

LA INGENIERIA DEL PROYECTO EN LA CN TRILLO I

CN TRILLO I

F. NEBRERA GARCIA y A. GONZALEZ LOPEZ



Juan Francisco NEBRERA GARCIA es Ingeniero Industrial por la ETSII de Madrid. En la actualidad es Director de Proyecto de la Central Nuclear de Trillo en Empresarios Agrupados, organización en la que ha desempeñado puestos de distinta responsabilidad en ingeniería y supervisión de construcción. Es miembro de la SNE.



Antonio GONZALEZ LOPEZ es Ingeniero Industrial por la ETSII de Madrid y diplomado en Ingeniería Nuclear por el INSTN de Saclay (Francia).

En la actualidad es Director Técnico en Empresarios Agrupados, organización en la que ha desempeñado puestos de distinta responsabilidad en la ingeniería y diseño de proyectos nucleares. Es miembro de la SNE.

El modelo organizativo adoptado para la ejecución del proyecto de la CN TRILLO I ha sido el correspondiente a un «contrato por componentes» bajo gestión directa de la propiedad. Con esta fórmula, la Organización Propietaria de CN TRILLO I, es el órgano gestor con responsabilidad global sobre el conjunto del proyecto. Dicha Organización Propietaria, sujeta a la supervisión dictada por la Administración pública, el Consejo de Seguridad Nuclear y cumpliendo con la normativa aplicable, estableció en su día contratos directos con el Suministrador Principal (Kraftwerk Union-KWU), con la Empresa de Ingeniería (Empresarios Agrupados), con los Suministradores de equipo y con los Contratistas civiles y de montaje.

El suministro principal, responsabilidad de KWU, incluye el sistema nuclear de generación de vapor (NSSS), el grupo turbo-generador (T-G) y la primera carga de combustible. Asimismo, es responsabilidad de KWU el suministro de la instrumentación y control de todos los sistemas de la central, tanto del NSSS como del BOP, aunque este suministro fue establecido por contrato separado del principal. Por último, y al ser CN TRILLO I la primera central nuclear de tecnología alemana construida en España, KWU ha sido responsable del suministro de cierta información de referencia para su uso por la Ingeniería en el diseño básico de la central.

Empresarios Agrupados, como Empresa de Ingeniería para el proyecto, es responsable ante la Organización Propietaria de la gestión del proyecto, ingeniería básica del BOP, diseño de detalle del NSSS y BOP, gestión de suministros (compras, activación e inspección de fabricantes) para equipos del BOP, supervisión de construcción y participación en pruebas y puesta en marcha de la instalación.

El proyecto de CN TRILLO I constituye, desde diversos puntos de vista, un hito en la historia de las centrales nucleares en nuestro país. Por primera vez, la ingeniería española se ha enfrentado en solitario con un proyecto nuclear singular, tanto en sus características técnicas como en su organización. Se trata, sin duda, de un éxito de la técnica española que gracias a una conjunción de esfuerzos, a una decidida colaboración del suministrador principal y, sobre todo, a la resuelta actitud de respaldo recibida de la Organización Propietaria, establece definitivamente la total capacitación española para el desarrollo de la ingeniería de proyectos nucleares.

En este artículo se describen algunas de las características técnicas diferenciales más destacadas de este proyecto, que podrían ser de interés en su comparación con otras centrales tipo PWR. También se exponen algunas técnicas de gestión y de desarrollo de la ingeniería aplicadas por Empresarios Agrupados en la ejecución del proyecto.

PRINCIPALES CARACTERISTICAS DIFERENCIALES DEL PROYECTO

El hecho de ser CN TRILLO I la primera central nuclear con tecnología alemana construida en España implica una filosofía de proyecto distinta de la habitual utilizada en otras centrales españolas, construidas con tecnología americana. En el proyecto de CN TRILLO I se ha establecido como objetivo desarrollar un diseño que fuese licenciable en Alemania y que, a la vez, cumpliera con los requisitos adicionales o específicos impuestos por el Consejo de Seguridad Nuclear para su licencia en España.

Describiremos a continuación algunas de las implicaciones prácticas más relevantes que la aplicación de un concepto de central esencialmente alemán ha tenido en el desarrollo del proyecto.

Códigos, normas, requisitos reguladores y procesos de licencia

El proceso de licencia en España, con sus dos etapas principales –permiso de construcción y permiso de operación–, a los que van asociados los correspondientes Informes de Seguridad Preliminar y Final, respectivamente, ha obligado a disponer en un momento dado, para la elaboración de dichos informes, de información técnica, documentos de proyecto, análisis, etc., cuya elaboración en Alemania se extiende a lo largo del desarrollo del proyecto, debido al proceso de licencia en varias etapas que allí se sigue, sometiéndose informes parciales para cada una de estas etapas.

La aplicación de códigos, normas y requisitos reguladores alemanes en el proyecto, ha exigido un esfuerzo de asimilación de una normativa distinta de la habitualmente utilizada en España en proyectos anteriores, que eran de origen americano. En CN TRILLO I, este proceso ha sido especialmente complejo, debido a que una buena parte del desarrollo del proyecto coincidió con un período de publicación muy intensa de códigos y normas nucleares en Alemania.

Al hablar de la normativa aplicable, es interesante hacer referencia al hecho de que en Alemania no existe un código de construcción de componentes nucleares similar al código ASME, Sección III, que recopile en un solo documento los requisitos de construcción de componentes mecánicos nucleares. En su lugar se utilizan las denominadas «especificaciones-código» elaboradas por el suministrador principal (KWU) y aprobadas por el TÜV específicamente para cada proyecto. En su contenido, las «especificaciones-código» son similares al código ASME, existiendo una de ellas para cada tipo genérico de componentes (recipientes a presión y depósitos de almacenamiento, tuberías, válvulas, bombas).

A partir de estas «especificaciones-código», la Ingeniería ha desarrollado multitud de especificaciones, una para cada componente en particular o grupo de componentes homogéneos, cuya elaboración es notablemente más compleja que en los proyectos americanos. Al no existir un código conocido por los fabricantes al que hacer referencia, similar al ASME, todos y cada uno de los requisitos de diseño, materiales, fabricación, pruebas, etc., han de ser incluidos en la especificación, extraídos convenientemente de la «especificación-código» genérica correspondiente y adaptados al equipo en concreto que se especifica.

Documentación de las interfases con el Suministrador Principal

Como se ha dicho, la organización del proyecto supuso para KWU un sistema de «contrato por componentes» bajo gestión directa de la propiedad, diferente de los proyectos «llave en mano» mayoritariamente utilizados por KWU en sus contratos con las empresas eléctricas en Alemania.

Esta situación ha obligado en las fases iniciales del proyecto a un intenso y prolongado esfuerzo de coordinación entre KWU y la Ingeniería para reconvertir un sistema de documentación del NSSS desarrollado por KWU para uso esencialmente interno en sus proyectos «llave en mano» en Alemania, a otro sistema documental que facilitase los intercambios de información técnica y la definición de interfases de todo tipo entre el Suministrador Principal, responsable del suministro del NSSS y del TG, y la Ingeniería, responsables del diseño de la planta.

El diseño de la central

El diseño de la central ha sido fiel a su origen alemán, al mantenerse una implantación de los edificios y una disposición general de cada uno de ellos esencialmente iguales a la típicamente utilizada por KWU en las centrales alemanas de concepción más moderna, cuyo diseño de planta destaca por las siguientes características técnicas:

- Disposición radial del turbo-generator con respecto al edificio del reactor.



Detalle de muelles de soportado del turbo-generator.

- Utilización de edificios con funciones especializadas, separados entre sí y unidos por galerías subterráneas accesibles. Es decir, un diseño nada compacto, muy descentralizado y «amplio», que facilita el desarrollo del proyecto, la construcción y el montaje en paralelo de varios edificios, y un avance en las pruebas preoperacionales de sistemas por edificios completos en los que están albergados.
- Disposición general de los edificios con una notable segregación física entre sistemas de seguridad redundantes, lo que facilita el desarrollo del diseño y simplifica los estudios de riesgos y daños.
- Disposición de equipos dentro de los edificios desarrollada con gran racionalidad para minimizar las dosis de exposición del personal de operación y facilitar de una manera muy notable la accesibilidad y el mantenimiento de equipos.
- Otro ejemplo de fidelidad a su origen alemán es el diseño de la contención, constituida por una esfera metálica autoportante que se alberga y es protegida por el muro exterior del edificio del reactor. En CN TRILLO I se incorporaron al proyecto los requisitos establecidos por las autoridades alemanas (Instrucción VdTÜV, número 18) para centrales construidas a partir de finales de 1976, en cuanto a diseño, materiales e inspección de estructuras de contención, de tal forma que el proyecto dispone hoy en día de una contención que utiliza chapas de acero tipo 15-MnNi-63 conformadas en caliente, de alta resistencia y muy bajo nivel de tensiones en las condiciones de diseño.
- La piscina de almacenamiento de combustible gastado está ubicada dentro de la contención, con lo cual todas las operaciones de recarga se llevan a cabo en su interior. De esta manera se acortan los tiempos de recarga y se proporciona una mayor se-

guridad en las operaciones de manejo de combustible que se realizan siempre dentro de una contención cerrada. La compartimentación interior de la contención y el diseño de su sistema de ventilación permiten un acceso sin restricción durante la operación normal de la central.

Casos de carga para el diseño de componentes

Una característica interesante del proyecto es el desacoplamiento entre el LOCA y el terremoto de seguridad (SE) —análogo al terremoto de parada sin riesgo, SSE, en la terminología de origen americano—, los cuales no se consideran sucesos simultáneos según la normativa alemana. En consecuencia, en el diseño de componentes no es preciso aplicar la combinación de cargas correspondiente a LOCA + SE. Evidentemente, la aplicación de este criterio alemán implica el cumplimiento con innumerables requisitos adicionales sobre materiales, configuración geométrica de componentes, bajo nivel de tensiones admisibles para cargas de SE (condición de planta de emergencia y límite de servicio C), sistemas de detección de fugas, etc.

Por el contrario, en el proyecto se postula la rotura de ciertos recipientes a presión (por ejemplo: separadores de humedad, calentadores de alta presión y tanque de almacenamiento de agua de alimentación), localizados fundamentalmente en el edificio de turbina, no siempre considerada en otros proyectos. La onda de presión derivada de la postulación de estas roturas, origina una carga transitoria de carácter dinámico que es necesario considerar en el diseño de estructuras y componentes relacionados con la seguridad, conjuntamente con el terremoto de seguridad, SE, dando lugar a la combinación de cargas SE + PW para el cálculo de estos elementos, que se considera también con-

dición de planta de emergencia, estableciéndose el límite de servicio C en cuanto a tensiones admisibles.

Sistemas de seguridad.

Los requisitos de la normativa alemana para sistemas de seguridad tienen una gran influencia en la configuración de la central, el diseño de la planta y el desarrollo del proyecto. Veamos algunas de sus características principales:

- Utilización de cuatro redundancias (trenes) en los sistemas de seguridad, siguiendo el criterio «n + 2» típicamente alemán, que requiere la existencia de dos redundancias adicionales a las que son necesarias para controlar un accidente. Ello es debido a la necesidad de postular el criterio de fallo simple en una redundancia suponiendo, además, que en ese momento se está llevando a cabo mantenimiento o reparación en otra redundancia.
- La postulación de un fallo único adicional al accidente en los sistemas de seguridad, a diferencia de la filosofía americana, puede afectar tanto a componentes activos como a componentes pasivos.
- Disposición de los sistemas y equipos de seguridad en la central con una altísima segregación física, asignándose a cada redundancia (tren) una zona del edificio que nada más está ocupada por ella, evitándose de esta manera los fallos de modo común que afecten a más de una redundancia y facilitando notablemente el mantenimiento y pruebas de cada una de ellas durante operación normal de la central.
- Existe una alta diversidad en los sistemas de seguridad para responder a los accidentes postulados. Dentro de los sistemas de seguridad se diferencia el sistema de emergencia que se ocupa fundamentalmente de dar respuesta a accidentes externos (terremotos, explosiones, sabotaje, etc.) ubicado en un bunker y con cuatro generadores diesel de emergencia propios (uno por cada redundancia) y, por otro lado, los

sistemas de salvaguardia propiamente dichos, diseñados para controlar los accidentes internos postulados (por ejemplo, LOCA), y que dispone de otra alimentación eléctrica mediante otros cuatro generadores diesel de salvaguardia (también uno por cada redundancia), independientes de los anteriores.

- El diseño de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo, con un alto caudal de inyección de agua fría en caso de accidente con pérdida de refrigerante, hace innecesaria la instalación de un sistema de aspersión de la contención, como es habitual en las centrales PWR de origen americano.
- A diferencia de otras centrales PWR españolas, donde estos equipos suelen localizarse a la intemperie, en CN TRILLO I tanto los depósitos de almacenamiento de agua de alimentación de emergencia, que están ubicados en el interior del edificio del mismo nombre (bunker), como los cuatro pares de tanques de agua borada para la fase de inyección de seguridad en caso de LOCA, que se hayan localizados en el anillo dentro del edificio del reactor, están protegidos por estructuras de hormigón contra posibles accidentes externos.

El concepto de seguridad básica

Un hito a destacar en CN TRILLO I fue la incorporación al proyecto, en un momento en que la ingeniería básica estaba muy avanzada, del concepto de seguridad básica, resultado de la publicación en Alemania de las Guías de la Comisión de Seguridad de Reactores (RSK), en su edición del año 1979. La aplicación de la seguridad básica supuso un cambio fundamental en el proyecto al hacer más estrictos los criterios de diseño, la selección de materiales cuya utilización estaba autorizada y los niveles de inspección que aplicaban a ciertas estructuras, sistemas y componentes que fundamentalmente tienen relación con el mantenimiento de la contención, los sis-

temas de seguridad y la cadena de extracción de calor residual.

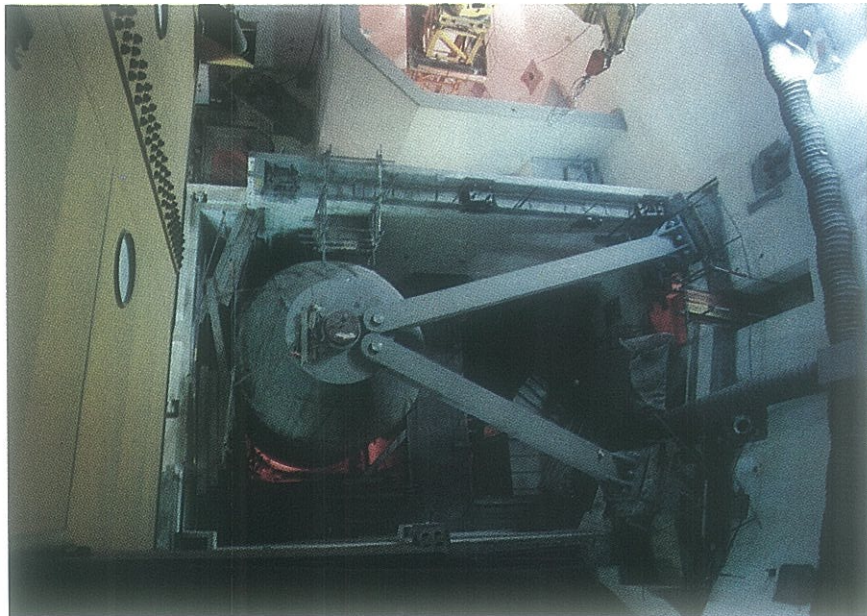
El objetivo de la seguridad básica es conseguir la «seguridad intrínseca» en la construcción de los componentes mediante una aplicación equilibrada y consistente de tres tipos de requisitos:

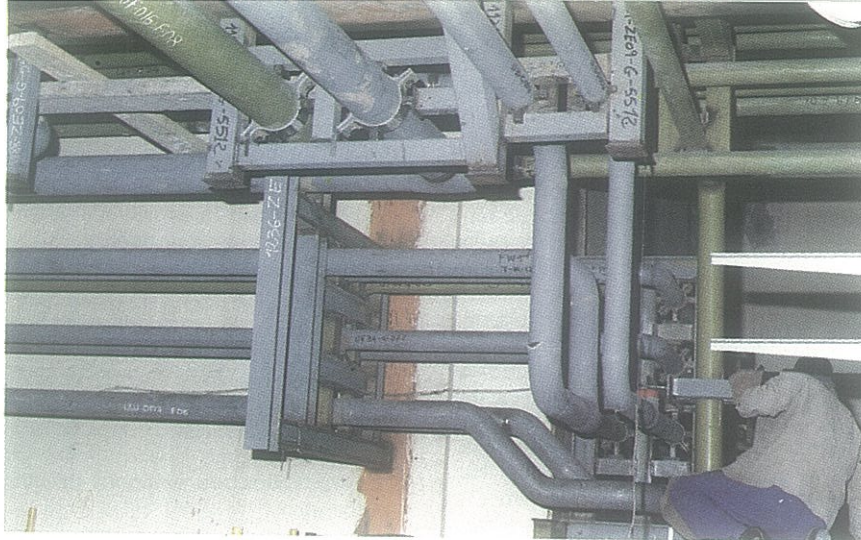
- *De diseño:* Bajos niveles de tensión admisibles en el diseño de componentes y utilización de configuraciones especiales que disminuyan la concentración de esfuerzos y mejoren el comportamiento bajo fatiga. Preferencia por el empleo de ciertos tipos de productos, tales como forjas, tuberías sin costura, codos con extremos prolongados, etc.
- *De los materiales:* Unicamente podrán utilizarse ciertos tipos de materiales con unos requisitos de composición química, proceso de elaboración y características mecánicas muy elevados.
- *De inspección y pruebas:* Se impone un control muy estricto del proceso de fabricación, exámenes, inspecciones y pruebas de componentes clasificados como de seguridad básica.

Diseño de tuberías

Reseñamos a continuación algunas características interesantes del diseño de los sistemas de tuberías:

- Utilización de gran número de estructuras de soportado múltiple para tuberías, resultado de un proceso de optimización de su trazado y soportado. El número de dichas estructuras múltiples se espera que llegue a 5.000, incluyendo tanto tubería de diámetro grande como pequeño.
- Amplio uso de tubería doblada y soldada a tope en diámetros pequeños, menores de 80 mm. Por ejemplo, toda la tubería de clase nuclear menor de 80 mm de diámetro va soldada a tope en lugar de a enchufe, como es la práctica en otros proyectos.
- Es de destacar el uso mínimo de amortiguadores para absorber cargas dinámicas en sistemas de tuberías, cuyo número estimado al final del proyecto no superará las 80 unidades. A este reducido uso de amortiguadores se ha llegado mediante un proceso de análisis de tubería muy sofisticado que ha permitido hacer máximo el uso de soportes rígidos para absorber cargas dinámicas. Además de la indudable ventaja económica, la disminución de amortiguadores supondrá una reducción en la futura inspección en servicio.
- Elevada utilización de perfiles cerrados (tubulares) para la construcción de soportes de tuberías con la consiguiente reducción de volumen, mayor capacidad de carga y rigidez en cada soporte. Como referencia, y para el caso de tubería de diámetro grande (igual o mayor de 80 mm), el número de soportes estructurales que utilizan perfil cerrado es del 62 %, aproximadamente.





Soporte múltiple de tuberías.

- En la fabricación de tubería se está haciendo una amplia utilización de máquinas de soldadura automática, tanto en taller como en el emplazamiento, lo que ha originado una mejora en la calidad y en la productividad de los trabajos de soldadura.
- Se ha utilizado un sistema de bandas de acero embebidas en hormigón para unión por soldadura de los soportes de tuberías, conductos y bandejas, buscando hacer mínimo el uso de placas con pernos de anclaje.
- Es de destacar, asimismo, la utilización



de piezas forjadas para la transmisión de grandes cargas axiales entre tuberías de diámetro grande y sus soportes. En el caso de tubería de pequeño diámetro ha sido de gran utilidad el empleo de crucetas forjadas («tes») con una o dos de las ramificaciones cerradas a las que va unida el soporte, para evitar el uso de anclajes soldados a la tubería (tacos) en la transmisión de dichas cargas axiales.

Materiales y procesos de fabricación

El gran énfasis que la tecnología alemana pone en la selección de materiales y en el establecimiento de sus propiedades, tales como composición química, soldabilidad, resiliencia, etc., ha obligado a Empresarios Agrupados a desarrollar importantes capacidades en ingeniería de materiales para trabajar con los suministradores de productos metálicos y hacer posible su acopio en España, buscando las homologaciones adecuadas y esforzándose para mantener el requerido nivel de participación local en este importante área del suministro.

El estricto control de los procesos de fabricación, inspección y pruebas de componentes propio de la normativa alemana, ha exigido a la Ingeniería un esfuerzo documental y de capacitación técnica de sus inspectores en talleres, sin precedentes en proyectos anteriores.

Por su significación, enumeraremos los siguientes ejemplos relevantes de selección de materiales realizada en el proyecto:

- Utilización generalizada de aceros inoxidables austeníticos estabilizados con niobio-culombio (DIN 1.4550, equivalente al Tipo 347 americano) o con titanio (DIN 1.4541, equivalente al Tipo 321 americano). Es decir, no se utilizan los equivalentes a los Tipos 304, 304L, 316 ó 316L, habitualmente empleados en proyectos de tecnología americana.
- Los tubos de los generadores de vapor son de Incoloy 800, en lugar del Inconel 600 normalmente empleado en los generadores de otras centrales PWR españolas.
- Los tubos del condensador principal, y los de los enfriadores de agua de refrigeración de componentes, son de titanio.
- Los tubos de los calentadores de baja presión son de acero inoxidable, mientras que los de los calentadores de alta presión son de acero al carbono aleado, 15-Mo-3.
- La tubería de vapor principal es de acero al carbono forjado.
- La tubería de vapor de extracciones de alta presión es de acero aleado 10-CrMo-910, para contrarrestar los efectos de erosión-corrosión del vapor húmedo que por ellas circula.

Automatización de los procesos de la central

La CN TRILLO I utiliza un sistema de control avanzado (técnica Inskamatic), según la tecnología desarrollada por

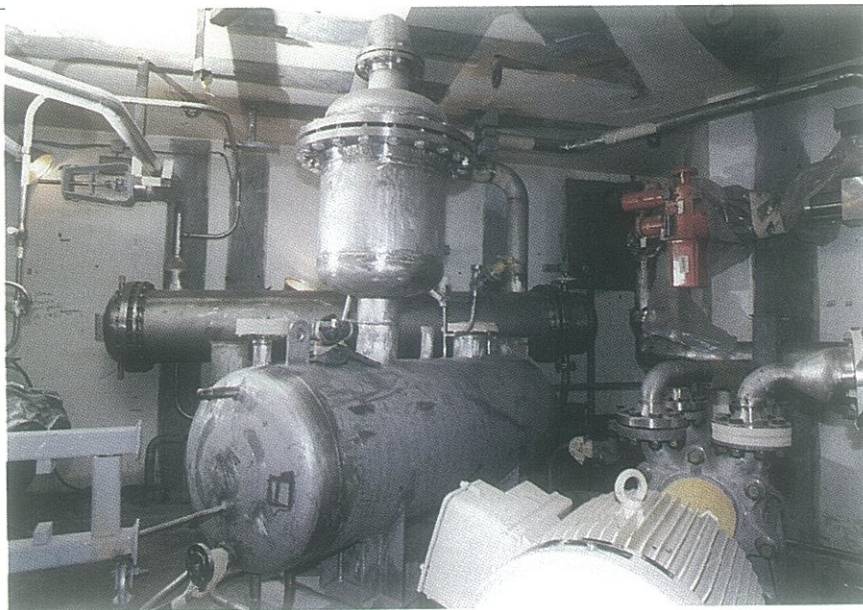
KWU para las centrales alemanas. Algunas de sus características importantes que han tenido una destacada influencia en el desarrollo de la ingeniería del proyecto son las siguientes:

- Total automatismo durante los 30 minutos subsiguientes a un accidente con completa asunción de funciones por el sistema de control sin actuación del operador.
- Un «Sistema de Limitaciones», intermedio entre la actuación de los sistemas normales de control de la central y la actuación del sistema de protección del reactor (RPS), que inicia acciones relacionadas con la seguridad antes de que alcancen los límites que requieran la actuación de dicho RPS. Este «Sistema de Limitaciones», propio de la tecnología alemana y que solo se encuentra en otras centrales PWR de diseño KWU, reduce el número de disparos con actuación del RPS, lo que contribuye positivamente a la disponibilidad de la central.
- Existe una diversidad en la detección de accidentes, de tal forma que para cada uno de ellos se cuenta, al menos, con dos mecanismos físicos diferentes de detección y actuación.

El sistema secundario

El diseño del sistema secundario presenta ciertas innovaciones respecto a anteriores proyectos PWR en nuestro país:

- Turbogenerador con un cuerpo de alta presión y tres de baja presión, girando a 3.000 r.p.m. en lugar de las 1.500 r.p.m. normalmente utilizadas por los suministradores americanos para turbinas nucleares que manejan vapor saturado. La turbina va provista de dos separadores de humedad con doble recalentamiento (MSR) instalados verticalmente, en lugar de la habitual posición horizontal encontrada en otras centrales de agua ligera de origen americano.
- Pedestal ligero de turbogenerador constituido por una mesa de hormigón armado apoyada en pilares de acero estructural. Tanto el turbogenerador como el condensador van soportados sobre un sistema de muelles.
- Interruptor de generación instalado en las barras de fase aislada entre la salida del generador y los tres transformadores principales monofásicos, que permite la alimentación de los sistemas auxiliares de la central desde la red de 400 kV sin interrupción en caso de disparo del grupo turbogenerador.
- Un condensador con tubos de titanio expandidos en doble placa tubular presurizada en su espacio interior con agua desmineralizada para conseguir estanqueidad. El cuello del condensador va soldado directamente al escape de la turbina de baja presión, sin necesidad de junta de expansión al estar ambos componentes apoyados sobre muelles.
- Utilización de un calentador - desaireador con tanque de almacenamien-

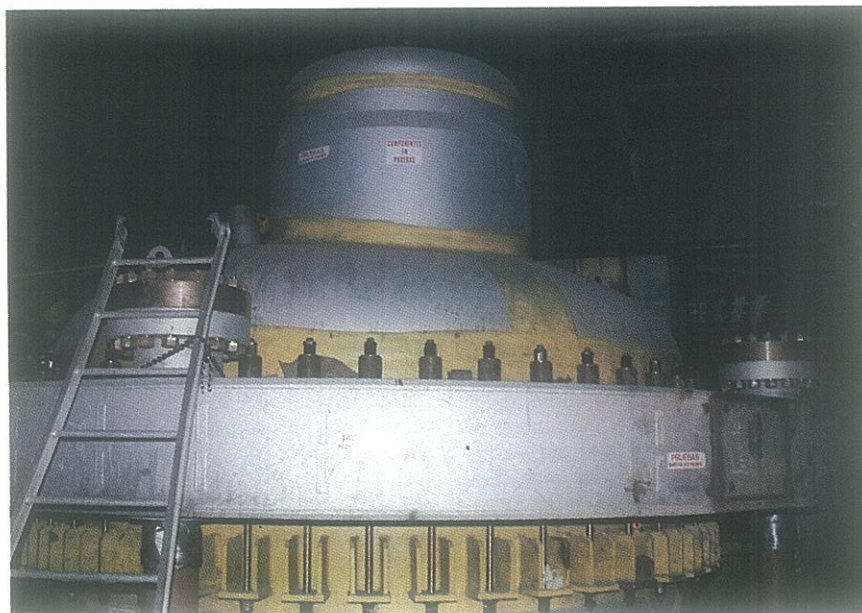


to de gran capacidad del que aspiran tres bombas de agua de alimentación de los generadores del 50 % de capacidad cada una, velocidad constante, y actuadas por motor eléctrico. La existencia de este tanque de almacenamiento de agua de alimentación, proporciona al sistema secundario una gran flexibilidad de operación y un excelente comportamiento en los transitorios operacionales.

- El sistema de agua de alimentación incluye también dos bombas de arranque y parada aspirando del tanque de almacenamiento y alimentadas eléctricamente desde los generadores diesel de salvaguardia. Esta disposición proporciona una gran fiabilidad al sistema secundario no sólo durante los períodos de arranque y parada de la central, sino también en caso de fallo del sistema principal de agua de alimentación, antes de hacerse necesaria la entrada en funcionamiento del sistema de agua de alimentación de emergen-

cia para enfriamiento de los generadores de vapor.

- Empleo de un diseño tipo «Duplex» para los calentadores A1 y A2 de baja presión, cuyos haces tubulares están provistos de una carcasa común instalada en el cuello del condensador.
- Utilización de calentadores de agua de alimentación de alta presión verticales, A4 y A5, provistos de enfriadores de drenajes separados del propio calentador, a diferencia de la solución integral generalmente utilizada en otros proyectos.
- Empleo de filtros mecánicos en el sistema de condensado y de filtros electromagnéticos para los drenajes de los recalentadores (MSR) antes de reincorporarlos por bombeo al flujo de agua de alimentación, todo ello con el fin de asegurar la eliminación de productos en suspensión y el mantenimiento de la química del agua, especialmente con los períodos de arranque de la central.



Fiabilidad y disponibilidad de la central

Uno de los objetivos del proyecto ha sido desarrollar un diseño que permita una futura operación fiable de la central con alto grado de disponibilidad, tal como sucede en centrales alemanas de análogas características.

El grado de disponibilidad de una central tiene que ver con el diseño de la misma (márgenes de diseño, número de sistema y equipos redundantes, selección de materiales, etc.) además de con la manera en que esa central se operará y mantendrá en el futuro. En este sentido, CN TRILLO I ha sido dotada de un diseño que cuenta con todas las previsiones en cuanto a redundancias, equipos de reserva, capacidad de pruebas y mantenimiento durante operación normal, similar al de sus referencias alemanas, que vienen habitualmente funcionando con altos factores de carga y disponibilidad.

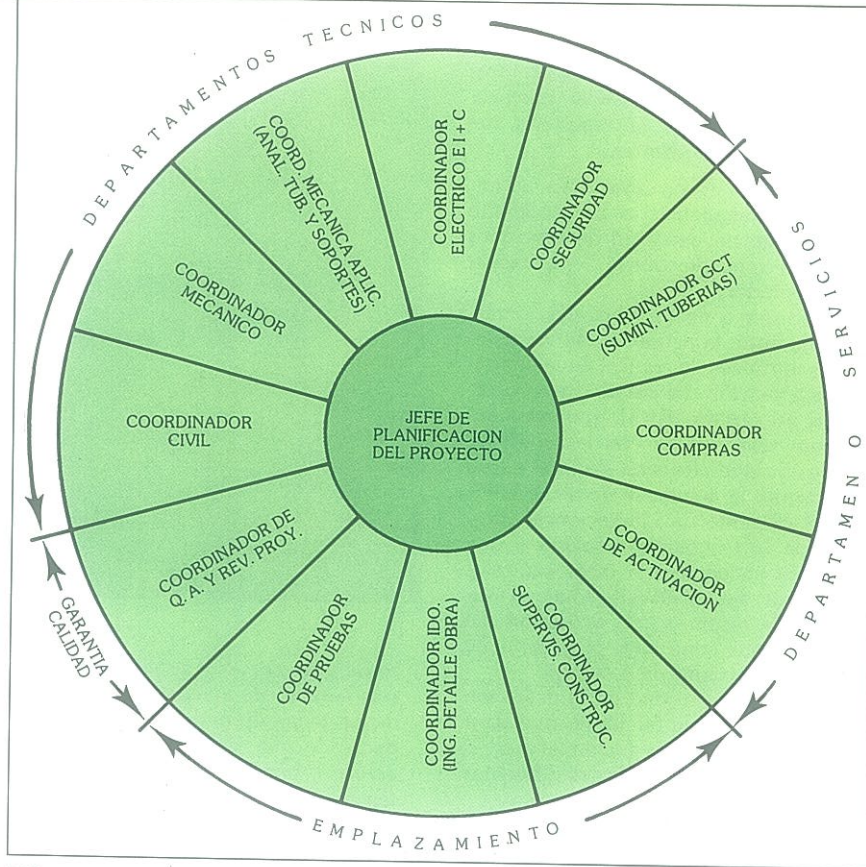
ALGUNAS TECNICAS DESTACABLES UTILIZADAS EN EL DESARROLLO DE LA INGENIERIA

Examinaremos a continuación algunas técnicas de gestión, ingeniería y diseño, cuya aplicación por Empresarios Agrupados en el desarrollo del proyecto ha proporcionado resultados altamente positivos. Se trata en algunos casos de técnicas en cierto modo innovadoras, y en otros, de la consolidación y profundización de prácticas ya experimentadas en proyectos anteriores.

Grupo de Planificación del Proyecto (GPP)

Este grupo, cuya creación y primeros pasos coinciden con la fase de relanzamiento general del proyecto después de la obtención del permiso de construcción, tiene la estructura que se muestra en la fig. I. El esquema indica su característica fundamental, que consiste en la incorporación a las tareas de análisis y seguimiento de la planificación de todos aquellos responsables de área en los diferentes Departamentos Técnicos y en el Emplazamiento, bajo la dirección y coordinación del Jefe de Planificación del Proyecto.

Los procedimientos y mecanismos de funcionamiento del Grupo incluyen dos tipos de actuación: en primer lugar, la tarea de preparación de los programas específicos de ingeniería, suministro de equipos y materiales, construcción o pruebas, así como la actualización e identificación de cambios, que es permanente, manteniendo cada coordinador los contactos bilaterales o multilaterales necesarios para mantener al día su información y la de las áreas afectadas por dichos cambios. En segundo lugar, y como complemento imprescindible a este trabajo diario, el GPP mantiene una reunión general semanal con los siguientes objetivos:



FI Grupo de Planificación del Proyecto.

- Resumir y analizar todos aquellos aspectos surgidos del ajuste diario de los programas que por su carácter más general deban ser asumidos o conocidos por el conjunto de responsables.
- Establecer los marcos de programación general o específicos de área que se requieran en cada momento.
- Fijar las prioridades y objetivos a corto y medio plazo que demande el proyecto, preparando los programas interdisciplinarios integrados que sea preciso desarrollar.
- Detectar las desviaciones que no puedan ser resueltas por el Grupo, trasladándolas junto con las acciones correctoras propuestas, a los niveles de decisión adecuados para su ejecución.
- Controlar y activar las interrelaciones entre distintas organizaciones que hacen posible la continuidad de los programas al prever las necesidades de datos e información con anterioridad al comienzo de las actividades.

El esquema de actuación brevemente descrito, junto con el uso extensivo de los bancos de datos mecanizados del proyecto y paquetes de «software» especialmente adaptados para la preparación de programas, han sido las claves para controlar y ajustar el conjunto de actividades del proyecto a las previsiones e hitos establecidos.

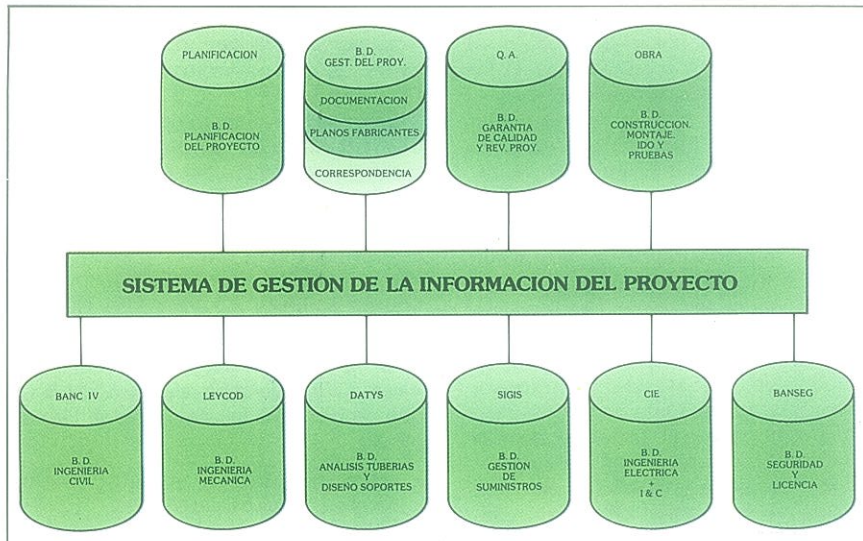
Sistema de gestión de la información del proyecto

El volumen de información generada en el proyecto de CN TRILLO I, des-

glosada en sus diversas categorías de documentación técnica, datos de ingeniería, diseño, equipos y componentes, e incluyendo las sucesivas revisiones a las que da lugar un proyecto en desarrollo, ha hecho imprescindible el uso de Sistemas de Gestión con soporte informático y grado de integración creciente que garanticen la fiabilidad y eficacia, tanto del proceso, como del almacenamiento, acceso y protección de la información. En este sentido, se han creado una serie de bases de datos relacionadas entre sí que almacenan y gestionan la información generada en relación con las distintas disciplinas del proyecto (fig. II).

Para cada disciplina o área del proyecto, las bases de datos respectivas incluyen toda la información técnica necesaria para definir estructuras, componentes, documentos, etc., que son generados o que son responsabilidad de los grupos de trabajos del área. Los grupos responsables introducen las unidades de información en las bases de datos con la periodicidad suficiente para asegurar el uso de la misma información por todos los grupos de trabajo. En el caso de bases de datos que almacenan información de cuyos distintos campos son responsables diferentes grupos de trabajo, se restringe la actualización de cada dato a su responsable, con lo cual se garantiza la coherencia continua de la información.

El acceso a las bases de datos se realiza por terminales interactivos conectados al ordenador principal y distribuidos por las oficinas centrales del proyecto en



F II Sistema de Gestión de la Información del Proyecto.

Madrid, así como en las instalaciones en el emplazamiento (fig. III).

En el área de gestión, con un uso compartido por todas las áreas de trabajo, la base de datos «Documentación» almacena los documentos de proyecto (150.000) con todas sus revisiones; la base de datos «Planos de Fabricante» almacena y gestiona este tipo de planos (30.000), y la base de datos de «Correspondencia» incluye las comunicaciones oficiales (70.000) entre la Organización Propietaria, la Ingeniería, Suministrador Principal, etc.

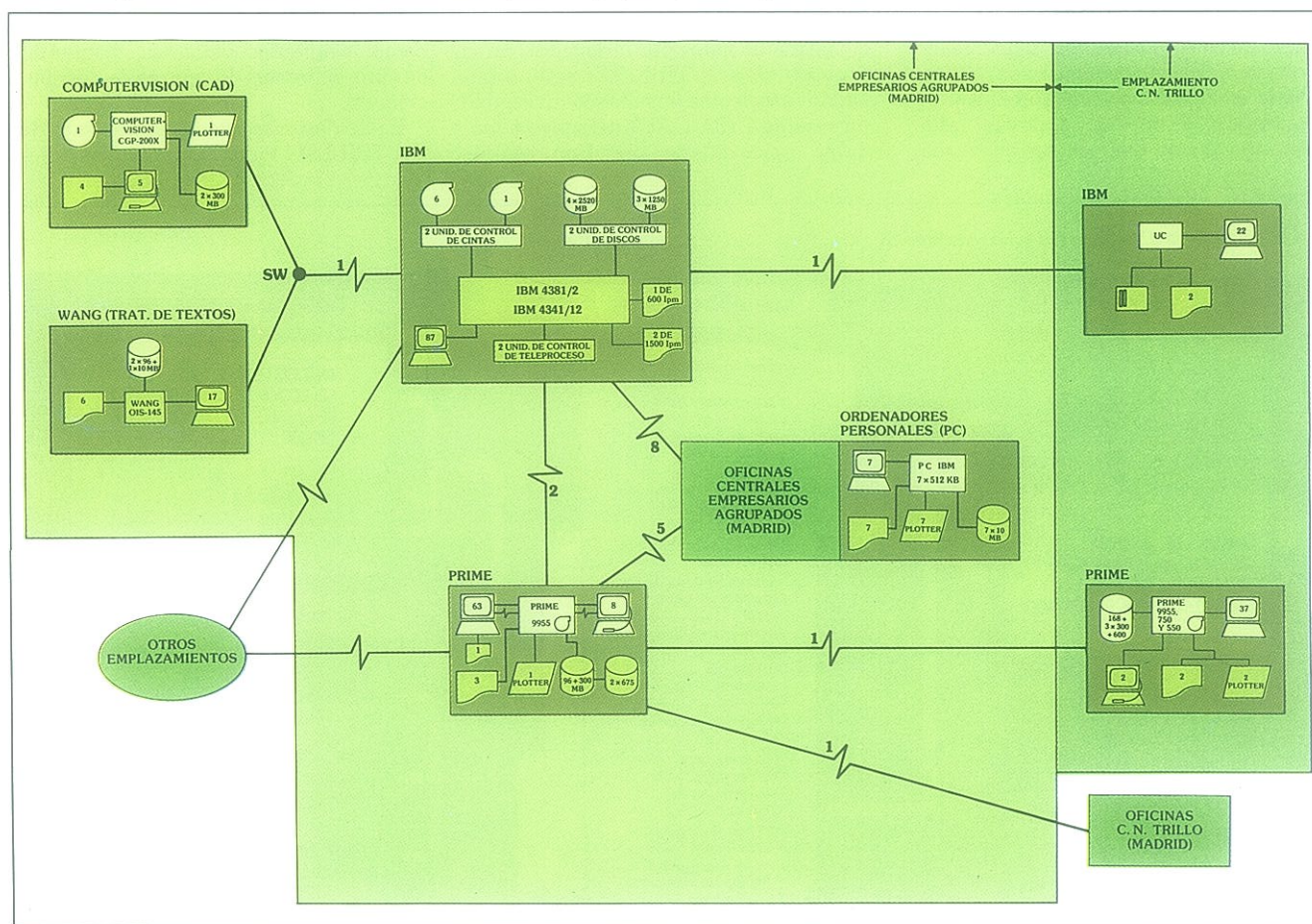
En el área mecánica, las bases de datos de «Líneas» (20.000), «Equipos», «Válvulas» (25.000), «Especialidades de Tuberías», «Piezas especiales o de transición», «Conductos», «Compuertas», «Cargas eléctricas (consumidores)», etc., integrados en el sistema «Leycod», almacenan toda la información sobre componentes mecánicos con sus características físicas y documentales, así como los datos necesarios para su localización como integrantes de las distintas asociaciones de elementos que se utilizan en análisis, programación, montaje, etc.

La base de datos de «Unidades de Análisis» (3.150) y las distintas bases de datos de «Isométricos» (5.400), integradas en el sistema DATYS, almacenan las características de estas entidades que son objeto de los distintos análisis que se realiza en la ingeniería de los sistemas de tuberías. Resultado de estos análisis es el diseño de soportes (43.000) que, con sus distintas características, se almacenan en la base de datos de «Soportes». Las bases de datos de «Tramos» (23.000), «Medición», etc., integradas en el sistema SIGIS, almacenan y gestionan la información relativa a las actividades de fabricación y montaje de dichos sistemas de tuberías.

En el área eléctrica y de instrumentación y control, la base de datos «Procin» incluye toda la información relacionada con instrumentación. Las bases de datos de «Cargas», «Paneles», «Instrumentos», etc., guardan la información relativa a dichos conceptos. Las bases de datos de «Rutas de Cables», «Bandejas» (15.000 metros), «Cables» (40.000) y «Conexión» almacenan y gestionan toda la información referente a cables en sus aspectos de tendido, distribución, cálculo, etc. Todas estas bases de datos están integradas en el sistema CIE.

La información almacenada en las bases de datos descritas se suplementa con información relativa a montaje, documentación «as built», pruebas, etc., que se genera y gestiona en el emplazamiento.

F III Configuración de la Red de Proceso de Datos de Empresarios Agrupados para el Proyecto Trillo.



Interrelacionando todas estas bases de datos, existe un amplio espectro de aplicaciones de gestión y cálculo entre las que interesa destacar:

- El denominado «Programa de Gestión Mecanizada de Tuberías» que permite realizar, optimizándolos, distintos análisis de planificación según los criterios de prioridad y disponibilidad de materiales, así como el seguimiento y el control de avance de este área de forma automatizada.
- El «Recorrido Automático de Cables» que proporciona, como salida más notable, las fichas de tendido individualizadas, así como las de conexionado de puntas (1.000.000 de puntas), de los casi 40.000 cables existentes.

Sistema automatizado para análisis de tuberías y diseño de soportes

Una innovación significativa en el proyecto de CN TRILLO I ha sido la aplicación de técnicas de CAD/CAE para integrar y automatizar el análisis, diseño de soportes, producción de isométricos y gestión de materiales de sistemas de tuberías.

El sistema DATYS (fig. IV) de aplicación extensiva en el proyecto de CN TRILLO I ha sido desarrollado íntegramente por Empresarios Agrupados para gestionar e integrar un conjunto de bases de datos y de programas organizados en módulos, que permiten al usuario desarrollar su trabajo con el ordenador de forma similar, pero mucho más simple, que con los métodos convencionales utilizados en el pasado. Por medio de terminales gráficos interactivos, el usuario introduce en el ordenador la siguiente información: a) la configuración de la tubería en representación isométrica; b) localización y tipo de soportes (esta operación puede también ser efectuada

automáticamente por el sistema) y, c) datos de cargas y combinaciones de las mismas que es necesario utilizar.

Una vez que el trabajo ha sido preparado, el usuario, trabajando interactivamente con los diferentes módulos del sistema, automáticamente puede:

- Realizar el análisis de tensiones de tuberías y demostrar el cumplimiento con los requisitos del código aplicable. El ordenador genera resúmenes de resultados e informes de tensiones.
- Utilizando las cargas resultado del análisis de tuberías, seleccionar los soportes de un catálogo de diseños normalizados para el proyecto de CN TRILLO I almacenados en el ordenador, y obtener a través de un plotter el plano de fabricación del soporte, incluyendo estructuras auxiliares y elementos de catálogos de fabricantes, todo ello totalmente dimensionado, y mostrando también las correspondientes listas de materiales (fig. V).
- Obtener a través del plotter los isométricos de análisis, fabricación y/o montaje con la correspondiente lista de materiales. Los planos de tramos para su fabricación pueden también ser producidos. Finalmente, el sistema genera automáticamente mediciones y listas de materiales de los sistemas de tuberías.

Utilización de CAD/CAE en diseño eléctrico e I & C

La gran cantidad de datos, listados y planos típicos de contenido básico en cierto modo semejante, de las disciplinas eléctricas e I & C, las hace que sean particularmente adecuadas para el diseño e ingeniería asistidos por ordenador. En el proyecto de CN TRILLO I se han obtenido excelentes resultados utilizando un sistema CAD/CAE interactivo y modular, desarrollado por Empresarios

Agrupados, para automatizar las actividades de los proyectos eléctrico y de I & C (fig. VI)

Este sistema, denominado CIE, utiliza una estructura de bases de datos altamente relacionadas por un conjunto de programas de aplicación. El sistema consta de tres grupos de programas que procesan la información contenida en las bases de datos. Cada grupo está especializado en uno de los siguientes tipos de aplicaciones:

a) *Programas de gestión de la información de ingeniería eléctrica e I & C*, que proporciona las siguientes salidas típicas:

- Listas de equipos, aparatos, instrumentos, circuitos, cargas, etc.
- Listas de recorrido de cables y conductos, y fichas de conexionado. El recorrido de cables se realiza de forma automática a través de la red de bandejas y conductos modelizada en el ordenador.
- Llenado de bandejas y conductos.
- Listas diversas de materiales.
- Listados selectivos para uso en la gestión y supervisión del montaje.

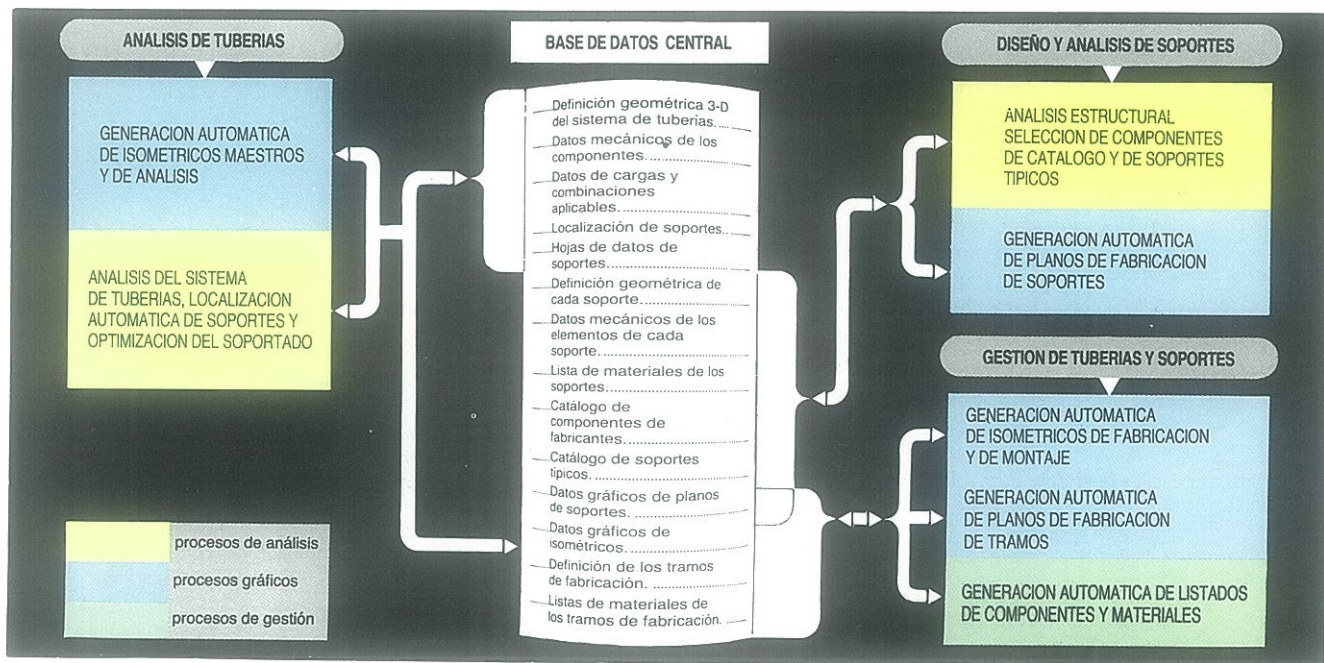
b) *Programas de análisis de sistemas*, para la realización de las siguientes actividades típicas:

- Cálculos de ingeniería eléctrica (p.e., equilibrado de carga, análisis de cortocircuitos, etc.).
- Análisis de transitorios eléctricos (p.e., estudios de transferencia rápida).

c) *Programas para generación automática de gráficos*, utilizados para dibujar por medio de ordenador y obtener a través de pantalla o plotter planos tales como: diagramas unifilares, diagramas de control, frentes de centros de distribución, etc.

Es de destacar que en el proyecto de CN TRILLO I todos los esquemas desa-

F IV Sistema DATYS. Esquema general de Proceso.



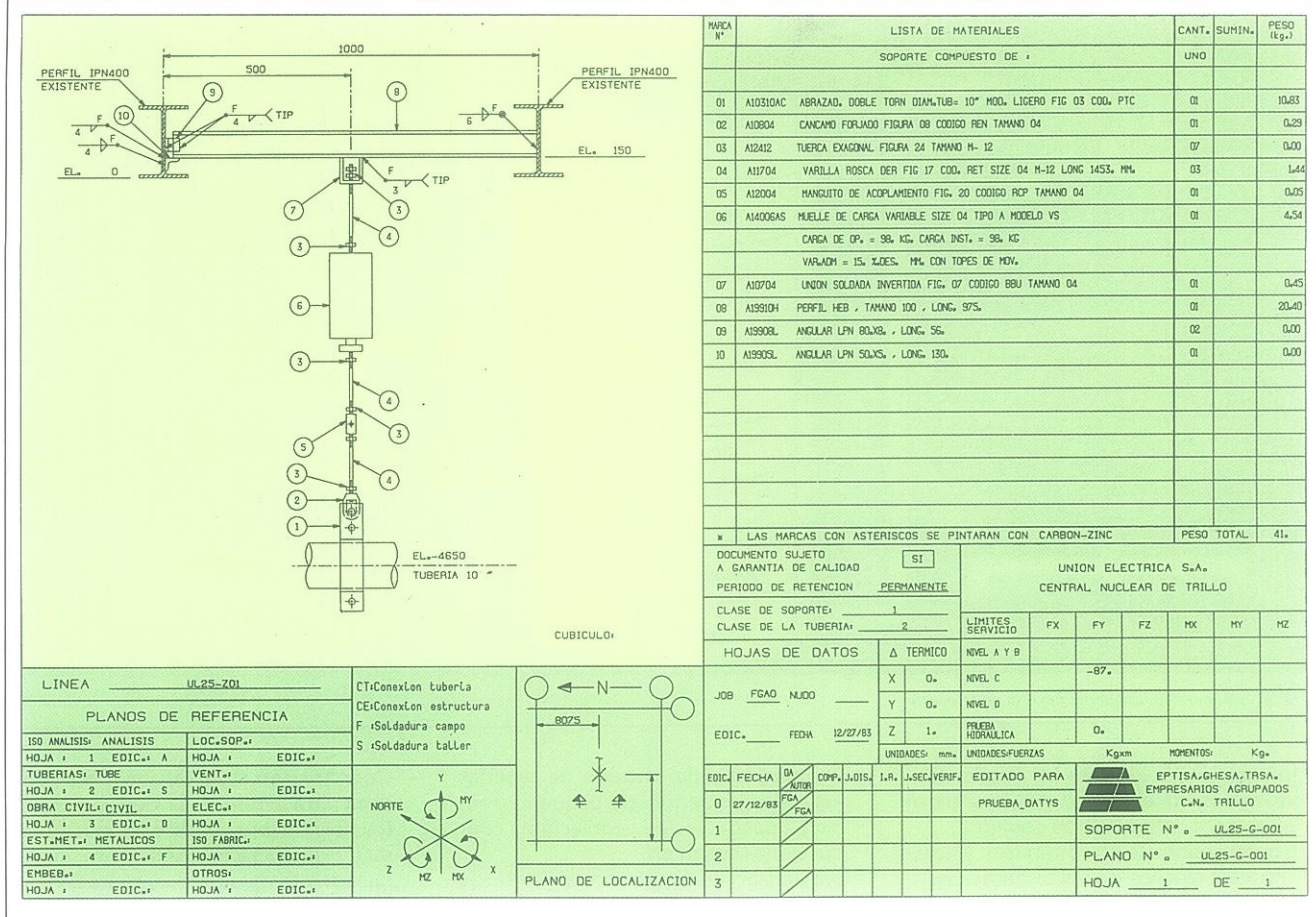


Fig. VII Plano de Soporte de Tubería obtenido por ordenador.

rollados de sistemas eléctricos y mecánicos dentro del alcance de la Ingeniería se han generado por ordenador aplicando el sistema CIE arriba descrito (fig. VII).

Grupo de análisis de impacto de cambios

Las modificaciones y cambios que múltiples factores obligan a introducir a lo largo del desarrollo del proyecto, tienen que ser adecuadamente controlados, especialmente en las etapas finales de montaje y pruebas, para minimizar los retrasos y aumentos de coste que su asimilación produce. La fórmula utilizada en CN TRILLO I para resolver el problema ha incluido medidas de dos tipos:

a) Primero, y tras un estudio exhaustivo de los posibles orígenes de los cambios, se ha preparado un conjunto de procedimientos necesarios para documentar las propuestas de modificaciones provenientes de la Organización Propietaria, KWU, Fabricantes, Emplazamiento e internos de la Ingeniería, de forma que todos y cada uno de los cambios individuales y los inducidos en las distintas disciplinas se someten a un proceso de aprobación formal y sistemático para cada tipo de cambio.

En este proceso de gestión y control de cambios de proyecto, que incluye su registro, clasificación, evaluación de impacto, autorización y seguimiento, la tarea es asegurar que todas las disciplinas afectadas han sido informadas de los

cambios propuestos y que aquéllos que han sido aprobados se incorporan sistemáticamente a los documentos de proyecto.

b) En segundo lugar, se ha creado una estructura organizativa para el análisis, antes de su aprobación, de todos los cambios propuestos, identificando el posible impacto, sopesando su importancia y asegurando que todas las áreas afectadas conocen y valoran adecuadamente sus efectos.

Para llevar a la práctica la aprobación de cambios se celebra semanalmente una Reunión de Análisis de Impacto (RAI) con asistencia de todos los coordinadores designados por los diferentes Departamentos de Ingeniería, Servicios y Emplazamiento, así como por la Dirección de Proyecto y la Organización Propietaria, donde se presentan las propuestas de cambio para estudio y se discuten las presentadas en reuniones anteriores, procediéndose a la aprobación o rechazo, y a la inmediata incorporación, en los documentos afectados, de los cambios aprobados. Aspecto destacable en el sistema es la previsión de aprobaciones por etapas que comienza por el visto bueno de los Jefes de Proyecto de cada disciplina a la propuesta de cambio, y termina con la decisión sobre el Informe de Impacto de Cambio (IIC) de Dirección de Proyecto y finalmente de la Organización Propietaria de CN TRILLO I, sin cuya aceptación la modificación no es efectiva.

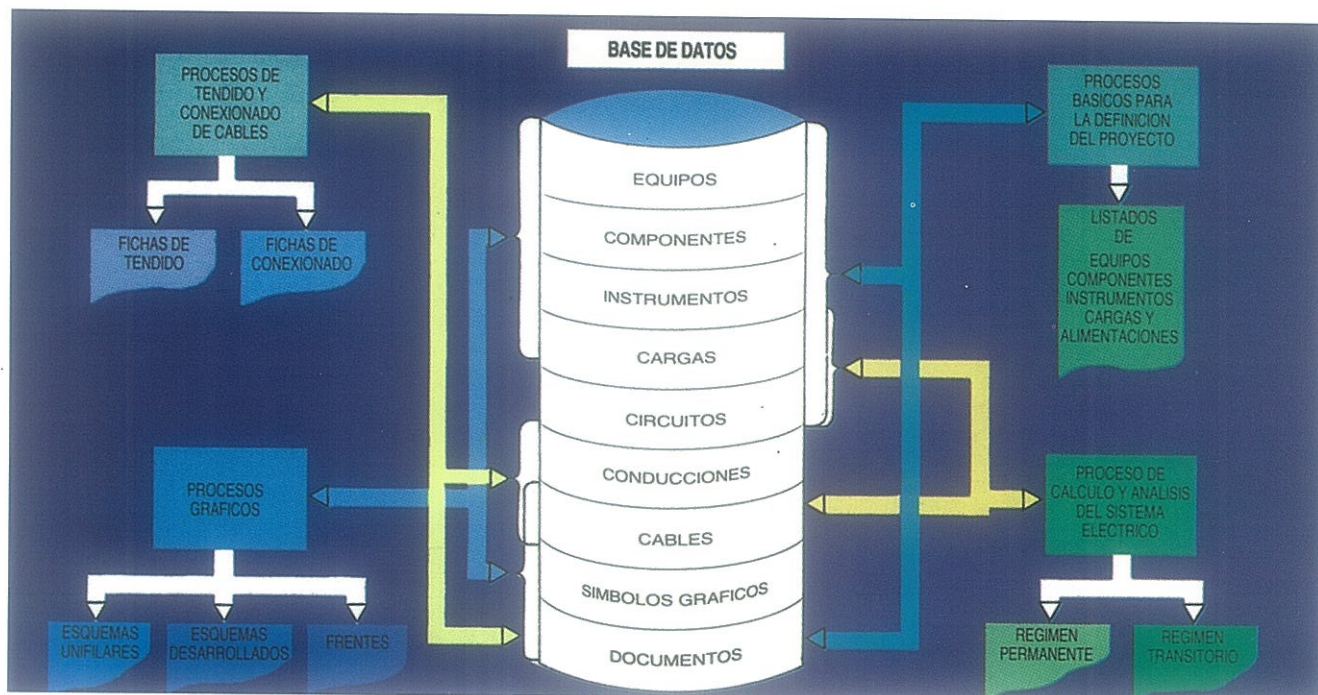
Esta sistemática ha permitido un control muy efectivo sobre las modificaciones que en gran número, más de 5000 IICs hasta el momento, podrían haber influido muy negativamente en el proyecto, si el cuidado y el esfuerzo descrito anteriormente no se hubiese aplicado a tiempo y en profundidad.

Grupo de Diseño Integrado de Planta (GDP)

El GDP es un grupo interdisciplinario creado en el proyecto que tiene su justificación en la dificultad asociada al complejo diseño que se requiere en el Edificio del Reactor de cualquier central.

Tradicionalmente, cada especialidad de ingeniería (civil, mecánica, eléctrica, etcétera) ha desarrollado sus propios planos. La coordinación del diseño y la comprobación de interfases ha sido desarrollada mediante una revisión mutua y realización de comentarios a los planos de los demás. Este método ha resultado a menudo en un gran número de interferencias físicas y en una ausencia de integración y optimización global del diseño bien conocida en proyectos nucleares, en los que las implantaciones complejas y congestionadas de los edificios constituyen la regla general.

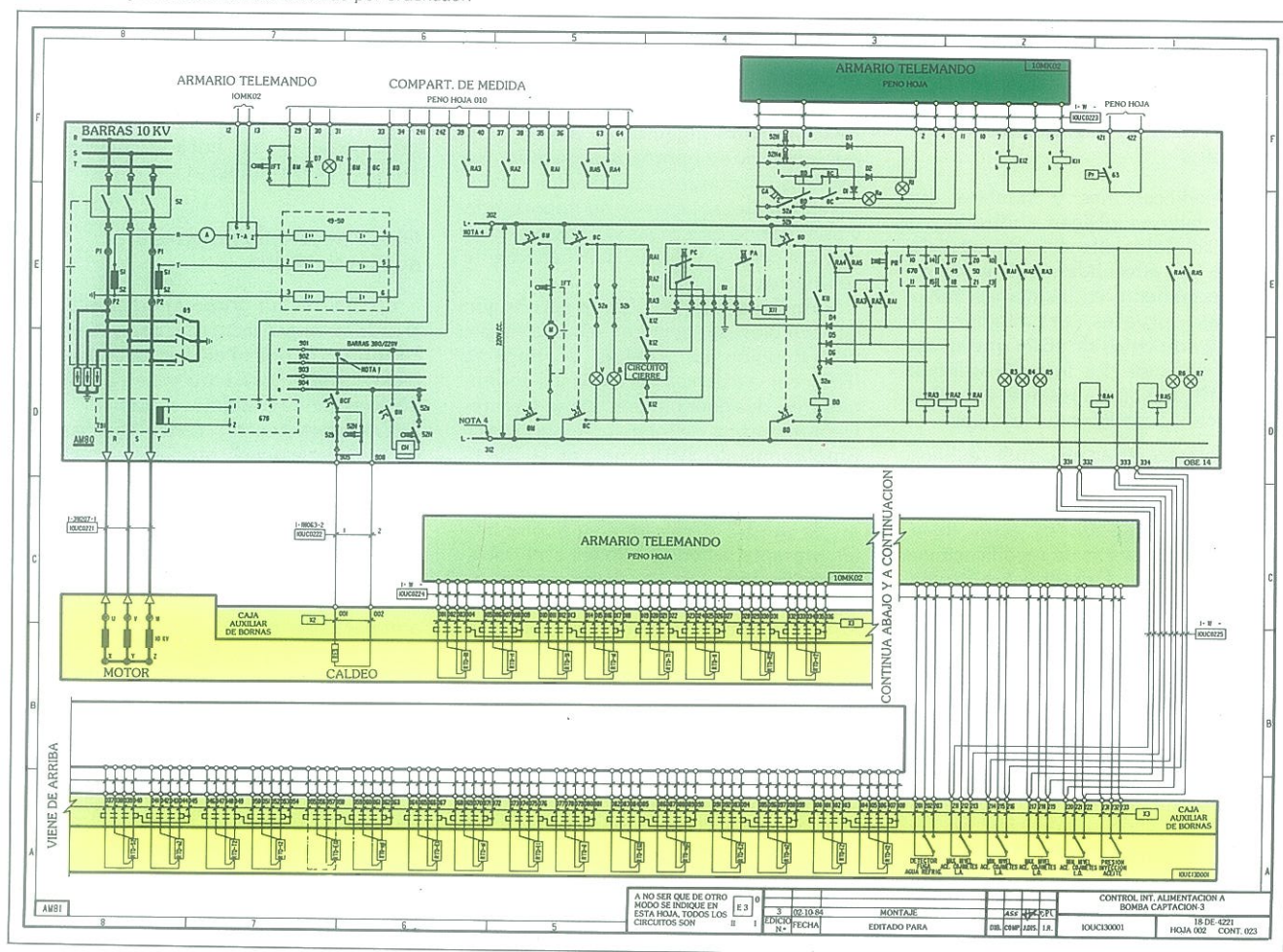
Apartándose de esta práctica tradicional en el proyecto de CN TRILLO I, y para el Edificio del Reactor, se ha establecido un Grupo de Diseño de Planta con los siguientes objetivos básicos:



F VI Sistema CIE. Esquema general de Proceso.

- Integración de los distintos diseños (civil, mecánico, eléctrico, etc.) buscando soluciones óptimas en su conjunto.
- Coordinación de las interfaces físicas entre los diseños de las distintas disciplinas y administración del espacio disponible en el Edificio del Reactor.
- Optimización del trazado de tuberías —en especial de tubería pequeña y tubing—, conductos de ventilación y conducciones eléctricas.
- Maximizar el soportado múltiple de elementos (tuberías, conductos, bandejas, etc.).
- Coordinación de la información necesaria para el diseño de ciertos elementos típicamente conflictivos por su carácter multidisciplinario, tales como: huecos y manguitos pasamuros, plataformas, bandas y placas embebidas, definición de bancadas de equipos, etc.

F VII Esquema desarrollado obtenido por ordenador.



Construcción de una maqueta a escala

El Grupo de Diseño de Planta tiene también a su cargo la construcción de una maqueta a escala 1:15 como ayuda suplementaria a su labor de integración del diseño físico de la central (fig. VIII). La maqueta, que ha sido construida para los Edificios del Reactor, Auxiliar y Turbina debido a su mayor complejidad, ha facilitado la tarea de optimización del diseño, ha permitido un uso más racional del espacio disponible, ha simplificado la coordinación entre las distintas especialidades del proyecto, ha disminuido drásticamente las interferencias físicas entre elementos encontradas durante la fase de montaje y, en definitiva, se ha convertido en una herramienta imprescindible para la integración y verificación del proceso de diseño de la central.

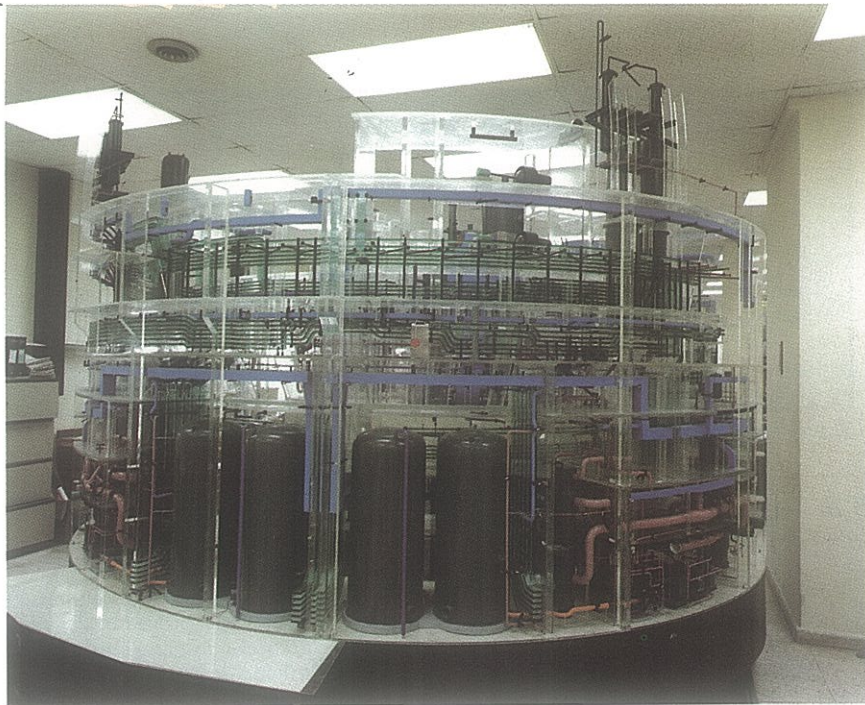
El método de construcción empleado para la maqueta de CN TRILLO I consiste en dividir cada edificio mediante cortes verticales, en módulos que deslizen sobre un sistema de railes. Todos los cubículos y elementos instalados en el módulo son accesibles al estar éstos integrados por cajones extraíbles horizontalmente. Una nota destacable y que ha incrementado significativamente el beneficio de la maqueta, es la modelización de todos los soportes de todas las tuberías (diámetro grande y pequeño), bandejas de cables y conductos de ventilación.

En el proyecto de CN TRILLO I la maqueta ha facilitado el uso racional del espacio, ayudado a identificar interferencias físicas y animado a los diseñadores de distintas especialidades a «pensar en grupo», es decir, a integrarse. Además, el uso de la maqueta ha promovido la idea de que las soluciones de diseño para facilitar la futura construcción, operación y mantenimiento de la central, deben ser incorporadas en la fase de diseño del proyecto.

Máximo desarrollo del diseño de detalle por la Empresa de Ingeniería

Las experiencias habidas en proyectos anteriores han hecho ver la conveniencia de evitar la proliferación de contratistas que desarrollen actividades de ingeniería de detalle. La calidad del diseño puede verse perjudicada si se utilizan criterios, soluciones de diseño y documentos de proyecto diferentes.

Por ello, el criterio aplicado en el proyecto de CN TRILLO I es desarrollar el máximo alcance de diseño de detalle por la Ingeniería responsable del proyecto, bien en las oficinas centrales o en el emplazamiento, según sea el lugar más conveniente para cada situación en particular. La Ingeniería debe llevar a cabo un diseño integrado, homogéneo, de calidad y suficiente. A los Contratistas les debe llegar toda la información que precisen para fabricar, construir y montar en las condiciones y con la calidad exigidas.



F VIII Vista de la maqueta del edificio del reactor.

Ingeniería de Detalle en Obra (IDO)

El establecimiento a pie de obra de organizaciones de ingeniería de apoyo a las Oficinas Técnicas de Supervisión de Construcción y de Contratistas, incluso con alcance en la preparación de documentación de montaje en sus últimos niveles de detalle, ha sido un recurso empleado profusamente durante las fases de construcción y pruebas de centrales nucleares.

De acuerdo con esta filosofía, en el proyecto de CN TRILLO I se han consolidado estas experiencias anteriores, incrementando notablemente el alcance, procedimientos y recursos asignados a la Ingeniería de Detalle en Obra (IDO). El conjunto de trabajos responsabilidad de la IDO se incluyen en la fig. IX, siendo importante destacar las siguientes características organizativas:

- Desarrolla diseño de detalle y proporciona apoyo de ingeniería a la Organización de Supervisión de Construcción, Pruebas y Puesta en Marcha, utilizando un conjunto de procedimientos administrativos y técnicos similar al que se utiliza en las oficinas centrales del proyecto de Empresarios Agrupados (Madrid), desarrollando sus actividades en estrecha colaboración con los Jefes de Proyecto de cada especialidad.
- Contribuye de manera decisiva en la actividad del proceso de construcción y montaje, al haberse dotado de capacidades y procedimientos que le permitan resolver y aprobar directamente las solicitudes de cambio de diseño realizada por la organización de obra, autorizaciones que serán formalmente integradas posteriormente en la

F IX Alcance de la Ingeniería del Detalle en Obra.

ALCANCE DE LA INGENIERIA DE DETALLE EN OBRA (IDO)

- * DISEÑO DE SOPORTES DE CONDUCTOS DE HVAC.
- * DESPIECE DE CONDUCTOS DE HVAC.
- * DISEÑO DE SOPORTES DE BANDEJAS DE CABLES.
- * DISEÑO DE SOPORTES DE CONDUCTOS PARA CABLES.
- * DISEÑO DE SOPORTES DE TUBING DE I & C FUERA DEL ED. REACTOR.
- * DISEÑO DE RUTAS DE CABLES DE BANDEJA A CONSUMIDOR FUERA DEL ED. REACTOR
- * DISEÑO DE SOPORTES DE TUBERIA D < 80 mm FUERA DEL ED. REACTOR.
- * PREPARACION DE ISOMETRICOS DE MONTAJE DE TUBERIA.
- * GESTION DE LOS CAMBIOS DE DISEÑO GENERADOS EN EL EMPLAZAMIENTO.
- * CALCULOS DE ESTRUCTURAS Y MECANISMOS DE ELEVACION PROVISIONALES O DEFINITIVOS, SI SE REQUIERE.
- * APOYO A LAS O. T. DE SUPERVISION DE CONSTRUCCION Y CONTRATISTAS.
- * DESARROLLO Y GESTION INFORMATICA EN EL EMPLAZAMIENTO.

AREA CIVIL		AREA MECANICA		AREA ELECTRICA	
DESCRIPCION	CANT.	DESCRIPCION	CANT.	DESCRIPCION	CANT.
— CRITERIOS Y ESPECIFICACIONES	54	— ESPECIFICACIONES	195	— ESPECIFICACIONES	92
— PLANOS DE DEFINICION GEOMETRICA ARMADURA	1721	— «COMPOSITES» DE TUBERIA	449	— PLANOS BANDEJAS	151
— PLANOS DE BANCADAS DE EQUIPOS	1119	— ISOMETRICOS $\varnothing \geq 80$ mm	2028	— FICHAS DE RECORRIDO DE CABLES	40000
— SOPORTES DE CONDUCTOS DE HVAC	4384	— ISOMETRICOS $\varnothing < 80$ mm	4311	— FICHAS DE CONEXIONADO	40000
— SOPORTES DE BANDEJAS PARA CABLES	15197	— UNIDADES DE ANALISIS $\varnothing \geq 80$ mm	893		
		— UNIDADES DE ANALISIS $\varnothing < 80$ mm	2257		
		— SOPORTES DE TUBERIA $d \geq 80$ mm	16000		
		— SOPORTES DE TUBERIA $d < 80$ mm	27000		
		— ESTRUCTURAS DE SOPORTADO MULTIPLE	5000		

NOTA 1: Sólo se incluyen unidades significativas en ingeniería y diseño.

NOTA 2: Las cifras no incluyen el número de ediciones a realizar por revisiones de un mismo documento.

FX Volumen de documentación más significativa generada en el proyecto.

documentación técnica por la ingeniería del proyecto.

- Está dotada de un potente equipo informático instalado en obra y conectado al ordenador principal en las oficinas centrales del proyecto en Madrid, lo que permite acceso directo desde el emplazamiento a las bases de datos generales del proyecto.

La potenciación de la IDO y su dotación hasta alcanzar las capacidades actuales, ha constituido una experiencia positiva, que está contribuyendo decisivamente a dotar de gran agilidad de respuesta a los problemas que surgen en la

resolución de las interfases emplazamiento-ingeniería del proyecto, de vital importancia en el cumplimiento de plazos y en la calidad de la construcción y el montaje.

CONCLUSION

Para terminar esta exposición de las características más notables del proyecto de CN TRILLO I, se muestra en la fig. X una tabla con las unidades más significativas de documentos de proyecto generados por Empresarios Agrupados

en el desarrollo de la ingeniería, que da una idea del volumen de trabajo llevado a cabo en el proyecto.

Como conclusión, hay que destacar el gran caudal de experiencias positivas obtenidas por Empresarios Agrupados como responsable de la ingeniería, gestión de suministros y supervisión de construcción, en cuanto a la tecnología, técnicas de gestión y prácticas de ingeniería y diseño utilizadas en este proyecto singular, que sin duda serán beneficiosas para su aplicación en el desarrollo de otros proyectos, cualquiera que sea el tipo de reactor o el origen del NSSS.



OFICINA CENTRAL: PADILLA, 46 - 28006 MADRID TELEFS. 431 42 20-431 54 10 - TELEX 49090 AXNI-E

REALIZA OBRAS EN:
C.N. TRILLO — C.N. VANDELLOS
OBRA CIVIL
—MONTAJE DEL EQUIPO PESADO
—MONTAJE EQUIPOS DIVERSOS
—PREFABRICACION Y MONTAJES DE TUBERIAS NUCLEARES Y CONVENCIONALES.

