

ELABORACIÓN DE UN MODELO TERMOHIDRÁULICO DEL SISTEMA SECUNDARIO DE LA CENTRAL NUCLEAR EMBALSE PARA ANÁLISIS DE ACCIDENTES Y SITUACIONES ANÓMALAS¹

J. F. MARCONI GIGLIO

Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes,
Avenida General Paz 1400, San Martín, Provincia de Buenos Aires, República Argentina

G. BEDROSIAN

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Avenida Medrano 951,
C1179AAQ, Buenos Aires, República Argentina
marconi@cnea.gov.ar

Resumen

Se realizó un modelo del Sistema Secundario de la Central Nuclear Embalse para simular transitorios y accidentes con el código CATHENA. En este modelo se representaron los componentes más importantes del sistema secundario de la central. Se incluyeron como condiciones de contorno el turbogruppo y el condensador principal.

A partir de la comparación de los valores alcanzados con un protocolo de planta representativo, se concluye que el modelo propuesto representa razonablemente bien el comportamiento de la Central Nuclear Embalse en el estado estacionario.

Abstract

A model of the Secondary System of Embalse Nuclear Power Plant has been prepared, in order to simulate transients and accidents through the CATHENA code. The most relevant components of the secondary system of the plant were represented in this model. The turbine generator unit and the main condenser were included as contour conditions

From the comparison of the reached values with a representative protocol plant, it is concluded that the proposed model represents reasonably well the behaviour of the Embalse Nuclear Power Plant in the steady state.

¹ Trabajo realizado sobre la base de la tesis presentada por J. Marconi Giglio para optar al grado de Magíster en Reactores Nucleares.

Introducción

El propósito del presente trabajo es la elaboración de un modelo detallado del Sistema Secundario de la Central Nuclear Embalse (CNE), para ser utilizado con el código CATHENA. Tal modelo se desarrolla a través de una nodalización y selección de parámetros adecuados, que representan de manera correcta el funcionamiento y las respuestas de dicho sistema durante los diversos tipos de transitorios operacionales o anormales registrados en la experiencia operativa. Es necesario además que involucre a los equipos y/o a las funciones inherentes al Sistema Secundario y debe igualmente responder a toda función especial, cada vez en que éste sea llamado a actuar bajo distintos modos operativos y condiciones asociadas ante transitorios o accidentes postulados como iniciadores en cualquier sitio de la Central.

El modelo general del Sistema Secundario a desarrollar y poner a punto comprende, principalmente, la representación de:

- Sistema de agua de alimentación.
- Sistema de vapor vivo a la turbina.
- Sistema de control de presión de los generadores de vapor.
- Sistema de control de nivel de agua de los generadores de vapor.
- Sistema de protección contra la sobrepresión.
- *Crash cooldown*

No se modelan ni la turbina ni el condensador, los cuales serán tratados como condiciones de contorno.

Descripción del Código

CATHENA es un código de cálculo termohidráulico diseñado para el análisis de flujo en doble fase y transferencia de calor en circuitos hidráulicos (Canadian Algorithm for Thermalhydraulic Network Analysis). Fue desarrollado por Atomic Energy of Canada Limited (AECL) en los laboratorios de Whiteshell [1].

Su desarrollo se orientó al análisis del comportamiento de un reactor de tipo CANDU en condiciones de accidente. Sin embargo, podría aplicarse al estudio de transitorios en cualquier circuito hidráulico con agua liviana o agua pesada y no estaría restringido solamente a reactores CANDU.

El modelo hidrodinámico utilizado en CATHENA es una representación unidimensional del flujo en dos fases. Las ecuaciones de conservación se aplican independientemente para cada fase ("código de seis ecuaciones") lo que permite representar condiciones de no equilibrio termodinámico (distintas temperaturas en las fases) y mecánico (distintas velocidades de las fases). Esta es una característica relevante de CATHENA frente a los códigos antes usados, que consideraban la mezcla de doble fase como un solo fluido con ecuaciones de conservación de la "mezcla" (códigos de tres ecuaciones).

El programa plantea balances individuales de masa, de cantidad de movimiento y de energía para las fases gaseosa y líquida, junto con relaciones constitutivas dependientes del régimen de flujo que describen la transferencia de masa, la cantidad de movimiento y la energía a través de la interfaz líquido - vapor y entre cada fase y las paredes de las tuberías. Puede incluirse además un componente gaseoso no condensable en la descripción de la fase gaseosa. El código contiene correlaciones de propiedades físicas para agua liviana y agua pesada, así como para varios gases no condensables (aire, nitrógeno, hidrógeno, helio, argón y dióxido de carbono).

El modelo de transferencia de calor incluye:

Conducción de calor unidimensional (radial) y en dos dimensiones (radial y azimutal)

Generación de calor por la reacción química entre la vaina del elemento combustible y el refrigerante (circonio metal – agua)

- Radiación térmica
- Conducción de calor por contacto pared - pared
- Convección de calor (pared – fluido)

El código permite modelar la transferencia de calor entre superficies múltiples y un único componente termohidráulico o entre múltiples componentes termohidráulicos y una única superficie.

CATHENA tiene modelos para un amplio rango de condiciones de transferencia de calor en los canales combustibles horizontales de los reactores CANDU, incluyendo flujo estratificado.

Se incluyen modelos hidrodinámicos para componentes básicos y modelos para tanques, cambios bruscos de área, válvulas, orificios, separadores, acumuladores, descarga en las roturas y un modelo neutrónico de cinética puntual.

Los sistemas de control y protección de la Planta pueden simularse a través de series de modelos debidamente acoplados que operan lógicamente y/o matemáticamente con los valores de las variables de Planta (“system models”) o bien a través de una interfaz se puede conectar el modelo de Planta con simulaciones de los sistemas de control desarrollados en forma separada.

En el modelo, el sistema real se representa a través de una serie de elementos constitutivos conocidos como volúmenes de control (por ejemplo un equipo, un tramo de cañería con accesorios, etc.). El código utiliza los parámetros geométricos ingresados y aplica los modelos hidrodinámicos en dichos volúmenes de control, para luego resolver las ecuaciones de balance correspondientes.

A esto debe sumarse que el código dispone de elementos para brindar un límite a los modelos, conocidos como condiciones de contorno. Estos elementos definen en ese punto de la nodalización las condiciones físicas de los fluidos fijadas por el usuario (presión, entalpía, fracción de vacío). Estos límites sirven para evitar representar elementos que no son necesarios para los fines de la simulación.

Descripción del modelo adoptado

En la preparación de la idealización, es necesario convertir el sistema físico a modelar en un conjunto de componentes que representan la circulación del fluido y sus procesos (calentamiento, bombeo, etc.). Por lo tanto, un modelo es un conjunto de componentes y datos que representan en forma matemática a uno o varios sistemas físicos.

Descripción general

Se adoptó la norma de que el nombre del volumen de control se corresponda con el equipo o elemento

más importante del componente que se esté modelando. Esto permite identificar con mayor claridad los volúmenes de control con los sistemas físicos de la CNE.

También se implementó una forma de codificación para el nombre de las planillas de cálculo, las memorias de cálculo, los esquemas, etc., que se crearon para reunir y elaborar la información concerniente a cada volumen de control.

Este sistema de codificación se desarrolló pensando en una rápida referencia entre los volúmenes de control y la información asociada con ellos, tendiente a reducir la comisión de errores y a facilitar su detección.

El paquete de información asociada a cada volumen de control fue identificado genéricamente con el código NNNSCC-TXVV y consiste en una serie de 3 letras (NNN) que representan la instalación, un número (S) que representa al subsistema, 2 números (CC) que representan al componente dentro de ese subsistema, un número (T) que indica el tipo de información (1 = Esquema, 2 = Memoria, 3 = Planilla de Cálculo), un dígito (X) que en este trabajo siempre lleva el valor 0, 2 números (VV) que representan la versión de la información.

Un ejemplo de esta codificación es "CNE201-3000", donde CNE representa la instalación, 2 al subsistema al cual pertenece el componente, 01 al componente, 3 representa la planilla de cálculo donde se encuentran los datos geométricos del componente, y 00 el número de la revisión, en este caso la primera.

Para facilitar el desarrollo del modelo se dividió al sistema secundario en 9 subsistemas, los cuales serán tratados por separado y luego integrados en la versión final. Los índices (S) para cada subsistema son:

- 0 Desde la salida del condensador de sellos hasta la succión de las bombas principales de alimentación.
- 1 El sistema auxiliar de alimentación hasta el colector de descarga de las bombas.
- 2 Desde la succión de las bombas principales de alimentación hasta los ramales de salida a los generadores de vapor.
- 3 Cada ramal de entrada a los generadores de vapor (GV) hasta el *preheater*. Indicando el número de los componentes (CC) en el 01 el GV1, en el 25 el GV2, en el 50 el GV3 y en el 75 el GV4.
- 4 Los cuatro generadores de vapor.
- 5 Desde el domo de los generadores de vapor hasta el SBH (Colector Principal de Vapor) indicando el número de los componentes (CC) en el 01 el GV1, en el 25 el GV2, en el 50 el GV3 y en el 75 el GV4.
- 6 Desde el SBH hasta la descarga a la turbina o al condensador principal.
- 7 Modelos de control de sistemas para el Sistema Secundario.
- 8 Condiciones de contorno del modelo.

Cada subsistema se integró a uno de los dos grandes grupos en que se dividió al Sistema Secundario: Circuito de Condensado y Sistema de Agua de Alimentación o al Sistema de Vapor Vivo a la Turbina. Estos dos grandes grupos fueron probados por separado con el fin de realizar ajustes menores y luego integrados (con cada subsistema correspondiente a los mismos).

Una vez finalizada esta fase el conjunto y los sistemas de control se integraron en un solo modelo y se representó al Sistema Primario de Transporte de Calor como una condición de contorno para obtener los resultados representativos del estado estacionario que reflejara las condiciones operativas normales

de la CNE. Se pasó luego a su adaptación final a todo el conjunto (integrando primario y secundario), quedando este modelo como definitivo, presentando los resultados en el capítulo "Resultados".

Descripción, diagramas e isométricos de cada volumen de control

A continuación se describirá por completo al modelo del Sistema Secundario de la CNE y se presentan isométricos junto con los datos geométricos relevados de cada volumen de control, como así también todos los elementos incluidos en cada volumen.

Pre calentamiento (Planillas CNE0xx-xxxx)

Este subsistema incrementa la temperatura del agua de alimentación hasta la temperatura de ingreso a los generadores de vapor. Está constituido por una serie de 12 pre calentadores. [2,4,5]

Los volúmenes de control que corresponden a este subsistema son:

- **PCS_PH1(CNE001-xxxx)**

Representa la cañería que va desde la salida del condensador de sellos (inicio del modelo, condición de contorno CNE801-xxxx) hasta la tee de entrada al pre calentador E104A. [4]

- **PCS_PH2(CNE002-xxxx)**

Corresponde a la cañería que va desde la tee de entrada al pre calentador E104A hasta la tee de entrada a los pre calentadores E104B. [4] [5]

- **BPV1(CNE003-xxxx)**

Representa la entrada al pre calentador E104A. Ésta se dividió en tres componentes: BPV1E, BPV1BP y BPV1S1; cada una de ellos representa, respectivamente, a la cañería de entrada al E104A hasta la válvula de by-pass BPV1, la cañería de by-pass, y la cañería de ingreso al E104A propiamente dicho. Dentro del volumen de control BPV1E, se modeló la cañería que va desde la tee a la salida del volumen PCS_PH1 hasta la entrada a la válvula. Dentro del volumen de control BPV1BP se modeló la cañería que va desde la válvula BPV1 hasta la tee de descarga del pre calentador E103A. Dentro de la salida normal BPV1S1 se modeló la cañería que va desde la válvula BPV1 hasta la entrada al pre calentador E104A. No se modeló el control de la válvula y por defecto el by-pass se encuentra cerrado. [4]

- **E104A(CNE004-xxxx)**

Este volumen de control representa al pre calentador E104A. En el mismo se representó como cañería dos veces el largo del pre calentador simulando las dos ramas de la U, y como volumen aproximadamente un 20% del volumen total del pre calentador. En cuanto al cambio de elevación se representó la distancia en altura que recorre el fluido hasta la entrada al pre calentador E103A. Para obtener el coeficiente de resistencia conociendo la pérdida de carga que introducía el pre calentador en el sistema, se calculó dicho coeficiente con el fin de obtener la pérdida deseada con la fórmula usada por CATHENA para su cálculo. También fue necesario determinar los coeficientes de transferencia de calor y área de transferencia para el pre calentamiento del fluido. Para ello se tomó el salto entálpico y el caudal másico de la CNE, y se fijó una temperatura del lado secundario y un coeficiente de transferencia, y con estos datos se obtuvo un área de transferencia equivalente aplicada al modelo. El modelo del pre calentador tiene un control que regula el coeficiente de transferencia en función de la descarga de vapor a la turbina. [4,6]

- **E104A(CNE005-xxxx)**

Este volumen de control representa al pre calentador E103A. Igual que en el anterior, la cañería representa dos veces el largo del pre calentador simulando las dos ramas de la U, y como volumen aproximadamente un 20% del volumen total del pre calentador. En cuanto al cambio de elevación se representó

la distancia en altura que recorre el fluido hasta la válvula de no retorno a la salida del precalentador. Para obtener el coeficiente de pérdida de carga se aplicó el mismo criterio que para el E104. También fue necesario determinar los coeficientes de transferencia de calor y el área de transferencia equivalente. [4,6]

•POUT1A(CNE006-xxxx)

Cañería que conecta la salida del precalentador E103A con la tee donde se une al by-pass del mismo. [4]

•PPH_PH1(CNE007-xxxx)

Representa la cañería que une la tee de salida del precalentador E103A con la tee de salida del precalentador E103B. No posee accesorios y es simplemente un caño de 10620 mm de largo y 500 mm de diámetro. [4] [5]

•BPV2(CNE008-xxxx)

Representa la entrada al precalentador E104B. Ésta se dividió en tres componentes: BPV2E, BPV2BP y BPV2S1, igual que BPV1. [5]

•E104B(CNE009-xxxx)

Es igual al precalentador E104A. [6] [5]

•E103B(CNE010-xxxx)

Es igual al precalentador E103A. [6] [5]

•POUT1B(CNE011-xxxx)

Es igual al volumen POUT1A. [5]

•PPH_PH2(CNE012-xxxx)

Representa la cañería que une la tee de salida del precalentador E103B con la tee de salida del precalentador E103C. No posee accesorios y es simplemente un caño de 11920 mm de largo y 600 mm de diámetro. [5]

•BPV3(CNE013-xxxx)

Representa la entrada al precalentador E104C. Ésta se dividió en tres componentes: BPV3E, BPV3BP y BPV3S1, igual que BPV1. [5]

•E104C(CNE014-xxxx)

Igual al precalentador E104A. [5,6]

•E103C(CNE015-xxxx)

Igual al precalentador E103A. [5,6]

•POUT1C(CNE016-xxxx)

Es igual al volumen POUT1A. [5]

•PPH01(CNE017-xxxx)

Representa a la cañería que une la salida del grupo de precalentadores E104-E103 con la entrada al grupo E102-E101. [5]

•PPH02(CNE018-xxxx)

Representa la cañería que une la tee de entrada al precalentador E102C con la tee de entrada al precalentador E102B. No posee accesorios y es simplemente un caño de 20675 mm de largo y 500 mm de diámetro. [5]

•BPV4(CNE019-xxxx)

Representa la entrada al precalentador E102C. Igual que en la BPV1, ésta fue dividida en tres componentes: BPV4E, BPV4BP y BPV4S1. [5]

•E102C(CNE020-xxxx)

Este volumen de control representa al precalentador E102C. Igual que en el anterior, la cañería representa dos veces el largo del precalentador simulando las dos ramas de la U, y como volumen aproximadamente un 20% del volumen total del precalentador. En cuanto al cambio de elevación se representó la distancia en altura que recorre el fluido la entrada al precalentador E101C. Para obtener el resto de

los coeficientes se aplicó el mismo criterio que para el E104A. También fue necesario determinar el coeficiente de transferencia de calor y el área de transferencia equivalente. El precalentador tiene un control que regula el coeficiente de transferencia en función de la descarga de vapor a la turbina. [5,6]

•E101C(CNE021-xxxx)

Este volumen de control representa al precalentador E101C. Igual que en el anterior la cañería representa dos veces el largo del precalentador simulando las dos ramas de la U, y como volumen aproximadamente un 20% del volumen total del precalentador. En cuanto al cambio de elevación se representó la distancia en altura que recorre el fluido hasta la válvula de no retorno a la salida del precalentador. Para obtener el resto de los coeficientes se aplicó el mismo criterio que para el E104A. También fue necesario determinar el coeficiente de transferencia de calor y el área de transferencia equivalente. El precalentador tiene un control que regula el coeficiente de transferencia en función de la descarga de vapor a la turbina. [Ref. 6] [Ref. 5]

•POUT2C(CNE022-xxxx)

Representa la cañería que une la salida del precalentador E101C con la tee donde se une su by-pass. [5]

•PPH_B1(CNE023-xxxx)

Representa la cañería que une la tee de salida del precalentador E101C con la tee de salida del precalentador E101B. No posee accesorios y es simplemente un caño de 16390 mm de largo y 400 mm de diámetro. [5]

•BPV5(CNE024-xxxx)

Representa la entrada al precalentador E102B. Igual que en la BPV1, está fue dividida en tres componentes: BPV5E, BPV5BP y BPV5S1. [5]

•E102B(CNE025-xxxx)

Igual al precalentador E102C. [5,6]

•E101B(CNE026-xxxx)

Igual al precalentador E101C. [5,6]

•POUT2B(CNE027-xxxx)

Igual al volumen POUT2C. [5]

•PPH_B2(CNE028-xxxx)

Representa la cañería que une la tee de salida del precalentador E101B con la tee de salida del precalentador E101A. No posee accesorios y es simplemente un caño de 21595 mm de largo y 550 mm de diámetro. [4,5]

•BPV6(CNE029-xxxx)

Representa la entrada al precalentador E102A. Igual que en la BPV1, está fue dividida en tres componentes: BPV6E, BPV6BP y BPV6S1. [4]

•E102A(CNE030-xxxx)

Igual al precalentador E102C. [4,6]

•E101A(CNE031-xxxx)

Igual al precalentador E101C. [4,6]

•POUT2A(CNE032-xxxx)

Igual al volumen POUT2C. [4]

•PINBA(CNE033-xxxx)

Representa a la cañería que une la salida de todos los precalentadores con la aspiración de las tres bombas P102 (A, B y C). [4]

•PINBB(CNE034-xxxx)

Representa la cañería que une la tee de entrada a la bomba P102A con la tee de entrada a la bomba P102B. No posee accesorios y es simplemente un caño de 7800 mm de largo y 700 mm de diámetro. [4]

- F102A(CNE035-xxxx)
Cañería de entrada a la bomba P102A. [4]
- F102B(CNE036-xxxx)
Cañería de entrada a la bomba P102B. [4]
- F102C(CNE037-xxxx)
Cañería de entrada a la bomba P102C. [4]

Sistema de Alimentación Auxiliar (Planillas CNE1xx-xxxx)

Este sistema se modeló como una válvula, una bomba y la condición de contorno desde donde aspira la bomba. [4]

Bombas Principales (Planillas CNE2xx-xxxx)

Este subsistema se encarga de presurizar el fluido para su ingreso a los generadores de vapor. Está constituido fundamentalmente por 3 bombas y sus respectivas válvulas. Cada una de estas bombas opera con el 50% del caudal de ingreso a los generadores de vapor. Normalmente operan 2 de ellas, permitiendo tener a la tercera en disponibilidad para el caso de falla de una de las dos anteriores. [2,7]

- POUTA(CNE204-xxxx)
Esta cañería conduce el fluido desde la salida de la bomba P102A hasta donde se une con la salida de la bomba P102B. [7]

- POUTB(CNE208-xxxx)
Esta cañería conduce el fluido desde la salida de la bomba P102B hasta la tee donde se une con la salida de la bomba P102A. [7]

- POUTAB(CNE209-xxxx)
Representa a la cañería que va desde la tee donde se unen las salidas de las bombas P102A y P102B, hasta la tee donde ingresa la salida de la bomba P102C. No posee accesorios y es simplemente un caño de 8935 mm de largo y 700 mm de diámetro. [7]

- POUTC(CNE213-xxxx)
Esta cañería conduce el fluido desde la salida de la bomba P102C hasta el colector de descarga de las tres bombas. [7]

- BFW(CNE214-xxxx)
Representa al colector que recibe la descarga de las tres bombas P102 A, B y C, y del cual salen las 4 cañerías de entrada a los generadores de vapor. [7]

Alimentación a los Generadores de Vapor (Planillas CNE3xx-xxxx)

Este subsistema tiene como misión conducir el agua a los generadores de vapor, regulando el caudal de ingreso a los mismos mediante válvulas de control de nivel (LCV, level control valve). Solo se modeló una LCV del 100 % de potencia. La indicación de # se reemplaza por el número de GV. En el listado de componentes el primer paréntesis pertenece al GV1 y así sucesivamente hasta el último para el GV4. [2]

- PINL#(CNE301-xxxx)(CNE325-xxxx)(CNE350-xxxx)(CNE375-xxxx)
Línea de entrada a cada generador de vapor. La misma va desde el colector de las bombas P102 hasta la válvula para control de nivel de líquido en cada generador de vapor. [7]

- LCV#C1(CNE304-xxxx)(CNE328-xxxx)(CNE353-xxxx)(CNE378-xxxx)

Cañería que contiene los accesorios y válvulas para la aislación de la válvula de control de nivel de cada generador de vapor. [3,7]

•PGVIN#(CNE305-xxxx)(CNE329-xxxx)(CNE354-xxxx)(CNE379-xxxx)

Representa la cañería que va desde la válvula de control de nivel hasta la entrada a cada generador de vapor. [7-11]

Generadores de Vapor (Planillas CNE4xx-xxxx)

Para simular el lado secundario de los generadores de vapor se usó un modelo ya desarrollado y suministrado por Núcleo Eléctrica Argentina Sociedad Anónima (NASA). En # debe reemplazarse el número de GV. [12]

Sus principales componentes son:

•GV#PREH

Este componente tiene como función calentar el fluido hasta la temperatura de saturación.

•GV#RIS1, GV#RIS2, GV#RIS3, GV#RIS4, GV#RIS5

En estos volúmenes el fluido pierde densidad y se va transformando en vapor, aumentando su entalpía. Existen dos procesos en este mismo volumen, uno por el cual el fluido evapora libremente, y el segundo en el cual el fluido en fase vapor se acelera y empuja al líquido, que desborda y cae por el *Downcomer*, aumentando así la circulación y con ello el coeficiente de transferencia.

•GV#DC01, GV#DC02, GV#DC03, GV#DC04

La función de este componente es la de conducir por circulación natural al líquido nuevamente a la base del *Riser*.

•GV#SEPA

Este componente (Separador) simula la acción de los ciclones que se encargan de separar la humedad del vapor que proviene del *Riser*, dirigiendo el vapor hacia el domo y el líquido hacia el *Downcomer* para que inicie el ciclo nuevamente.

•GV#DOMO

El domo tiene como función la de colectar y encausar el vapor hacia la descarga del generador de vapor.

Descarga de vapor de los Generadores de Vapor (Planillas CNE5xx-xxxx)

Este subsistema tiene como misión colectar el vapor de los cuatro generadores de vapor y llevarlos hacia el SBH. La indicación de # se reemplaza por el número de GV. [2]

•POUTB#(CNE501-xxxx)(CNE525-xxxx)(CNE551-xxxx)(CNE575-xxxx)

Esta cañería es la que conduce el vapor desde el domo de cada generador de vapor hasta el punto donde se ubican las válvulas de seguridad y de descarga a la atmósfera (MSSVs y ASDVs, respectivamente). [3,13]

•PINBH#(CNE502-xxxx)(CNE526-xxxx)(CNE552-xxxx)(CNE576-xxxx)

Esta cañería es la que conduce el vapor desde el punto donde se ubican las ASDVs y MSSVs hasta el *steam balance header* (SBH).

Descarga a la Turbina y al Condensador (Planillas CNE6xx-xxxx)

Este subsistema se encarga de colectar el vapor proveniente de los cuatro generadores de vapor y conducirlo hacia la turbina o el condensador. [2]

•SBH(CNE601-xxxx)

Este componente es parte del *Steam Balance Header*, cañería en la que se igualan las presiones y entalpías del vapor proveniente de cada generador de vapor, para uniformar su ingreso a la turbina de alta presión. [14]

•POUTA1(CNE602-xxxx)

Parte del Steam Balance Header desde el cual el vapor se dirige hacia la turbina de alta presión y la tee de entrada a la válvula 1 de dicha turbina. [14]

•POUTA2(CNE603-xxxx)

Representa la tee de entrada a la válvula 2 de la turbina de alta presión. [14]

•POUTA3(CNE604-xxxx)

Representa la tee de entrada de las válvulas 3 y 4 de la turbina de alta presión. [14]

•POUTDC1(CNE605-xxxx)

Parte del Steam Balance Header que conduce al vapor hacia las CSDVs siendo éstas controladas por el programa BPC. Incluye la tee de entrada a la válvula CSDV1. [14]

•POUTDC2(CNE606-xxxx)

Representa la tee de entrada a la válvula CSDV2 y CSDV3. [14]

•CSDV1(CNE607-xxxx)

Representa la mitad de la cañería donde se encuentran las válvulas de descarga al condensador y tiene un área de pasaje equivalente al doble del área de la cañería. Primer grupo de 4 válvulas.

•CSDV2(CNE608-xxxx)

Es igual al volumen CSDV1.

•CSDV3(CNE609-xxxx)

Es igual al volumen CSDV1.

•PINT1(CNE610-xxxx)

Representa la cañería que va desde la tee de salida del POUTA1 hasta la válvula de no retorno de la turbina de alta presión. [15]

•PINT2(CNE611-xxxx)

Representa la cañería que va desde la tee de salida del POUTA2 hasta la válvula de no retorno de la turbina de alta presión. [15]

•PINT3(CNE612-xxxx)

Representa la cañería que va desde la tee de salida del POUTA3 hasta la válvula de no retorno de la turbina de alta presión. [15]

•PINT4(CNE613-xxxx)

Representa la cañería que va desde la tee de salida del POUTA4 hasta la válvula de no retorno de la turbina de alta presión. [15]

•VDTA1(CNE614-xxxx)

Representa la cañería que va desde la válvula de no retorno (salida de PINT1) hasta la válvula 1 de admisión a la turbina de alta. [15]

•VDTA2(CNE615-xxxx)

Representa la cañería que va desde la válvula de no retorno (salida de PINT2) hasta la válvula 2 de admisión a la turbina de alta. [15]

•VDTA3(CNE616-xxxx)

Representa la cañería que va desde la válvula de no retorno (salida de PINT3) hasta la válvula 3 de admisión a la turbina de alta. [15]

•VDTA4(CNE617-xxxx)

Representa la cañería que va desde la válvula de no retorno (salida de PINT4) hasta la válvula 4 de admisión a la turbina de alta. [15]

Modelos de control de sistemas para el Sistema Secundario (Planillas NE7xx-xxxx)

Los modelos de control de sistemas del Sistema Secundario incluyen: el BLC (Programa de control de Nivel de los Generadores de Vapor), el BPC (Programa de control de presión de los Generadores de Vapor) y una serie de controles sobre el funcionamiento y operación de distintos equipos.

Control de equipos

Dentro de éstos se incluyen:

- El control de las bombas de alimentación (Principales y auxiliar)
- El control de los precalentadores
- Las tablas de posición del vástago vs apertura de las LCVs.

El control de las bombas contiene las curvas características de cada bomba: curva de altura en función del caudal, curva de parada en función del tiempo, y curva de arranque en función del tiempo. Estas tres curvas se convirtieron en polinomios de grado 4. A su vez se diseñó un modelo de control que tiene en cuenta la pérdida de clase IV apagando las bombas principales y encendiendo las bombas de auxiliares.

Programa BLC

Este programa se encarga del control de nivel de los generadores de vapor. Para cumplir este fin el modelo simula señales de medición de nivel de rango angosto y medio, tomados directamente en el generador de vapor, y en función de la potencia del reactor determina el nivel deseado.

Existen 6 términos para determinar primero el caudal deseado, siendo éstos los siguientes. [16]

COMP (Término proporcional en función del error de nivel)

Este término multiplica una ganancia por el error de nivel.

CONIB (Término integral en función del error de nivel)

Este término tiene en cuenta el error de nivel integrado en un lapso de 20 segundos.

WSF (Término de balance de masas)

Este término tiene en cuenta la masa que entra y sale de cada generador de vapor.

RPT (Término relacionado con la potencia del reactor)

Este término tiene en cuenta la potencia del reactor corregida por la temperatura de entrada a los generadores de vapor.

PRN (Término relacionado con la expansión o contracción de la masa de líquido de cada GV)

Este término tiene en cuenta las variaciones de potencia absorbida por los generadores de vapor. En la CNE este término no es tenido en cuenta para el control de nivel.

PD (Término relacionado con la presión en los GV)

Este término tiene en cuenta las variaciones de presión producidas en los generadores de vapor. En la CNE este término no es tenido en cuenta para el control de nivel.

Con la suma de estos 6 términos el programa BLC determina el caudal deseado y con éste, usando una correlación para la posición del vástago en función del caudal, determina la posición del vástago para cada válvula de control de nivel.

Programa BPC

El programa BPC efectúa el control de presión del sistema secundario, regulando la presión en el domo de los generadores de vapor al nivel de operación, aproximadamente 46,89 kg/cm² con respecto a la atmosférica. Para ello el BPC controla dos conjuntos de válvulas (ASDVs y CSDVs) ordenando su apertura en función del error de presión. Para definir cuál de estos dos conjuntos actúa primero el BPC tiene tres modos de operación: *warm-up*, *cool-down* y *hold*. En el modo *warm-up* y *hold* usa primero las ASDVs, mientras que en *cool-down* usa primero las CSDVs. [17]

Condiciones de contorno (Planillas CNE8xx-xxxx)

(CNE801) Condensador de sellos.

(CNE802) Inyección del condensado de los Precalentadores E101 y E102.

(CNE803) Aspiración de la bomba del Sistema de Alimentación Auxiliar.

(CNE804) Descarga a la atmósfera de las MSSVs.

(CNE805) Turbina de alta presión.

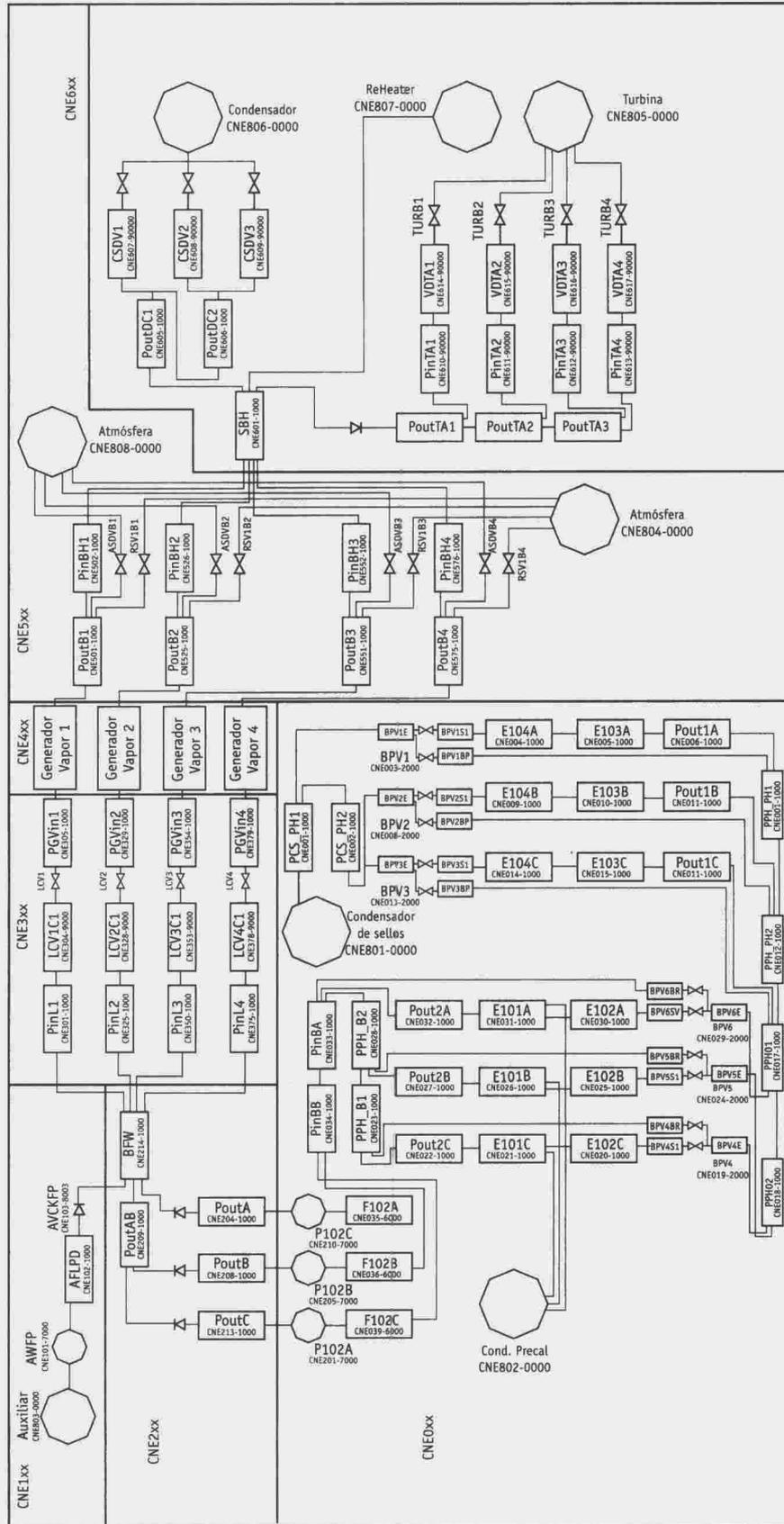
(CNE806) Descarga al condensador de las CSDVs.

(CNE807) Descarga al recalentador - separador de humedad.

(CNE808) Descarga a la atmósfera de las ASDVs.

El modelo elaborado puede observarse en la figura 1, donde se encuentra representado todo el Sistema Secundario. Seguidamente aparecen las tablas con los parámetros geométricos de cada componente. Los parámetros geométricos y los cálculos correspondientes a los generadores de vapor han sido provistos por Nucleoeléctrica Argentina S.A. [12]

Figura 1 Nodalización del Sistema Secundario de la CNE



Resultados

Condiciones Nominales de Operación del Sistema Secundario de la Central Nuclear Embalse

El análisis del comportamiento del modelo se realizó basándose en un protocolo de la CNE del mes de agosto del año 1998. [6]

Datos relevados del sistema secundario:

•Caudal másico a la salida del condensador	751,66 kg/s.
•Temperatura del líquido a la salida del condensador	31,87 °C.
•Presión a la salida del condensador de sellos	22,486 kg/cm ² (g).
•Temperatura entre los grupos de precalentadores	87,95 °C.
•Caudal másico a la entrada de las bombas P102	946,67 kg/s.
•Temperatura a la entrada de las bombas P102	158,46 °C.
•Presión en el colector de descarga de las bombas P102	63,71 kg/cm ² (g).
•Nivel de líquido en el generador de vapor 1	1068,7 mm.
•Nivel de líquido en el generador de vapor 2	1093,0 mm.
•Nivel de líquido en el generador de vapor 3	1068,5 mm.
•Nivel de líquido en el generador de vapor 4	1063,7 mm.
•Presión en Steam Balance Header	46,89 kg/cm ² .
•Apertura de las válvulas de ingreso a la turbina	53,52 %.
•Caudal másico al recalentador	65,15 kg/s.
•Caudal másico por la bomba P102A	468,19 kg/s.
•Caudal másico por la bomba P102B	520,92 kg/s.
•Caudal másico por la bomba P102C	0,0 kg/s.

Reproducir estos valores del estado estacionario representa el objetivo del modelo. El comienzo de las curvas siguientes se hizo una vez logrado el estado estacionario, tiempo inicial 2000 segundos, y se muestran 50 segundos representativos del mismo, tiempo elegido debido a que se puede observar con claridad cómo evoluciona el modelo.

Caudal másico a la salida del condensador de sellos

El caudal másico a la salida del condensador de sellos (figura 2) se estabiliza en 765 kg/s, valor levemente superior al protocolo de 751 kg/s. Esto se debe a que el modelo del Sistema Primario acoplado tiene una potencia aproximadamente un 3% superior a la del protocolo de la CNE. De acuerdo a lo dicho se espera que todos los caudales del Sistema Secundario sean superiores a los del protocolo de planta. A pesar de ello el modelo representa en razonables condiciones al Sistema Secundario de la CNE como se verá en los gráficos sucesivos.

Temperatura del líquido a la salida del condensador de sellos

La temperatura del líquido a la salida del condensador es una condición de contorno que se mantiene a 31,87°C.

Presión a la salida del condensador de sellos

También la presión a la salida del condensador de sellos se consideró una condición de contorno, usando para ello la presión a la entrada de los precalentadores tomada del protocolo de 22,48 kg/cm²(g).

Temperatura entre los grupos de precalentadores E103-E104 y los grupos E102-E101

La temperatura entre los precalentadores E103 y los precalentadores E102 (figura 3) se encuentra en promedio dentro de los 84°C y los 85°C, siendo el valor del protocolo (87,95 °C). Este valor es inferior al protocolo debido principalmente, al caudal que pasa por los precalentadores, que como se indicó anteriormente, es superior al del protocolo de la CNE.

Caudal másico a la entrada de las bombas P102

En este caso (figura 4) el caudal aspirado por las bombas es 1000 kg/s que resulta superior al del protocolo (946 kg/s), encontrándose dentro de los valores esperados de acuerdo a lo enunciado precedentemente en referencia con el sistema primario.

Temperatura a la entrada de las bombas P102

La temperatura a la entrada de las bombas se encuentra con una tendencia hacia los 157°C. Por protocolo esta temperatura es de 158°C, y por diseño se encuentra en 159,6°C (figura 5). Valores aceptables de acuerdo a lo enunciado con referencia a los caudales.

Presión en el colector de descarga de las bombas P102

La presión a la descarga de las bombas P102 del modelo se encuentra dentro de los parámetros esperados con una tendencia a los 62,5 kg/cm²(g), el valor del protocolo es 63,71 kg/cm²(g). (Figura 6).

Nivel de líquido en el generador de vapor 1

El control de nivel en los generadores de vapor fue cuidadosamente estudiado para lograr que el generador tienda a estabilizarse en el valor correspondiente a la planta.

Este valor está controlado por el programa BLC y es éste un excelente dato para comprobar el funcionamiento del programa de control.

Se puede observar en la figura 7 que el nivel en los generadores de vapor tiende a 1060 mm, medidos desde la boca inferior de los separadores, valor que corresponde al valor de referencia del programa para el 100% de potencia.

Nivel de líquido en el generador de vapor 2

Al igual que en el generador de vapor 1 en este generador de vapor el comportamiento del nivel se encuentra dentro de los valores del protocolo de planta. (Figura 7).

Nivel de líquido en el generador de vapor 3

Al igual que en el generador de vapor 1 en este generador de vapor el comportamiento del nivel se encuentra dentro de los valores del protocolo de planta. (Figura 7).

Nivel de líquido en el generador de vapor 4

Al igual que en el generador de vapor 1 en este generador de vapor el comportamiento del nivel se encuentra dentro de los valores del protocolo de planta. (Figura 7).

Presión en SBH

La presión en el SBH es un dato importante de planta dado que éste define la presión en los generadores de vapor (Es el lugar donde se igualan las presiones de los cuatro generadores de vapor).

Este parámetro está controlado por el programa BPC y éste es un excelente dato para comprobar el funcionamiento del programa.

El BPC hace un control muy fino de este valor, hecho que se ve en su estabilidad, que se encuentra acotado a los 46,90 kg/cm² tomados en el domo de cada generador de vapor. En la figura 11 se observa que se encuentra en valores acordes con el protocolo de planta.

Apertura de las válvulas de ingreso a la turbina

En la figura 12 se puede ver el comportamiento en el modelo de la válvula de turbina. Se encuentra que su comportamiento es estable y aceptable.

Caudal másico al recalentador-separador de humedad

A este parámetro el modelo lo calcula como un caudal asociado a una condición de contorno, teniendo en cuenta la diferencia de presiones entre el SBH y la presión en el recalentador obtenida del protocolo (ver figura 13) cuyo comportamiento se encuentra estable y en los valores de planta.

Caudal másico por cada bomba P102

En el modelo este caudal es levemente superior al esperado por lo enunciado precedentemente con respecto a los caudales

El caudal por la bomba P102C es nulo debido a que esta bomba se encuentra en disponibilidad para cubrir una falla de alguna de las otras dos. En cuanto a los caudales de las bombas P102A, figura 14, y P102B, figura 15, se observa que los mismos se encuentran de acuerdo a los valores del protocolo de planta.

Análisis comparativo entre el modelo y los valores medidos en los protocolos de planta de la CNE

A partir de las figuras y de los datos de la Tabla 1 puede verse que el modelo representa razonablemente bien a la Central Nuclear Embalse.

En la Tabla 1 se observa que las presiones y el nivel en los generadores de vapor en el modelo se mantienen dentro de valores aceptables de acuerdo al protocolo de planta. Como era de esperarse, los caudales son levemente superiores y, consecuentemente, las temperaturas inferiores, debido principalmente a lo enunciado respecto del Sistema Primario.

En líneas generales puede verse que el modelo propuesto del Sistema Secundario de la CNE representa razonablemente bien en el estado estacionario a la planta sobre la base de su comparación con el protocolo propuesto.

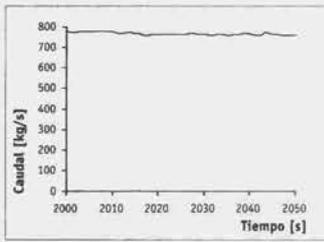


Figura 2 Caudal másico a la salida PCS_PH1 final

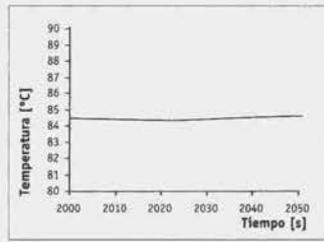


Figura 3 Temperatura en PPH01 final

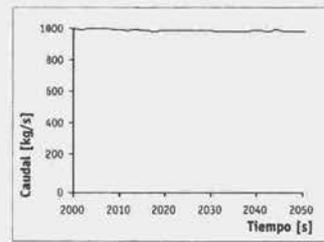


Figura 4 Caudal aspirado por las bombas P102 final

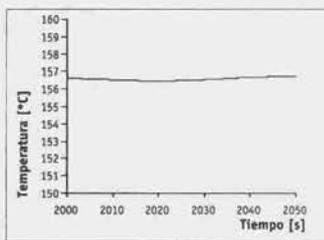


Figura 5 Temp. a la salida de PINBA final

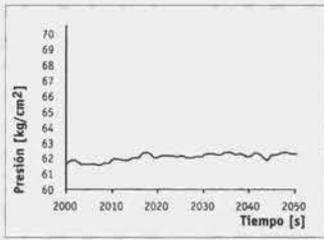


Figura 6 Presión en BFW final

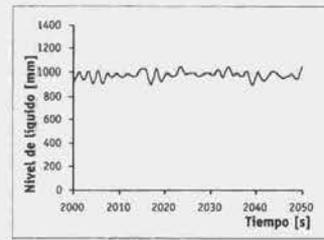


Figura 7 Nivel de líquido en el GV final

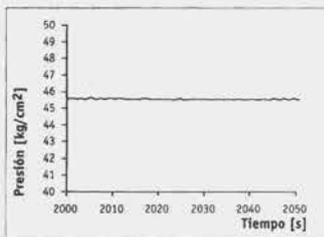


Figura 8 Presión en el SBH final

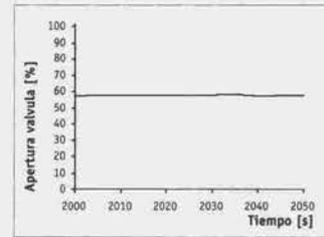


Figura 9 Apertura válvula a la turbina final

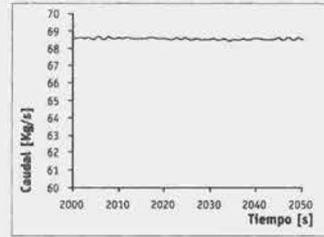


Figura 10 Caudal al recalén. sep. de humedad final

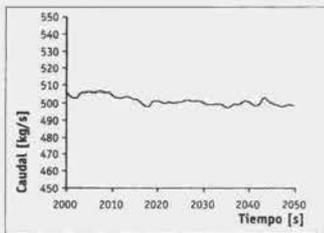


Figura 11 Caudal por la bomba P102A

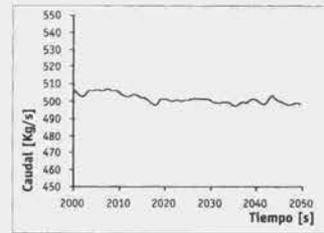


Figura 12 Caudal por la Bomba P102B

Tabla 1 Comparación entre variables del modelo y del protocolo de planta de la CNE

	CNE	MODELO	DIFERENCIA
Caudal másico a la salida del condensador de sellos	751,667 kg/s	760,620 kg/s	1,2%
Temperatura de líquido a la salida del condensador	31,870 °C	31,850 °C	-0,1%
Presión a la salida del condensador de sellos	22,486 kg/cm ²	22,446 kg/cm ²	-0,2%
Temperatura entre grupos de precalentadores E103-E104 y los grupos E102-E101	87,950 °C	84,430 °C	-4,0%
Caudal másico a la entrada de las bombas P102	946,669 kg/s	997,410 kg/s	5,4%
Temperatura a la entrada de las bombas P102	158,460 °C	156,800 °C	-1,0%
Presión en el colector de descarga de las bombas P102	63,710 kg/cm ²	62,332 kg/cm ²	-2,2%
Nivel de líquido del generador de vapor 1	1068,7 mm	1043,1 mm	-2,4%
Nivel de líquido del generador de vapor 2	1093,0 mm	1013,5 mm	-7,3%
Nivel de líquido del generador de vapor 3	1068,5 mm	1042,1 mm	-2,5%
Nivel de líquido del generador de vapor 4	1063,7 mm	1051,1 mm	-1,2%
Presión en el SBH	46,890 kg/cm ²	46,365 kg/cm ²	-1,1%
Caudal másico al recalentador separador de humedad	65,153 kg/s	68,400 kg/s	5,0%
Caudal másico por las bomba P102A	468,194 kg/s	498,650 kg/s	6,5%
Caudal másico por las bomba P102B	520,917 kg/s	498,650 kg/s	-4,3%
Caudal másico por las bomba P102C	0,000 kg/s	0,000 kg/s	0,0%
Apertura de la válvula de admisión a la turbina	53,52 %	57,68 %	5,2%

Referencias

- 1 T. G. BEUTHE, B. N. HANNA (1998) CATHENA MOD-3.5b/Rev 0 Theoretical Manual – AECL – COG-93-140-V3-R1 – 1998.
- 2 E. A. NAJERA (1984) Sistemas de la Parte Convencional. Central Nuclear Embalse.
- 3 AECL (1987) Sistema de Vapor y Agua de Alimentación 36100 Control de Nivel 63620 Control de Presión 63614 - 4 DM 18-36100/63620-/63614 Rev 4 – CNE.
- 4 ITALIMPIANTI (1977) – Sistema Acqua Alimento, 1ª Parte, Assonometria. 2407-W51053-H.
- 5 ITALIMPIANTI (1977) Sistema Acqua Alimento, 2ª Parte, Assonometria. - 2407-W51012-H
- 6 CENTRAL NUCLEAR EMBALSE (1998) Protocolo de Planta.
- 7 ITALIMPIANTI (1976) Sistemazione Tubazioni Acqua Alimento AP, Assonometria -2407-W51034-H.
- 8 AECL (1976) Sistema del Agua de Alimentacion de los Generadores de Vapor, Disposicion de Tuberías. 18-43230-3-1-GA-E-Rev 8.
- 9 AECL (1976) Sistema del Agua de Alimentacion de los Generadores de Vapor, Disposicion de Tuberías. 18-43230-6-1-GA-E Rev 2 -
- 10 AECL (1979) Sistema del Agua de Alimentacion de los Generadores de Vapor, Disposicion de Tuberías.18-43230-5-1-GA-E-Rev 2.
- 11 AECL (1979) Sistema del Agua de Alimentacion de los Generadores de Vapor, Disposicion de Tuberías.18-43230-4-1-GA-E-Rev 5.
- 12 NUCLEOELÉCTRICA ARGENTINA SOCIEDAD ANÓNIMA, Datos Suministrados en el marco del CP-RCN-AII-01/02 (Sistema Primario de Transporte de Calor y Generadores de vapor NASA)
- 13 AECL (1980) Planos 36140-s1/s2/s3/s4/s6/s7/s8/s9/s10/s11/ s12/ s13/s14/s15/s16/s17/s18/s19/s20 36110-s1/s2/s3/s4/ s5 18-36100-12-1-GA-E Rev 9 18-36100-11-1-GA-E-Rev 5 18-36100-6-1-GA-E-Rev 4.
- 14 AECL (1978) Colector del Vapor 0105 - 41119-5001-01-DD .
- 15 ITALIMPIANTI (1977) - Planos 2407-41119-W56306-A1 Rev B, 2407-41119-W56307-A1-Rev C, 2407-41119-W56308-A1-Rev B, 2407-41119-W56309-A1-Rev C. –
- 16 A. H. Catharll (2002) Program Specitication Steam Generator Level Control. 18-66556-202-PS-Rev 10 -