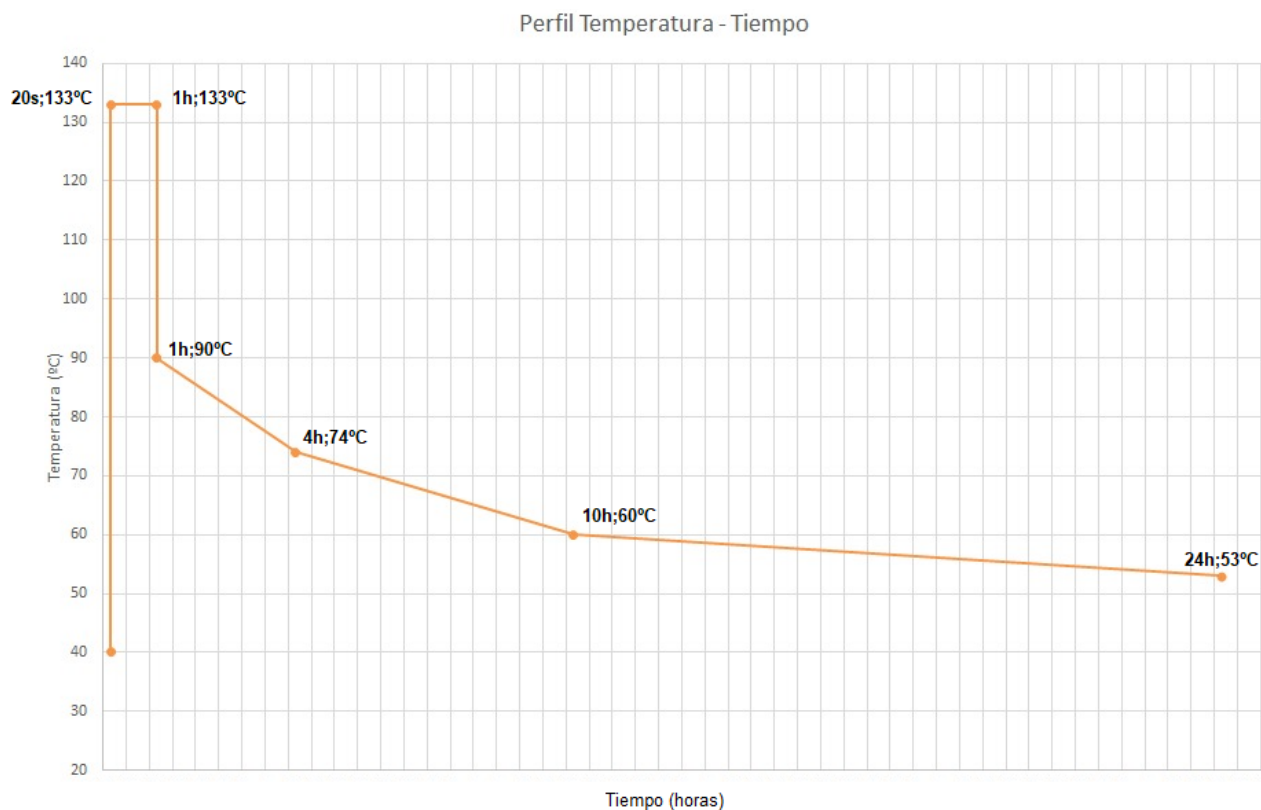


Figura 26. perfil de temperatura en función del tiempo.

Perfil de presión

Se seguirá la presión de equilibrio liquido-vapor asegurando en todo momento un ambiente de humedad saturada.

Criterios de aceptación

El valor de resistencia de aislación mínimo durante el ensayo LOCA será de 100MΩm según sección 6 de la norma IEC/IEEE 62582-6.

Fotografías y videos

- Montaje final dentro de la cámara antes de iniciado el ensayo
- Conexiones auxiliares (borneras, banco de resistencias, instrumentos de medición, penetraciones, etc)
- Anomalías y/o daños que puedan surgir durante el ensayo
- Se registrará la sala de operaciones mediante video durante el proceso de montaje y ensayo
- Estado de los ítems ensayados post ensayo

Registros asociados

La medición de IR se llevará a cabo según el instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-006 Medición de resistencia de la aislación con Megóhmetro Digital MD-5075x".

Se completarán los siguientes formularios asociados:

CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-004 Medición de resistencia de la aislación (Rev 0)"

CNEA, "FO-CPCN_AEDT_LC-018 Plan de ensayo LESAV (Rev 0)"

CNEA, "FO-CPCN_AEDT_LC-019 Bitácora de ensayo (Rev 1)"

CNEA, "FO-CPCN_AEDT_LC-018 Especificación técnica para prueba o ensayo LESAV (Rev 0a)"

Certificados de calibración de manómetros y termocuplas dispuestas en la cámara de ensayos trazable a patrones nacionales.

Certificados de calibración de sensores de presión, manómetro y válvulas de seguridad solidaria a la muestra de tramo de manguera sin cubierta exterior.

3.10.6 Ensayo de inundación

Se requiere ensayo de inundación según norma [7]. Aunque en este caso, el cable no trabajara en régimen de inundación por lo que no es un requerimiento de planta que deba ser sometido a ese ensayo.

3.11 Inspección post ensayo

Ensayos funcionales

Medición de IR durante la inspección post ensayo según recomendaciones de IEC/IEEE 62582-6 y registro de los valores obtenidos.

Para cada medición se utilizará 500Vdc como tensión de prueba y 1 minuto de polarización a cada conductor contra el resto de los conductores. Deberá registrarse la temperatura de manera aproximada al momento de la medición.

Medición de continuidad con multímetro digital.

Criterios de aceptación

El valor de resistencia de aislación mínimo durante el ensayo LOCA será de 100MΩm según sección 6 de la norma IEC/IEEE 62582-6. El valor de Elongación a la rotura mínimo será del 50%.

Fotografías

Registro fotográfico de la inspección visual de las muestras de cables.

Registros asociados

Se realizará una inspección visual de los ítems según instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-005 Ensayos visuales de muestras de cables"

Se completará el formulario CNEA, "FO-CPCN_AEDT-043 Inspección de ítems o muestras (Rev 0)"

La medición de IR se llevará a cabo según el instructivo CNEA, "IT-CPCN_AEDT_EQ-006 Medición de resistencia de la aislación con Megóhmetro Digital MD-5075x".

Se completará el formulario asociado CNEA, "FO-CPCN_AEDT_EQ-004 Medición de resistencia de la aislación (Rev 0)".

4. Ejecución de la calificación.

Antes de comenzar con la ejecución del plan de calificación tal y como fue aprobado, se propuso determinar si en los cables de la válvula FIAT se genera un exudado similar al encontrado en otras calificaciones realizadas anteriormente por el grupo EQ.

4.1 Caracterización del exudado.

4.1.1 Presentación del problema.

En la sección 2.7 de este trabajo se realizó una breve descripción de la experiencia previa en esta línea de trabajo. Se ha realizado con anterioridad una calificación de cables similares con envoltura de PVC y aislación de SiR. Se encontró entonces que el cable al ser sometido a un envejecimiento acelerado, exudaba una sustancia oleosa. Es importante conocer a que mecanismo de degradación responde, y caracterizarla para asegurar que, si se llegase a producir en servicio, esta sustancia no afectará de manera significativa a las funciones de seguridad que debe realizar el cable en el lapso de su mission time.

4.1.2 Procedimiento experimental de envejecimiento térmico acelerado y generación del producto de degradación.

No es requerido para este tipo de pruebas, un plan de calificación, aunque se elaboró un cronograma en donde figuran tiempos y temperaturas de ensayo. La temperatura elegida fue de 170 °C, tomada del informe de calificación de los cables anteriormente ensayados [8]. Y el tiempo elegido inicialmente fue de 1 mes de ensayo, con inspecciones visuales semanales.

Las muestras utilizadas fueron un trozo de cable de la válvula FIAT, y un trozo del mismo cable utilizado en la calificación previa.

En la primera inspección visual tras una semana a la temperatura del ensayo se observó que el PVC del cable de la válvula FIAT se cayó totalmente, debido fisuras provocadas por el calor, pero no se observó exudado alguno, esto se puede ver en la figura 20. El PVC de la muestra del cable de la calificación anterior se encontraba en mejores condiciones, aunque ya presentaba signos de severo deterioro. Se colocó además una bandeja de aluminio para ver se podía recoger alguna gota que cayera.



Figura 27. Muestras del cable válvula FIAT y cable de una calificación antigua una semana a 170 °C.

Se dejaron las muestras una semana mas en el horno y en la segunda inspección visual se observó que el PVC continuó deteriorándose, lo que se puede ver sobre todo en el cable FIAT, mostrado en la imagen 21. También se observó comenzaba a verse levemente un líquido oleoso sobre todo en el PVC del cable chico.

Se retiraron 10 cm de cable para dejar fuera del horno.



Figura 28. Muestras del cable válvula FIAT y cable de una calificación antigua dos semanas a 170 °C.

En la Figura 29 puede observarse como el liquido comienza a salir de un pedazo desprendido de PVC. Se tomaron nuevas muestras y se reanudo el ensayo a 170 °C.



Figura 29. Liquido oleoso en trozos de PVC desprendidos del cable de la calificación anterior.

Luego de una semana mas de ensayo, se pudo ver un mayor deterioro en la envoltura muy similar al ocurrido anteriormente. Se decidió terminar el envejecimiento térmico para analizar las muestras. Sin embargo, luego de haber estado una semana dentro del horno con el mismo apagado, pudo observarse un incremento sustancial en la cantidad de exudado presente, como

se observa en la Figura 30. Se observaron gotas en la parte superior del cable FIAT, presentes en la cinta que envuelve a los conductores, así como en el cable de la calificación anterior. Este efecto puede ser atribuido a algún tipo de hidratación que se vio favorecida a condiciones ambientales normales. Por lo que en primera instancia se decidió hacer un FTIR y RXF.



Figura 30. Muestras de cable luego de una semana con el horno apagado.

4.1.3 Caracterización de exudados.

Se estudió el líquido oleoso utilizando espectroscopía infrarroja por transformada de fourier (FTIR), y se obtuvo una correlación mayor al 90% del espectro obtenido con un tipo hidratado de CaCl_2 . Sin embargo se utilizó un método analítico para confirmar la presencia de especies iónicas de Cl, y Ca.

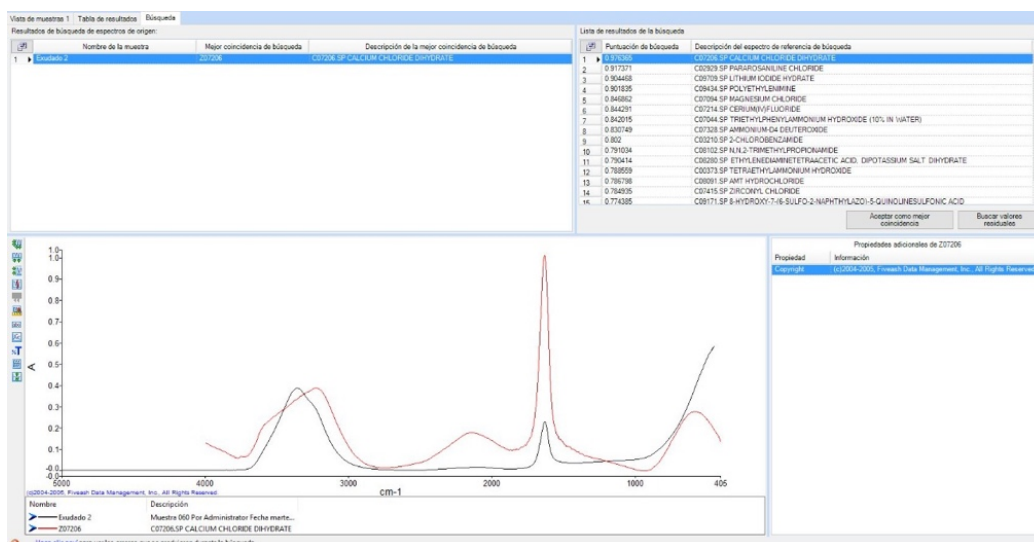
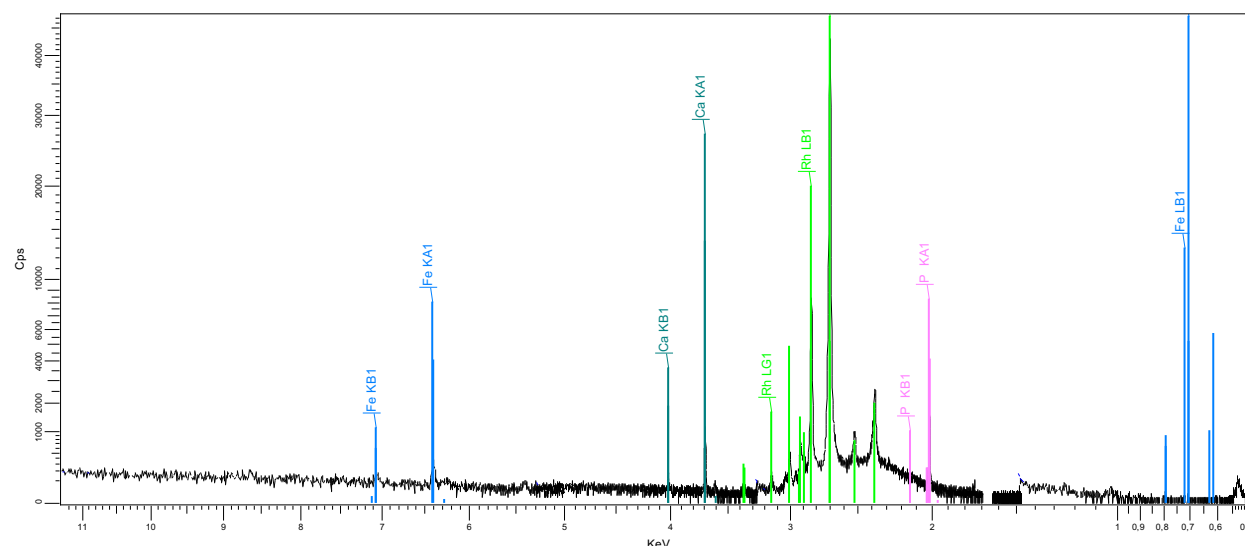


Figura 31. Espectro FTIR del exudado (negro) en comparación con el espectro del Cloruro de calcio.

Se realizó Fluorescencia de RX dispersiva en longitud de onda (FRX). Además se realizaron mediciones de pH. Para preparar muestras, se debían secar primero. Ahi se encontró la primera dificultad ya que al ponerlas a secar bajo luz infraroja no se obtuvieron resultados deseados. El liquido no se evaporaba. Es por esto que se decidió realizar el estudio en estado liquido utilizando el equipo es un S8 Tiger de Bruker.

Con el método empleado sólo es posible detectar los elementos con $Z > 11$. Además, las condiciones de medición no fueron las óptimas para un análisis cuantitativo. Por lo tanto, la conclusión es que de los elementos detectados, Cl y Ca son los mayoritarios (en el orden de %), mientras que hay otros elementos que se detectan en cantidades mucho menores (en el orden de ppm).



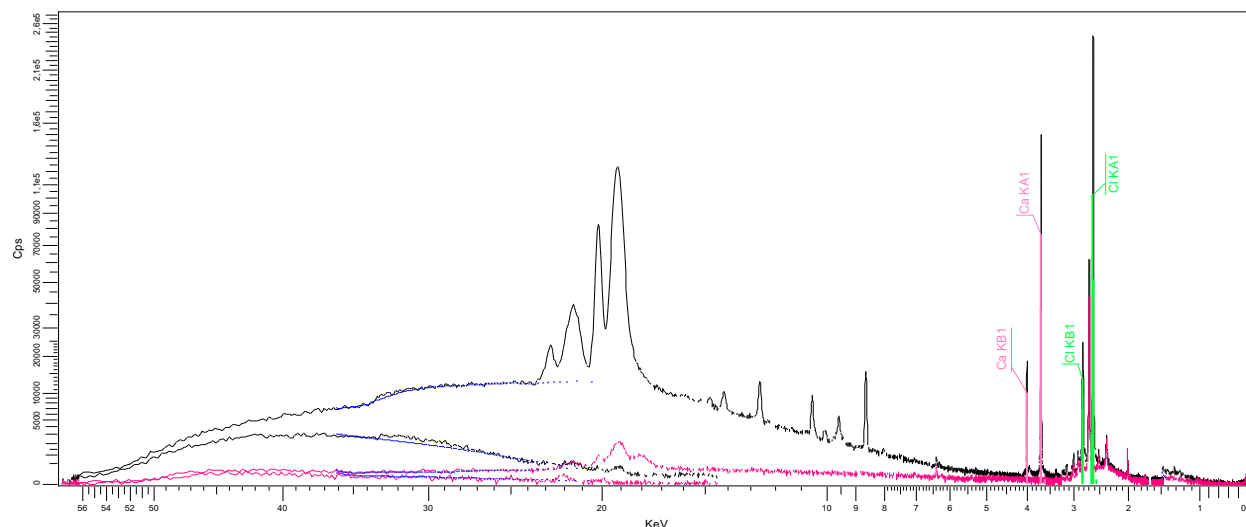


Figura 32. Espectro de FRX del blanco (arriba) y de la muestra (abajo), se identificaron los picos de la fuente, y en la muestra los picos del Cl y el Ca.

Se pudo confirmar entonces la presencia preponderante de Cl y Ca, y agua (detectada en FTIR) en el líquido oleoso, se sabe además que el CaCl_2 es una sustancia delicuescente, es decir que una vez hidratada, es difícil que pierda la hidratación. Se realizó un breve experimento en el laboratorio, dejando CaCl_2 en un vidrio de reloj, y luego de unos minutos comenzaron a formarse gotas sobre el . Se puso esta muestra a secar bajo lámpara infrarroja obteniéndose los mismos resultados que con el líquido oleoso. Por lo que se puede concluir que efectivamente se trata de CaCl_2 hidratado posiblemente formado debido a la hidrocloración del PVC y a la reacción del HCl con Carbonato de calcio sustancia que suele ser utilizada como carga mineral en formulaciones comerciales de distintos polímeros. Cabe destacar que el CaCl_2 presenta una descomposición térmica a temperatura, por ende habría que estudiar en mayor detalle el mecanismo de la reacción.

4.2 Ejecución del plan de calificación.

4.2.1 Preparativos previos

De acuerdo con la sección 6.5.2 de la norma [7] el cable debe estar enrollado en un mandril cuyo diámetro no debe ser mayor a 20 veces el radio del cable. Por lo que, teniendo en cuenta la descripción técnica del cable, se generaron los planos y las indicaciones para la construcción de los mandriles. Estos deben ser de chapa perforada de 2 mm de espesor de acero inoxidable, ya que, en los distintos ensayos, el metal estará expuesto tanto a calor como humedad, por lo que se podrían generar residuos que afecten negativamente a la calificación.

Al ser dos tipos distintos de nuestras, se construyeron dos mandriles. Uno para el cable entero, y otro para los distintos conductores con y sin fibra de vidrio. Las medidas resultantes de estos cálculos pueden verse en la Figura 34. Se debieron también verificar los hornos que serán utilizados para realizar los envejecimientos térmicos. Para esto se utilizaron 9 termocuplas, dispuestas de acuerdo con la Figura 33.



Figura 33. Termocuplas en el horno para la verificación.

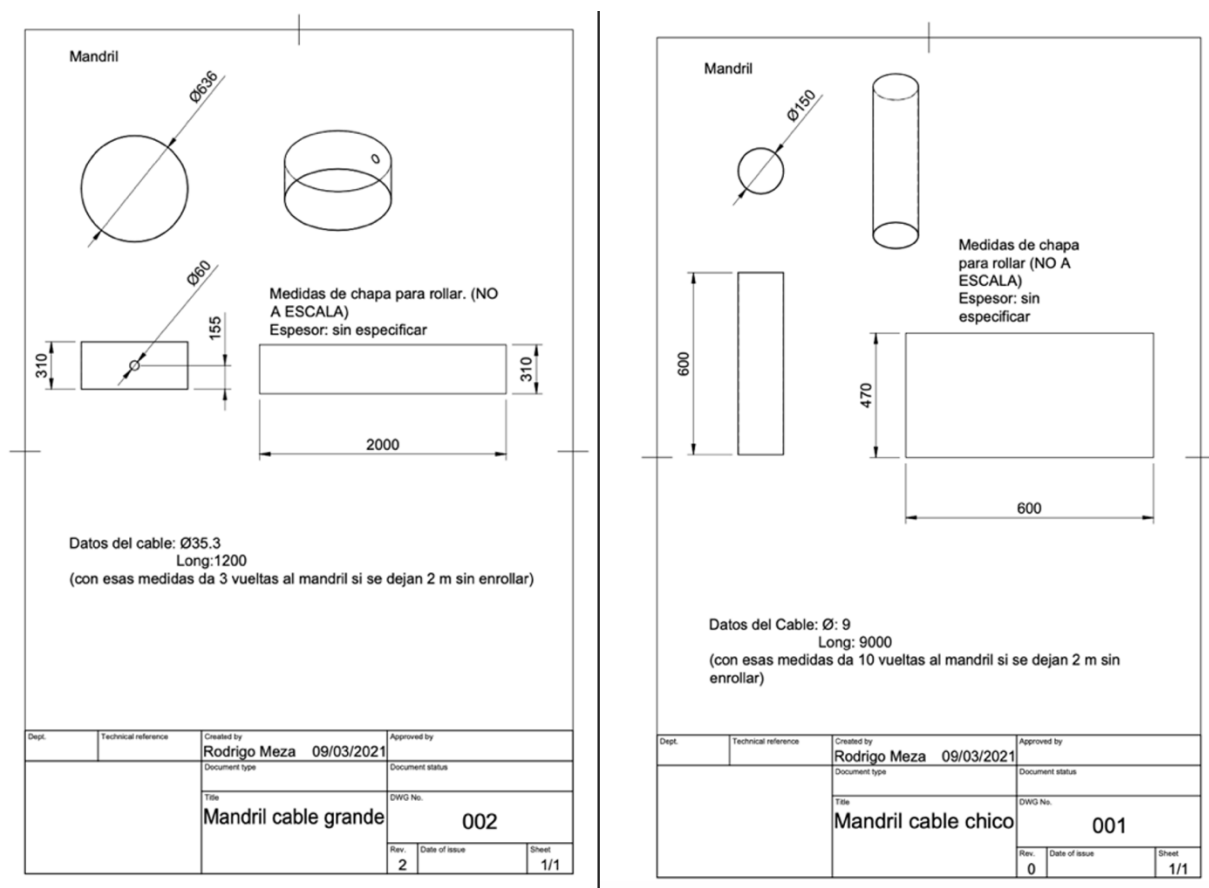


Figura 34. . Planos de los mandriles para el cable entero (izquierda) y para los conductores individuales (derecha).

4.2.2 Preparacion de muestras

Las muestras se prepararon de acuerdo con la Tabla 3 . Para la muestra de cable entero no fue necesario ningun preparativo ademas de los realizados durante la recepcion del item.

Se retiró la envoltura de PVC del cable entero que iba a ser destinado para la fabricacion de las muestras de conductores. Se seleccionaron 2 cables a ser ensayados como conductores aislados con fibra de vidrio y se pelaron 2 cables a ser ensayados como conductores aislados sin fibra de vidrio.

Se separó ademas, parte de la envoltura y la aislacion, y con una mordaza, se cortaron las probetas tipo halterio para los ensayos de elongacion a la rotura (EAB).

Se enrollaron las muestras en el mandril. Como se ve en la Figura 35 y mientras se enrollaba la ultima parte del cable entero en el pvc se propagó catastroficamente una fisura en un extremo del mismo. Se tomaron consideraciones al respecto que seran detalladas mas adelante.

4.2.3 Registros de inspección visual.

Se completaron los registros de inspección visual correspondientes.

4.2.4 Ensayos funcionales.

Se realizó la medición de IR de todas los ítems de ensayo de acuerdo con lo detallado en la sección 3.7.6, los valores fueron normales (del orden de Gohm) y se reportaron en el registro correspondiente de acuerdo con la normativa de calidad vigente en la GCPCN.

4.2.5 Envejecimiento por radiación.

Se llevaron las muestras a irradiar a la planta de irradiación semi-industrial (PISI) en el centro atómico Ezeiza (CAE). Con la dosis total y tasas calculadas en la sección 2.3.4.

Al ser una muestra tan grande, y ser una fuente plana, se solicitó al personal de la PISI que la muestra fuese rotada para asegurar una irradiación lo más uniforme posible. Sobre todo, en la muestra grande. Se utilizaron dosímetros de alanina calibrados para realizar la medición.

4.2.6 Envejecimiento térmico.

Una vez irradiadas las muestras se llevaron al horno. En donde deberán estar los días indicados en la tabla correspondiente de la sección correspondiente. Con el cable entero no hubo inconvenientes, pero cuando se colocaron las muestras de los conductores individuales comenzó a salir un humo acompañado de carbonilla. Por lo que hubo que detener la calificación.

5. Discusión y resultados.

5.1 Documentación de ingeniería.

Como resultado de la calificación se redactaron los siguientes documentos:

- Plan de calificación
- Cronograma de calificación
- Reportes de inspección visual
- Movimiento de ítem.

Además, se realizaron algunas correcciones a los documentos existentes:

- Especificación de calificación.

Dichos documentos son documentos internos de la GCPCN y quedaran almacenados en la carpeta de la calificación en los servidores de la gerencia de acuerdo con el procedimiento de calidad vigente.

5.2 Resultados Experimentales.

5.2.1 Exudado.

Se pudo caracterizar correctamente el exudado. Los resultados del FTIR y los de FRX son consistentes, aunque en este ultimo no se pudo determinar con precisión la cantidad de CaCl_2 , se observa que hay una cantidad notable de especies iónicas de Ca y Cl (varios ordenes de magnitud mayores que otras especies químicas) por lo que se puede concluir que casi la totalidad del exudado corresponde a una variedad hidratada de CaCl_2 .

Hay que plantearse hasta qué punto el envejecimiento acelerado modifica los resultados obtenidos en los distintos ensayos. Ya que la temperatura en la que el PVC se degrada liberando HCl es mucho mayor que la temperatura ambiente en las que el cable debe operar.

5.2.2 Fragilizacion de la envoltura

Como se vio en la sección correspondiente, al enrollar el cable en la envoltura en uno de los extremos se propagó una fisura o marca existente. Para explicar este comportamiento se identificó y midió la distancia del extremo del cable a la fisura, como se ve en la Figura 35. Se constató que la fisura se encontraba a aproximadamente 70 cm del extremo, del cable identificado con la etiqueta “QMOLS002 KA2544 LADO VALVULA Recinto 1-107”



Figura 35. Distancia del extremo del cable a la fisura.

Se utilizó un plano de la válvula a escala 1:1 para ver cual era la posición del cable con respecto a la válvula y se encontró que el punto de la fisura corresponde a un punto de elevada temperatura en la válvula (hot spot). Dicho punto corresponde a la parte inferior de la válvula conectada a las cañerías del circuito del moderador y en consecuencia sujeta a temperaturas del orden de las informadas en la Tabla 1. Por lo que es razonable que ese punto en particular se encuentre mas envejecido térmicamente que el resto del PVC. Se deberá tener en cuenta este hecho para la calificación y ver como afecta esto en los restantes ensayos de resistencia a la aislación. Se puede ver en la Figura 36, la representación de donde estaría la fisura en el plano de la válvula.

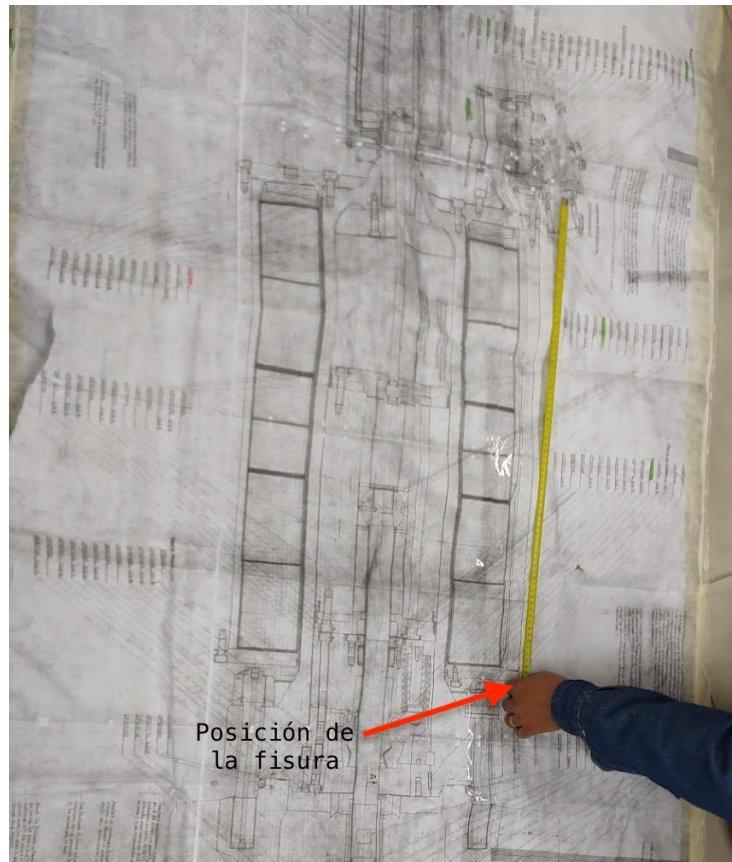


Figura 36. Ubicación de la fisura en el plano a escala 1:1 de la válvula.

6. Recomendaciones.

6.1 Compatibilidad química del exudado.

En primer lugar la existencia del exudado solo se da a temperaturas mayores a las de operación del cable por lo que es improbable que este puede afectar de alguna manera al funcionamiento del cable. Si bien es posible que este pueda reducir drásticamente la resistencia a la aislación. No se debería generar en cantidades apreciables durante el servicio en condiciones ambientales normales.

En segundo lugar se analizó la compatibilidad química del CaCl_2 con los diversos materiales que componen el cable o que pueden llegar a estar en contacto con él.

6.1.1 Goma Siliconada.

De acuerdo con la guía de compatibilidad química de la empresa Trelleborg® (Materials Chemical Compatibility Guide), La goma siliconada presenta muy buena resistencia tanto al compuesto anhidro como a una solución acuosa del mismo. Dándole una calificación A. Por lo que el material muestra muy poco o ningún efecto ante la exposición, mínimo o ningún efecto en las propiedades físicas.

6.1.2 PVC.

En cuanto a la interacción con el material de la envoltura de PVC del cable, se consultó con la base de datos de compatibilidad química de la empresa Cole-Parmer® [27], según la cual se le da una calificación de F, por efectos adversos moderados y no se recomienda para uso continuo debido a cambios desfavorables en propiedades mecánicas entre otros posibles efectos.

6.1.3 Otros Materiales.

Debido a que los cables podrían llegar a entrar en contacto con otros materiales (incluso en el propio horno de envejecimiento), se analizó la compatibilidad química con los aceros inoxidables mas comunes, en el caso del 304, tiene una calificación de C, por lo que no se recomienda para uso continuo, podrían aparecer efectos moderados. En el caso del 316, presenta una resistencia levemente mayor (calificación B), aunque en ambos casos podría ocurrir corrosión leve, decoloración, etc. No se recomienda dejar el cable en el horno en contacto con el acero inoxidable. También se analizó el caso del Aluminio utilizando la misma base de datos, Este presenta la peor calificación (D), por lo que no se recomienda para ningún uso, ya que el contacto con el CaCl_2 causa severos efectos. Esto se comprobó experimentalmente ya que los cables luego de ser sacados del horno fueron dejados sobre papel aluminio encontrándose corrosión del mismo. En cuanto al cobre, que forma el conductor interno del cable, este presenta una buena resistencia a la solución, con una calificación de B.

6.2 Presencia de humo al iniciar el ensayo.

Con respecto al humo, es posible que la fibra de vidrio tenga algún tipo de sizing que este haciendo combustión o se este degradando térmicamente. Probablemente deba evaluarse algún efecto adverso del sizing en la aislación de goma siliconada, y de no existir el mismo, continuarse la calificación utilizando solamente los cables sin recubrimiento de fibra de vidrio. una vez constatado que específicamente que no puede haber interacción alguna con posible sizing. Prescindiendo de la fibra de vidrio los resultados de la calificación serian en principio conservativo ya que se despoja al material de la aislación de SiR de una capa protectora .

6.3 Trabajos futuros.

Resta finalizar el envejecimiento térmico de los cables, hacer ensayos intermedios, y volver a envejecer térmicamente y por radiación. De esto se encargará el grupo EQ de la GCPCN. Además, se podría diagramar un ensayo para comprobar experimentalmente que la solución de ClCa_2 no afecta significativamente las propiedades tanto eléctricas como mecánicas de la aislación y envoltura.

Es necesario, además, identificar correctamente el origen del humo aparecido durante el envejecimiento térmico y proponer las modificaciones necesarias en el plan de calificación.

7. Bibliografía.

[1] IAEA, 2000. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment and instrumentation cables, IAEA-TECDOC-1188, IAEA Vienna, December 2000.

[2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No. 2, IAEA, Vienna (2019).

[3] HILL, B.R., STEED, O.T., "Harsh environmental qualification of cables for use in Sizewell 'B' PWR power station," Proc. Int. Conf. on 'Operability of nuclear systems in normal and adverse environments', Lyon, 1989, Societé Française d'Energie Nucléaire, Paris (1990).

[4] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Guide for Designing Multistress Aging Tests of Electrical Insulation in-a Radiation Environment, IEEE Std 775-1993, IEEE, New York (1993).

[5] KIM, Jong-Seog. (2005). Evaluation of Cable Aging Degradation Based on Plant Operating Condition. Journal of Nuclear Science and Technology - J NUCL SCI TECHNOL. 42. 745-753. 10.1080/18811248.2004.9726444.

[6] IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, July 1984.

[7] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Standard for Qualifying Electric Cables and Splices for Nuclear Facilities, IEEE Std 383-2015, IEEE, New York (2015).

[8] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std 323-2003, IEEE, New York (2003).

[9] IEC/IEEE International Standard - Nuclear facilities -- Electrical equipment important to safety -- Qualification - Redline," in IEC/IEEE 60780-323 Edition 1.0 2016-02 - Redline , vol., no., pp.1-160, 19 Feb. 2016.

- [10] IEEE/IEC 62582-3-2012 - IEC/IEEE International Standard - Nuclear Power Plants - Instrumentation and control important to safety - Electrical equipment condition monitoring methods - Part 3: Elongation at break, 2012.
- [11] "IEEE/IEC International Standard - Nuclear power plants -- Instrumentation and control important to safety -- Electrical equipment condition monitoring methods - Part 6: Insulation resistance," in IEC/IEEE 62582-6:2019 , vol., no., pp.1-52, 21 Oct. 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8877510.
- [12] NA-S.A. Manual de Operaciones CNAI. cap. 2.5 CIRCUITOS DE REFRIGERACION DEL MODERADOR Rev. 4. 1995.
- [13] CNEA, "Propuesta para la calificación de equipos. Válvulas FIAT QM01S02-07 y QM02S02-07", IN-EQ-059-004.
- [14] NA-S.A IT-GI-SPEV-CNAI-34-2017. Equipment Qualification Programme for Electrical and I&C Equipment of CNAI Rev.2. 2018
- [15] CNEA, "Informe de calificación de cable SiR para CNA I", Rev. 0, DC-EQ.CNAI.001-003
- [16] CNEA, "Caracterización del cable de la válvula FIAT de CNAI por medio de espectroscopía FTIR", DC-EQ.CNAI.008-001, Rev. 0, 2017.
- [17] CNEA, "Determinación de la energía de activación del cable de la válvula FIAT de CNAI", IN-EQ-059-008, Rev. 0.
- [18] CNEA, "Resultados de determinación de energía de activación y curva de calibración de indenter de cable código 272 de CNAI", IN-CPCN/GE-76 , Rev. 0.
- [19] CNEA, "Comparación entre cables de la válvula FIAT de CNAI por medio de espectroscopía FTIR", DC-EQ.CNAI.008-004, Rev. 0.
- [20] CNEA, "Especificación de Calificación Cable de válvula FIAT de CNA I", DC-EQ.CNAI.008-002, Rev. 0, 2020.
- [21] Lista Maestra de Calificación de equipos CNA unidad I (ATUWEB).
- [22] CNEA, "IN-RD-033-001 Reporte de inspección visual y medidas de contaminación en muestras de cable CNA I (Rev. 0)".
- [23] IAEA-NSNI/OSS, Meeting Minutes of 'Support Mission on equipment qualification of Atucha NPP', 2019.
- [24] CNEA, "Cronograma de calificación cable de válvula FIAT para CNAI", DC-EQ.CNAI.008-006, Rev. 0.

[25] CNEA, "Plan de Calificación de Cables de la válvula FIAT de CNAI", DC-EQ.CNAI.008-005, Rev. 0, 2021.

[26] T. Seguchi, K. Tamura, H. Kudoh, A. Shimada and M. Sugimoto, "Degradation of cable insulation material by accelerated thermal radiation combined ageing," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 6, pp. 3197-3206, December 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.004880.

[27] <https://www.coleparmer.com/chemical-resistance>, revisada en agosto, 2021.