

## EXPERIENCIAS DE UN FABRICANTE ESPAÑOL EN LA CONSTRUCCION DE GENERADORES DE VAPOR

J. CAYON - M. GONZALEZ SAN JOSE

E. GONZALEZ-MESONES - A. PALMERO

### INTRODUCCION

Equipos Nucleares, S. A., a continuación ENSA, fue fundada en 1972 como resultado de la invitación realizada por la Administración, a fin de incrementar la participación nacional en la construcción de las centrales nucleares previstas en el plan existente en aquella época. Como consecuencia de ello, ENSA se diseña y dota para acometer la fabricación de los componentes del primario: Vasijas, Generadores, Presionadores, Estructuras del Núcleo y Tubería Primaria.

Desde un principio se es consciente de la diversificación de tecnologías existentes en el programa español y se busca, tanto en maquinarias como en tecnología, desarrollar los recursos adecuados para satisfacer el mercado y responder a la confianza que los socios iniciales depositan en los responsables de ENSA.

Esta diversificación tecnológica nos ha permitido vivir un caso único en el mundo, dado que hemos podido experimentar las diferentes tecnologías: Westinghouse, KWU y General Electric, amén de haber participado en ofertas y trabajos con otros tecnólogos que nos han ayudado a "asimilar" diferentes técnicas y alcanzar el nivel tecnológico existente hoy en día en la empresa.

### PRINCIPALES DOTACIONES

Para afrontar la construcción de los componentes mencionados, ENSA

tuvo que dimensionarse y dotarse de medios no comunes en el mercado nacional y que, de forma resumida, señalamos a continuación:

- Tres naves de una superficie total de 18.000 m<sup>2</sup> y capacidad de maniobra de 225 t, 325 t y 900 t, respectivamente.
- Torno Vertical SCHIESS de 7 m de diámetro, plato (alcanzable 12 m) y peso máximo 250 t.
- Centro Mecanizado INNSE compuesto de dos fresadoras, mandrinadora con cabezal y montante móviles, mesa giratoria y montante interno, con control numérico.
- Taladros Profundos (2) tipo Deepmatic, con control numérico y tres mandrinos que alcanzan profundidades de taladro de 1 m.
- Equipos de soldadura varios: Safex C-3, C-2, TIG, CT-300, plasma, AGA-GAS, SAF-MIG-355, TIG A MATIC, etc.
- Posicionadores de hasta 250 t, tipos Teledyne y Bode, con giro y volteo regulables.

Las instalaciones auxiliares las componen los edificios de granallado, bunker de radiografías con acelerador lineal, edificio tratamientos térmicos para partes de hasta diecisiete metros de longitud, foso de 12 m de profundidad para pruebas hidráulicas, taller mecánico con tornos y fresas de control numérico y otras máquinas auxiliares. Desde el punto de vista de recursos humanos, ENSA fue diseñada con una

El presente trabajo ha sido elaborado por Joaquín CAYON y Manuel GONZALEZ SAN JOSE, Ingenieros de Proyecto de Generadores de Vapor, y por Eduardo GONZALEZ MESONES, Jefe de la División de Ingeniería, y Angel PALMERO, Jefe de la División de Tecnología, todos pertenecientes a ENSA.

organización que potenciaba con especial énfasis las capacidades de Ingeniería y Garantía de Calidad, tratando de garantizar el cumplimiento de los requisitos de los Clientes y las Normas/Códigos aplicables. Junto a esto, la existencia de un Laboratorio de Soldadura, Metrología, Metalografía, Químico y Ensayos No Destructivos completaban la organización necesaria para afrontar la fabricación de los componentes nucleares.

## CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS GENERADORES DE VAPOR

Dentro de los componentes ya mencionados, consideramos al Generador de Vapor como el equipo en el que se aplican la mayor diversidad de técnicas de

fabricación en la construcción de estos productos. Iniciaremos este apartado señalando los diferentes generadores fabricados, total o parcialmente, en la planta de ENSA:

- Tres modelos E:2 tipo Westinghouse para la CN Sayago.
- Tres modelos F tipo Westinghouse para la CN Vandellós.
- Un modelo D tipo Westinghouse para la CN Lemóniz.
- Seis modelos 54GT KWU (con precalentadores) para la CN Trillo.
- Cuatro tipo KWU para proyecto KONVOI (sin precalentadores), y
- Tres con precalentadores para la India.

En la tabla I señalamos las principales características de estos generadores,

indicando los diferentes procesos de fabricación empleados en cada uno de ellos.

## PROCESOS ESPECIALES

Para realizar la fabricación de los GV referenciados, ENSA ha desarrollado y cualificado diversos procedimientos, de los que destacaremos los más significativos:

- Cualificación de procedimientos de soldadura automática SAW de soldadura a tope.
- Cualificación de procedimientos de plaqueado automático SAW con banda austenítica.
- Cualificación de procedimientos de soldadura tubo-placa
  - TIG automático pulsante con aporte de hilo de inconel.

**T I**  
**Principales características de los Generadores de Vapor**

| CARACTER./DESTINO         | TRILLO-I/II                                              | KONVOI (1)                           | INDIA                                | CN SAYAGO (2)                           | CN VANDELLOS                            |
|---------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| DISEÑADOR TIPO            | KWU<br>VERT-HAZ<br>TUBUL. EN U                           | KWU<br>VERT-HAZ<br>TUBUL. EN U       | NPC<br>VERT-HAZ<br>TUBUL. EN U       | WESTINGHOUSE<br>VERT-HAZ<br>TUBUL. EN U | WESTINGHOUSE<br>VERT-HAZ<br>TUBUL. EN U |
| POTENCIA                  | 1.009 MW                                                 | 1.300 MW                             | 235 MW                               | 900 MW                                  | 900 MW                                  |
| N.º DE LAZOS              | 3                                                        | 4                                    | 4                                    | 3                                       | 3                                       |
| PRESION/TEMP. DISEÑO      |                                                          |                                      |                                      |                                         |                                         |
| - PRIMARIO                | 178,5 kg/cm <sup>2</sup><br>350 °C                       | -                                    | 112 kg/cm <sup>2</sup><br>316 °C     | 174 kg/cm <sup>2</sup><br>343 °C        | 174 kg/cm <sup>2</sup><br>343 °C        |
| - SECUNDARIO              | 89 kg/cm <sup>2</sup><br>350 °C                          | -                                    | 50 kg/cm <sup>2</sup><br>316 °C      | 90 kg/cm <sup>2</sup><br>316 °C         | 83 kg/cm <sup>2</sup><br>316 °C         |
| PESO                      | 440 t                                                    | -                                    | 105 t                                | 413 t                                   | 313 t                                   |
| LONGITUD TOTAL            | 21.500 mm                                                | 5.540 mm                             | 20.000 mm                            | 22.000 mm                               | 20.600 mm                               |
| DIAM. PARTE SUPERIOR      | 4.610 mm                                                 | -                                    | 2.604 mm                             | 5.040 mm                                | 4.476 mm                                |
| DIAM. PARTE INFERIOR      | 3.700 mm                                                 | 3.667 mm                             | 1.840 mm                             | 3.768 mm                                | 3.454 mm                                |
| ESPEJOR MAX. PARED        | 135 mm                                                   | 155 mm                               | 80 mm                                | 114 mm                                  | 130 mm                                  |
| ESPEJOR PLACA TUBU.       | 700 mm                                                   | 700 mm                               | 400 mm                               | -                                       | 534 mm                                  |
| N.º DE TUBOS EN U         | 4.086                                                    | -                                    | 1.830                                | -                                       | 5.626                                   |
| DIMENSIONES TUBOS         | ø22 x 1,2                                                | -                                    | ø16 x 1                              | -                                       | ø17,32 x 0,91                           |
| PRECALENTADOR             | SI                                                       | NO                                   | SI                                   | SI                                      | NO                                      |
| ENTRADA AGUA ALIM.        | NIVEL INF + SUP.<br>(AUX. & EMERG.)                      | NIVEL SUP.                           | NIVEL INF.                           | NIVEL INF.                              | NIVEL SUP.                              |
| <b>MATERIALES:</b>        |                                                          |                                      |                                      |                                         |                                         |
| VIROLAS                   | 20MnMoNi55<br>(Laminado)                                 | 20MnMoNi55                           | 20MnMoNi55 (Forjado)                 | SA-533Gr.A<br>Cl.2                      | SA-533Gr.A Cl.2                         |
| FONDO SUPERIOR            | 20MnMoNi55 (Conformado)                                  | -                                    | 20MnMoNi55 (Forjado)                 | SA-533Gr.B                              | SA-533Gr.A Cl.2                         |
| FONDO INFERIOR            | 20MnMoNi55 (Conformado)                                  | -                                    | 20MnMoNi55 (Forjado)                 | SA-533Gr.B                              | SA-216Gr.wcc (Fund.)                    |
| PLACA TUBOS               | 20MnMoNi55 (Forjada)                                     | 20MnMoNi55 (Forjado)                 | 20MnMoNi55 (Forjado)                 | -                                       | SA-508 Cl.2a (Forj.)                    |
| TOBERAS                   | 20MnMoNi55                                               | 20MnMoNi55 (Forjado)                 | 20MnMoNi55 (Forjado)                 | SA-508 CL.2a                            | SA-508 Cl.2a (Forj.)                    |
| HAZ TUBULAR               | INCOLOY 800                                              | -                                    | INCOLOY 800                          | -                                       | SA-163                                  |
| PLACAS SPTE. HAZ TUBOS    | 1.4541 (DIN 17440)                                       | -                                    | 1.4550                               | -                                       | SA-240 Tp304                            |
| <b>PROCESOS:</b>          |                                                          |                                      |                                      |                                         |                                         |
| PLAQUEADO FONDO           | SAW Banda + SMAW<br>Inoxid. Austenítico                  | -                                    | SAW-Banda inc.                       | SAW-Banda aus.                          | SAW-Banda aus.                          |
| PLAQUEADO PLACA TUBULAR.  | SAW Banda + SMAW                                         | SAW - Ban + SMAW<br>con inconel 600  | SAW-Banda inc.<br>con inconel 600    | -                                       | MIG-Hilo inc.                           |
| SOLDADURA TUBO A PL.      | TIG pulsado aut.<br>(con aportac. de hilo)               | -                                    | TIG-HILO INC.                        | TIG sin hilo                            | TIG sin hilo                            |
| EXPANSIONADO HAZ          | 2 zonas (primario y secundario)<br>Mecánico paso peregr. | -                                    | Mecán.-Hidrául.                      | Hidráulico                              | Hidráulico                              |
| <b>ENSAYOS Y PRUEBAS:</b> |                                                          |                                      |                                      |                                         |                                         |
| END SUPERFICIALES         | Líquidos penetr./<br>Partic. magnét.                     | Líquidos penetr./<br>Partic. magnét. | Líquidos penetr./<br>Partic. magnét. | Líquidos penetr./<br>Partic. magnét.    | Líquidos penetr./<br>Partic. magnét.    |
| END VOLUMETRICOS          | Ultrasonidos<br>Radiográf.                               | Ultrasonidos<br>Radiográf.           | Ultrasonidos<br>Radiográf.           | Ultrasonidos<br>Radiográf.              | Ultrasonidos<br>Radiográf.              |
| PRUEBA HIDROSTATICA       |                                                          |                                      |                                      |                                         |                                         |
| Primario                  | 233 kg/cm <sup>2</sup>                                   | -                                    | 146 kg/cm <sup>2</sup>               | 217 kg/cm <sup>2</sup>                  | 217 kg/cm <sup>2</sup>                  |
| Secundario                | 116,7 kg/cm <sup>2</sup>                                 | -                                    | 65 kg/cm <sup>2</sup>                | 112 kg/cm <sup>2</sup>                  | 103 kg/cm <sup>2</sup>                  |
| PRUEBA HELIO              | SI (Máx. fuga permit.<br>1 x 10 - 7 std.cc/sec.)         | -                                    | SI                                   | SI                                      | SI                                      |
| MEDICION. EXTENS.         | NO                                                       | -                                    | SI                                   | NO                                      | NO                                      |

**Notas:** (1) ENSA fabricó únicamente el subconjunto correspondiente a la placa tubular y virola superior, incluyendo taladrado profundo.

(2) La parte intermedia del Generador de Vapor no fue fabricada por ENSA.

- TIG automático sin aporte de hilo.
- Cualificación procedimiento plaqueado placa-tubos
  - Plaqueado automático SAW con banda de inconel en placa tubular.
  - Plaqueado automático MIG oscilante con hilo de inconel en placa tubular.
- Cualificación procedimientos expansionado de haz tubular
  - Expansionado mecánico (paso peregrino).
  - Expansionado mecánico-hidráulico.
  - Expansionado hidráulico (pulso de presión).
- Cualificación procedimiento de taladrado profundo (hasta 700 mm) en placas tubulares.
- Cualificación de procedimiento de taladrado de paquetes de placas soporte de tubos.
- Desarrollo de procedimientos de pruebas de estanqueidad
  - Pruebas de Helio.
  - Prueba de Burbujas.
  - Prueba Hidrostática.

- Procedimientos y desarrollo de equipos de medición por medio de galgas extensiométricas.
- Procedimiento y cualificación de ensayos no destructivos.

Los procedimientos empleados en la fabricación del subconjunto de la parte intermedia del generador son los más críticos, por lo que describimos alguno de ellos con mayor detalle.

Las operaciones que se comentan se realizan en un área especialmente preparada denominada "Área Limpia", en la cual las condiciones de limpieza y control se extreman:

## MONTAJE Y ALINEACION DEL PAQUETE DE DIAFRAGMAS

La formación y montaje en el generador del paquete de diafragmas es una fase de fabricación compleja y delicada por la trascendencia que un perfecto alineamiento de los diafragmas tiene en la operación de entubado y posteriormente en la vida del generador. Dentro de esta fase, es parte fundamental el taladrado de los diafragmas, operación que exige una perfecta puesta a punto del equipo de taladrado y un profundo conocimiento de comportamiento del material de los diafragmas.

Con este propósito, ENSA ha realizado numerosas experiencias para conocer las deformaciones inducidas en el curso del taladrado y hacer las correcciones necesarias para que, al final del mismo, los más de 4.000 agujeros (en placas de diámetro de  $\div 3.000$  mm), cumplan con las restrictivas tolerancias exigidas (tolerancias del orden de 0,15 mm en diámetro de agujero, de 0,2 mm en posición, rugosidades, etc.).

La mejora de métodos, consecuencia de la experiencia adquirida, ha permitido en los últimos trabajos efectuar taladros de paquetes de hasta nueve diafragmas con un mínimo índice de desviaciones en los requisitos de plano.

El esfuerzo realizado en el perfeccionamiento de la operación de taladrado se ha completado con el desarrollo de un procedimiento de ensamblaje de los diafragmas y posterior montaje en el generador que hace uso de, además de otros dispositivos, telescopios de microalineamiento óptico, que suministran datos de precisión, que introducidos en un programa de ordenador, nos dan la información necesaria para realizar el desplazamiento relativo de cada diafragma para optimizar el alineamiento.

Lo anteriormente expuesto, así como un minucioso control dimensional durante el proceso de montaje del resto de la estructura soporte del haz tubular: parrillas, tirantes, tubos distanciadores, garantizan un entubado adecuado.

## SOLDADURA TUBOS A PLACA-TUBOS

La experiencia muestra que la conexión de tubos a la placa tubular es el punto más crítico de un intercambiador de calor, ya que su fiabilidad depende de miles de uniones idénticas, cada una de las cuales ha de garantizar una total integridad. De hecho, se exige una ausencia total de indicaciones al examinar por líquidos penetrantes, unos límites de fuga global de helio de la placa tubular del orden de  $1 \times 10^{-6}$  std.cc/sec. y un máximo de  $1 \times 10^{-7}$  std.cc/sec. de fuga para cada conexión individual.

Para conseguir estos límites de calidad, ENSA ha cualificado distintos procedimientos de soldadura de tubo a placa, así como procedimientos de expansionado de los tubos en la placa tubular que se han indicado en la tabla I. Igualmente, se han cualificado los equipos de expansionado y operarios, y cualquier variación del equipo de soldar o expansionar ha exigido una nueva cualificación.

De la importancia de las conexiones tubo a placa tubular, nos da idea el dato de que, además de las cualificaciones que acabamos de describir, se realiza un seguimiento exhaustivo, turno a turno, de las operaciones de soldadura y expansionado en cada componente. En paralelo a los trabajos sobre el generador se realizan, al comienzo de cada turno, cupones que simulan exactamente las condiciones reales de la placa tubular y todas las demás variables involucradas. Estos cupones simulados son ensayados diariamente

para comprobar que la calidad obtenida durante la fase de cualificación se mantiene a lo largo de todo el proceso real en los generadores de vapor.

## JUSTIFICACION DEL DISEÑO

Hasta la fecha, ENSA solamente ha desarrollado los cálculos que a continuación se describen para componentes distintos del generador, pero hemos creído oportuno completar el presente artículo con la justificación del diseño que normalmente realizamos durante la fabricación de los demás componentes.

El proyecto mecánico de un generador de vapor nuclear está basado en el concepto de la justificación del diseño por análisis. Este concepto está incluido en las normas o códigos de diseño, tanto americanos (Código ASME) como alemanes (normas KTA). De acuerdo con esta filosofía de diseño, el proyecto de un generador de vapor se realiza en las siguientes fases:

- Establecimiento de las condiciones de diseño y operación.
- Selección de los materiales.
- Justificación por análisis del diseño.
- Preparación de la documentación necesaria para la construcción, ensayo y operación del generador de vapor.

La secuencia completa puede ilustrarse por medio del diagrama de la figura 1.

ENSA, como fabricante de componentes, tiene, cuando el cliente lo solicite, la responsabilidad de comprobar el diseño mecánico inicialmente desarrollado por el tecnólogo, aplicando las técnicas y normas existentes en el momento del pedido. Las fases más generales que describen la justificación por análisis de diseño comprenden:

- Modelización del generador de vapor.
- Aplicación de cargas y condiciones de contorno.
- Obtención de resultados en forma de tensiones y deformaciones.
- Evaluación de los resultados según una norma o código de diseño.

Los tipos de análisis para la justificación del diseño de un generador de vapor consisten normalmente en los siguientes:

- Dimensionamiento básico.  
En esta fase del diseño se determinan las dimensiones fundamentales del generador de vapor, teniendo en cuenta solamente la presión y temperatura de diseño.
- Análisis estructural.  
En estos cálculos se determinan las tensiones primarias de las partes más solicitadas del generador de vapor, y se comparan con los límites correspondientes en los códigos de diseño.

- **Análisis térmico.**  
Se determinan los gradientes térmicos producidos en la pared del generador de vapor y en las zonas de discontinuidad a causa de las variaciones de la temperatura de los fluidos primario y secundario, como consecuencia de las diferentes condiciones de operación de la central.
- **Análisis detallado y evaluación de fatiga.**  
Se determinan las tensiones primarias y secundarias originadas por la presión interna, gradientes térmicos y cargas mecánicas externas que se aplican en las diferentes condiciones de operación. Estas tensiones se comparan con los límites que vienen indicados en los códigos de diseño. Finalmente se realiza una evaluación de fatiga en los puntos más críticos del generador de vapor, teniendo en cuenta toda la historia que se postula va a ocurrir durante la vida de la central nuclear.

- **Análisis especiales**  
Otros tipos de análisis tienen en cuenta el comportamiento frágil de los materiales, realizándose una evaluación de la protección que existe frente a la rotura frágil. Además es necesario realizar cálculos dinámicos para determinar las vibraciones inducidas por el movimiento del agua a través del haz de tubos, así como el análisis de los efectos sísmicos sobre el generador de vapor.

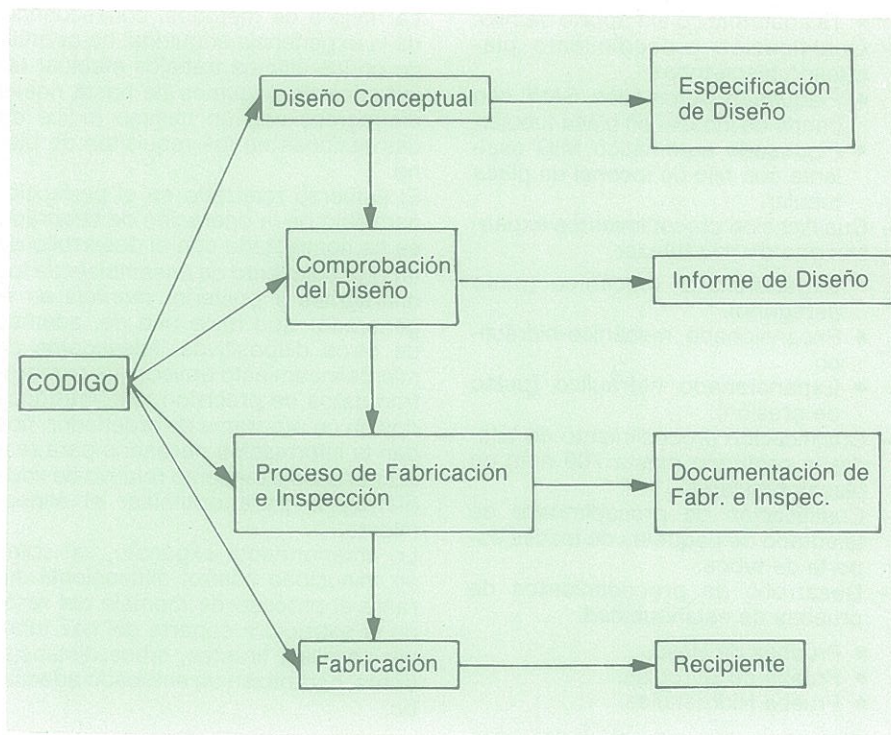
En la figura II se especifican los análisis que se realizan en el proyecto mecánico, los datos de diseño, los métodos analíticos utilizados y, finalmente, los criterios de fallo, frente a los cuales los análisis demuestran que existe un margen de seguridad suficiente para el funcionamiento seguro y fiable del generador de vapor, durante la vida prevista de la central nuclear.

Como ya se ha indicado anteriormente, todos los análisis que se han detallado se refieren al proyecto mecánico del generador de vapor, en tanto que el diseño termohidráulico es responsabilidad del suministrador del sistema nuclear.

## COMENTARIOS FINALES

No debe terminarse este artículo sin aportar algunos comentarios de forma general resuman las experiencias obtenidas con estos fabricados. La primera enseñanza es la enorme importancia que tiene la repetición de estos productos en la obtención de mejores productividades y, en consecuencia, la reducción de los plazos de fabricación. Se han comprobado con verdadera satisfacción las importantes ven-

(Pasa a última pág.)



**F I** Diseño y Fabricación de un generador de vapor

**F II** Justificación por Análisis

