MEJORA CONTINUA EN FABRICACIÓN E INSPECCIÓN DE COMBUSTIBLE

A. Domingo y R. Ruiz

El proceso de fabricación e inspección de conjuntos combustibles, en Enusa, se caracteriza por su robustez adquirida en los últimos treinta años de experiencia en fabricación. La fiabilidad de estos procesos está basada en unos procesos cualificados y en una mejora continua en el diseño y actualización de equipos y en la optimización de los procesos físicos e informáticos. Adicionalmente los sistemas de gestión y control de calidad se han mejorado tanto en *software* como en la medición de objetivos de empresa. Este artículo hace hincapié en las mejoras introducidas en los últimos cinco años en la gestión, la fabricación y la inspección de combustible.

The manufacturing and inspection process of fuel assemblies in ENUSA is characterized by its robustness acquired over the last thirty years of experience in manufacturing. The reliability of these processes is based on a qualified processes and continuous improvement in the design and upgrading of equipment and optimization of software and manufacturing processes. Additionally, management and quality control systems have been improved in both software and measuring business objectives. This article emphasizes the improvements made over the past five years in management, production and inspection of fuel assemblies.

ANTONIO M. DOMINGO MOYA
Jefe de Producción Mecánica
FÁBRICA DE COMBUSTIBLE NUCLEAR DE JUZBADO

Ingeniero Industrial en la especialidad Química por la U.P. Valencia. *Quality Engineer* por la ASQ (*American Society for Quality*) y gestor de los Sistemas de Calidad por la AEC (Asociación Española de Calidad) reconocido como EOQ *Quality System Mgr*. Es Nivel 3 en los métodos de radiografía, ultrasonidos, fugas, corrientes inducidas e inspección visual. Trabajó en Enusa Industrias Avanzadas S.A. en el Área de Calidad de 1985 a 2008. Y desde 2010 trabaja en Producción Mecánica.

ROSALÍA RUIZ ALONSO
Jefe de Ingeniería de Calidad
FÁBRICA DE COMBUSTIBLE NUCLEAR DE JUZBADO

Licenciada en Ciencias Químicas por la Universidad de Burgos, y máster en Gestión de Calidad por la Escuela de Organización Industrial (EOI).

Más de 15 años desarrollados en la Organización de Gestión de Calidad.

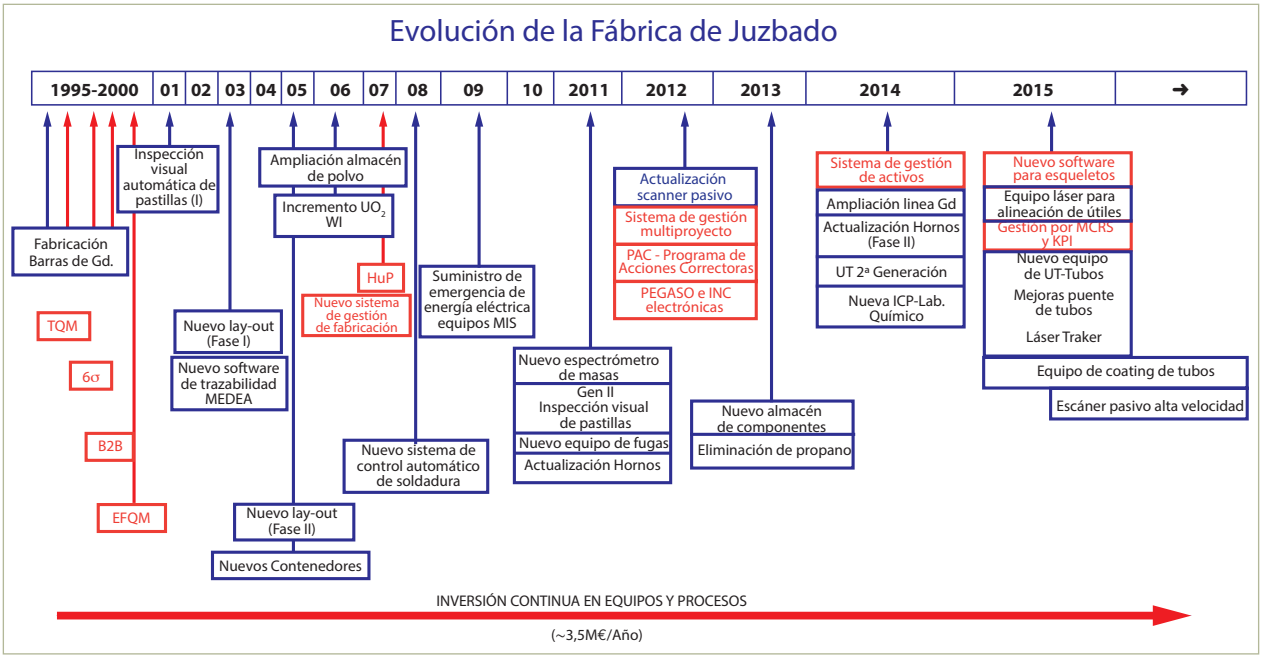

Figura 1. Evolución histórica de mejoras e inversiones.

INTRODUCCIÓN

El proceso de fabricación e inspección de conjuntos combustibles en Enusa, es un proceso muy robusto basado en la experiencia de 30 años de fabricación.

En diferentes ediciones de esta revista, (*Nuclear España* nº 254 de 2005; *Nuclear España* nº 309 de 2010), se han realizado monográficos sobre Enusa en los que se han ido presentado de forma pormenorizada, la descripción de nuestros procesos de fabricación e inspección de conjuntos combustibles, es por ello que nos gustaría enfocar este monográfico a dar un paso más y presentar las modificaciones y mejoras tecnológicas implantadas en los últimos cinco años basadas en la actualización y modernización de nuestros procesos y equipos, fruto de una política de mejora continua.

La Figura 1 presenta, de forma visual, la evolución anual de la Fábrica de Juzbado en lo referente a mejoras de procesos y equipos.

De acuerdo con lo recogido en la figura anterior y enfocándolo desde el punto de vista de los procesos principales de fabricación e inspección (pastillas, barras, montaje de combustible y laboratorios) podemos destacar las siguientes modificaciones y mejoras:

ÁREA CERÁMICA

En esta área se realiza el proceso cerámico que tiene como fin obtener, a partir de las materias primas, pastillas sinterizadas y rectificadas con unas estrictas tolerancias dimensionales.

En el Área Cerámica, en estos últimos cinco años, se ha realizado la actualización de la mayor parte de los equipos de proceso, destacando además de las modificaciones en los sistemas de limpieza de mezcladoras y actualizaciones de *software* de los robots de prensas, los siguientes:

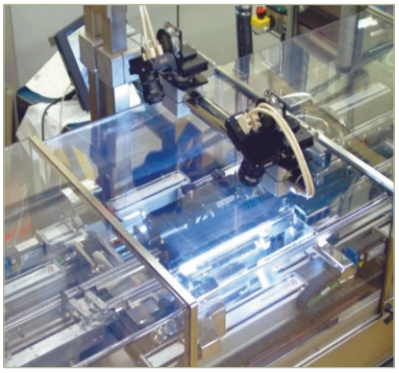

Figura 2. Detalle del equipo de inspección automática de pastillas (IAP2).

Actualización de los hornos de sinterizado

Las modificaciones llevadas a cabo en los hornos de sinterizado han tenido por objeto estandarizar la electrónica y sistemas de control en todos los hornos. El nuevo sistema permite monitorizar y registrar todos los parámetros de temperatura de los hornos a lo largo del tiempo.

Inspección automática de pastillas (IAP2 e IAP3): nuevos *software* y *hardware* para la versión inicial de la máquina de inspección automática de pastillas (IAP3) y puesta en marcha del nuevo diseño de la máquina de inspección visual automática de pastillas (IAP2)

Las máquinas de inspección automática de pastilla han tenido una importante evolución desde la primera máquina (IAP1) que empezó a funcionar en el año 2003. La segunda generación (IAP2) (Figura 3) dispone de nuevas cámaras de visión artificial con mayor resolución y cambia los mecanismos de manejo de pastillas, permitiendo la clasificación de las pastillas antes de que se forme la bandeja de pastillas. La IAP3 (Figura 2) es una modificación de *hardware* y *software* de la IAP1 pero manteniendo los mecanismos mecánicos de la IAP1. Con estas modificaciones, mantenemos un sistema informático actualizado manteniendo las características cualificadas de la primera máquina y mejorando también la capacidad de inspección.

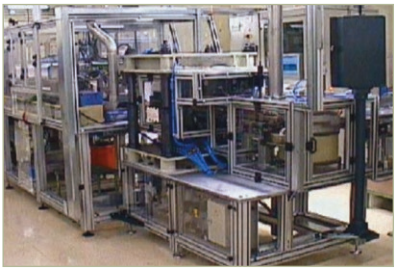

Figura 3. Equipo de inspección automática de pastillas (IAP3).

5S en las áreas de Sinterizado y Prensado PWR

Aplicando las técnicas de las 5S (orden y limpieza) se han modificado las áreas de Sinterizado y Prensado PWR con una adecuación del Área, pintado de zonas y clasificación de equipos, repuestos y materiales, mejorando el control del producto y el flujo de materiales. En la Figura 4 podemos ver el estado general del Área de Sinterizado.

Figura 4. Nuevo *lay out* del Área de Sinterizado.

BARRAS COMBUSTIBLES

El proceso de fabricación de barras combustibles (primera soldadura en el Área Mecánica y carga de barras, segunda soldadura y sellado en Área Cerámica) sigue manteniendo la misma filosofía. Las soldaduras son TIG con atmósfera inerte de helio y el proceso de inspección de barras combustibles sigue siendo al 100 % de las barras por métodos no destructivos, pero los equipos de ultrasonidos, scanner activo y pasivo, y detección de fugas se han visto actualizados y mejorados.

Nuevas fuentes de soldadura TIG. Control de parámetros de soldadura

Las fuentes de soldadura se están actualizando a razón de dos equipos al año y cambiando las antiguas fuentes Centaur PTW-150 con *soft start* por fuentes Liburdi Dimetrics PTW-160. Estas fuentes están adaptadas a los parámetros cualificados con *soft start* y están actualizadas y preparadas para exportar todos los datos de la soldadura al sistema informático. Son fuentes completamente intercambiables con las 150.

Todos los parámetros de la soldadura, se controlan digitalmente, dando disposición automática de acuerdo al rango de parámetros cualificados. La pureza del helio se controla en línea con analizadores de oxígeno y los parámetros geométricos de la soldadura se controlan por visión artificial. En estos últimos años, se ha incluido un micrómetro láser que verifica la presurización de la barras mediante la medida del diámetro de la barra.

Figura 5. Nuevo equipo de Ultrasonidos para inspección de soldaduras en tubos y barras.

Equipo de Fugas

El equipo de detección de fugas se modificó y actualizó mecánicamente en 2008; en 2011 se cambió el espectrómetro de masas de helio para la detección de fugas con el propósito de automatizar los registros de la inspección. Actualmente se está trabajando con esta actualización.

Nuevo *hardware* y *software* del scanner pasivo y scanner activo

Los *software* de ambos equipos estaban desarrollados para ordenadores que se han quedado obsoletos y sin repuestos. Por ello, en estos años Enusa ha desarrollado un nuevo *software* en entorno PC para el análisis de las señales de los detectores. Este *software* se ha hecho equivalente para el scanner activo y el scanner pasivo, incorporando en este análisis las señales de los detectores de enriquecimiento, densitómetro gamma, corrientes inducidas y detectores de gadolinio. La captación de estos datos ha hecho necesario realizar unos cambios importantes en la electrónica de los equipos.

UT3 ultrasonidos

En los equipos de ultrasonidos se ha trabajado en dos fases. En primer lugar se desarrolló un nuevo *software* en entorno de PC, que se implantó en los equipo UT1 y UT2. En 2014 se desarrolló un nuevo equipo de ultrasonidos incorporando importantes cambios mecánicos en el automatismo de manejo, pero manteniendo con pequeñas modificaciones el *software* del equipo.

Estas mejoras en equipamiento en el Área de Barras nos permiten mantener los estándares de calidad evitando la obsolescencia de las maquinas.

ESQUELETOS Y CONJUNTOS COMBUSTIBLES

Los equipos de fabricación en el Área Mecánica han tenido pocas variaciones de *hardware* en estos años. Las mejoras incorporadas han sido la estandarización de los equipos de expansión de esqueletos (se han dejado dos equipos iguales). La actualización de los autómatas y sistemas de control en esqueletos y combustible PWR y BWR y la instalación de un nuevo equipo de lavado de combustible PWR.

En cuanto al proceso los cambios más importantes son el nuevo *software* de esqueletos mucho mejor adaptado al proceso informático real.

Modificación de los pozos de lavado de combustible

La mayor modificación en el Área Mecánica en estos últimos cinco años ha sido en cambio en la configuración de los pozos de lavado de combustible PWR en los que tanto el sistema de recirculación, filtrado del agua y calefacción se han situado en la parte superior de los pozos, con lo que se facilitan todas las operaciones de mantenimiento de los pozos (Figura

Figura 6. Pozos de lavado de combustible PWR.

6). Esta modificación se ha completado con la instalación de blindajes en al Área para reducir las dosis al personal de operación.

Nuevos controladores y *software* en esqueletos y combustible

Los controladores de los equipos de expansión de esqueletos y de montaje de combustible se han actualizado instalando terminales de diálogo, nuevos motores y *encoders* (Figura 7). Con ello, en esqueletos, se ha facilitado la programación de las posiciones de las expansiones con una gran repetibilidad, permitiendo un ajuste mucho más preciso en el posicionado de éstas, con lo que se ha mejorado esta característica de calidad, crítica en la fabricación de los esqueletos. En montaje de conjuntos combustibles también se ha mejorados la programación de los parámetros del equipo de tracción. Con estas modificaciones hemos conseguido tener dos equipos en fabricación de esqueletos iguales reduciendo la dependencia de equipo único que se tenía anteriormente.

Pinzas de expansión

La evolución en el diseño de las pinzas de expansión está en proceso. Se han retirado las pinzas cromadas, al no conseguir este recubrimiento con la calidad deseada. Actualmente estamos trabajando con pinzas sin recubrimiento fabricadas en acero de alta resistencia y estamos ensayando nuevos recubrimientos tipo *Banilit*.

Figura 7. Equipo y controlador de esqueletos.

Nuevo *software* de esqueletos y desmontajes

EL nuevo *software* de esqueleto se ha desarrollado, adaptando el proceso informático al proceso real de fabricación (Figura 8), con ello se logra una trazabilidad más ajustada a la fabricación real y se permiten cambios en los componentes, posibles reelaboraciones y desmontajes de esqueletos, adaptadas a las situaciones reales. También se ha mejorado la captación de datos de inspección mediante una *tablet*.

LABORATORIO QUÍMICO

A lo largo de estos cinco años se han actualizado numerosos equipos de todas las áreas del Laboratorio Químico:

En el Área de Espectrometría, se dispone de un nuevo espectrómetro de masas (Figura 9) con fuente de ionización térmica (TIMS), utilizado en la determinación isotópica del uranio para certificar el producto. Así como de un espectrómetro de ICP-OES, que

Figura 9. Equipos del Laboratorio Químico.

incluye la disposición vertical de la antorcha, y tiene un sistema óptico pionero que permite analizar simultáneamente en radial y en axial, dependiendo de cómo nos interese hacerlo para cada elemento.

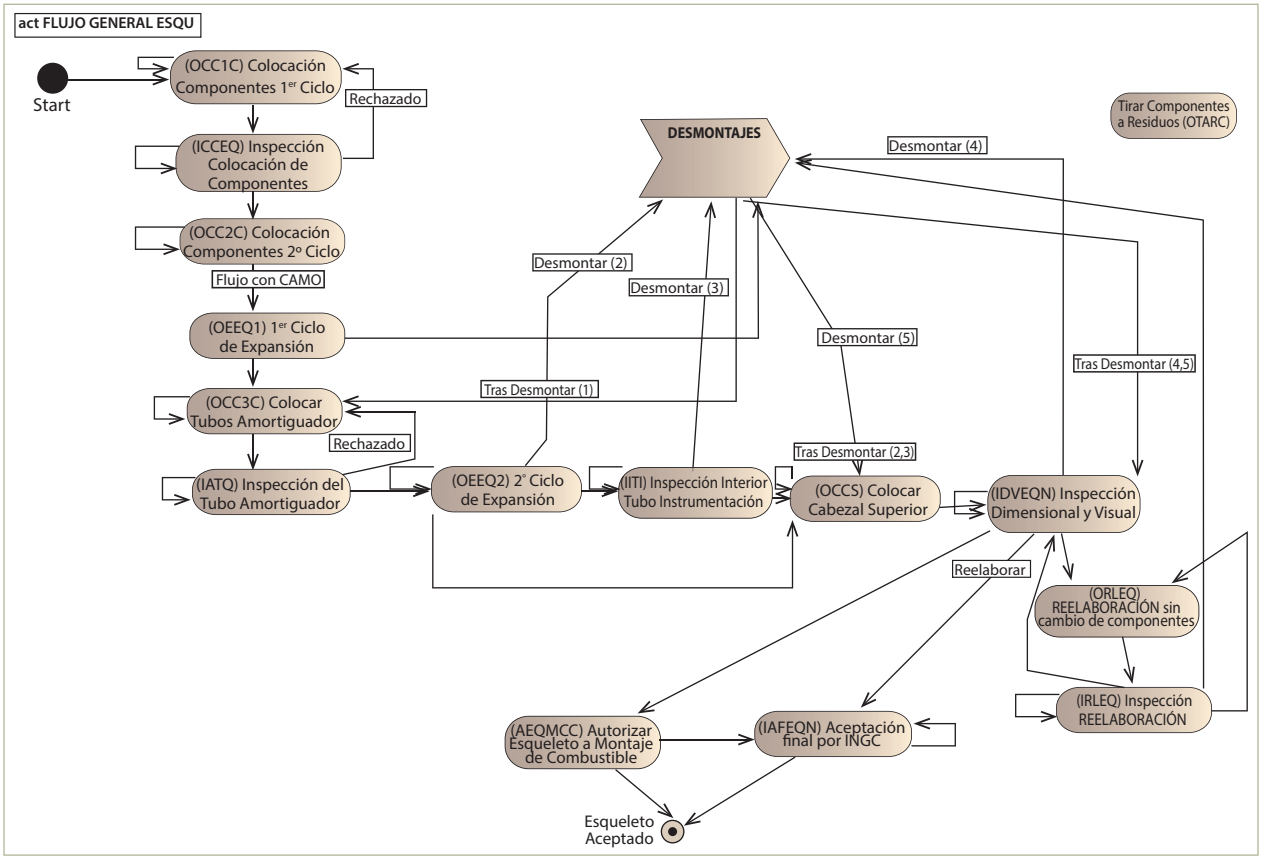

Figura 8. Diagrama de proceso del software de fabricación de esqueletos.

En el Área de Metalografía, el nuevo microscopio óptico metalográfico invertido se utiliza para la evaluación de probetas metalográficas de soldaduras y componentes mecánicos del combustible, permitiendo hacer evaluaciones entre 12.5x y 1500x aumentos.

También se ha adquirido un estereoscopio que se utiliza en observaciones macro de distintos componentes o muestras de control de proceso, como las probetas que han sido ensayadas en corrosión, o la observación de las muestras metalográficas durante los pasos de preparación.

En el Área de Vía Húmeda se han cualificado distintos analizadores; el de humedad, para realizar la determinación del contenido de humedad en el polvo de óxido de uranio, el de hidrógeno, un analizador automático de gases que se utiliza para determinar el contenido en hidrógeno de pastillas de óxido de uranio y en soldaduras, o el de presión interna en barras combustibles, que ha sido actualizado completamente tanto en la parte de vacío como en las sondas de medida.

METROLOGÍA

En el Laboratorio Metrológico también se ha apostado por las nuevas tecnologías adquiriendo nuevos equipos para la calibración de herramientas dinamométricas que mejoran en gran medida la precisión, repetitividad y rapidez en la ejecución de las calibraciones, y se ha sustituido el proyector de perfiles por una máquina de visión por coordenadas (2D + Z), cuya adquisición se fundamenta en la mejora de las medidas ópticas sin contacto. El equipo viene provisto de *software* de proceso de datos específico que permite, mediante la captura de imágenes en ordenador, poder realizar medidas en ejes X e Y, ampliar enfoque del detalle, etc…

Figura 10. Láser Tracker.

Por último debemos desatacar la adquisición del láser Tracker, (Figura 10) un equipo de medición por coordenadas de gran precisión que, en nuestro caso, nos permite optimizar procesos minimizando tiempos de ejecución al poder realizar medidas rápidas, simples y precisas en cualquier magnitud geométrica.

La adquisición de un equipo Tracker supone una mejora sustancial en aquellas operaciones realizadas por Metrología y relacionadas con el ajuste, alineación y puesta a punto de útiles de fabricación y montaje de elementos combustibles ya que dadas sus características:

- Optimiza procesos.
- Minimiza tiempos de ejecución.
- Elimina medida óptica e interpretación del observador.
- Dada su precisión y repetitividad, garantiza la fiabilidad en las medidas realizadas.

Además, podrá utilizarse dando soporte a otras organizaciones en la comprobación *in situ* de medidas con tolerancias estrictas.

CAMBIOS A CORTO PLAZO

Gadolinio nuevos equipos de soldadura

Se han adquirido e instalado nuevas estaciones de soldadura y sellado en la línea de fabricación de barras de gadolinio de idénticas características a las ya existentes en las líneas de fabricación de barras de UO_2. Estos nuevos equipos incluyen mejoras en la neumática, cuadro de gases, controladores, automatismos, *hardware* y *software*, destacando la implantación de la inspección automática de los gráficos de soldadura.

Actualmente esta mejora en los equipos ya ha sido realizada, encontrándose en proceso de cualificación.

Coating de Tubos

En los últimos meses en Enusa se está trabajando en la implantación de un nuevo proceso consistente en la preoxidación de la zona inferior del Conjunto Tubo Tapón Inferior (longitud de zona oxidada entre 4.5 y 7 pulgadas y de un espesor entre 2 a 6 micras) antes de ser cargado con pastillas, de forma que se cree un recubrimiento notablemente duro de óxido de zirconio, dotando a esta parte de la barra de un resistencia muy superior frente a la eventual abrasión por partículas sueltas.

Es el objetivo de Enusa que durante el año 2016 este nuevo proceso esté totalmente implantando, pudiéndose fabricar los primeros conjuntos tubo tapón inferior preoxidados a mediados de 2016

MEJORAS EN SISTEMA DE GESTIÓN

Aunque en este artículo nos hemos centrado en presentar las modificaciones y mejoras tecnológicas implantadas en nuestros procesos y equipos de fabricación e inspección, no queremos pasar por alto, sin hacer aunque sea una breve mención, a las nuevas herramientas, implantadas, para el control de la calidad y que hacen de la calidad y la tecnología un dúo dinámico e inseparable.

Desde siempre la calidad del producto ha sido uno de los valores clave de Enusa cuya visión se basa en los pilares fundamentales de seguridad, calidad y capacidad productiva (en este orden). No olvidándonos, por supuesto, de cumplir con nuestro objetivo principal que es satisfacer las expectativas del cliente. Para ello en los últimos años, Enusa se ha focalizando en la mejora de la satisfacción del cliente basada en la identificación y cumplimiento de los CTQ (*Critical to Quality*) del cliente.

En la Figura 11 puede verse un esquema de los Sistemas de Control de Calidad más innovadores, pudiéndose distinguir entre los sistemas tecnológicos y las barreras administrativas.

Dentro de las nuevas aplicaciones de gestión desarrolladas, podemos destacar: el *software* de Gestión de las No Conformidades de Producto (INC) basado en un *work flow* que permite agilizar y controlar la gestión de las desviaciones del producto; *Pegaso*, que apoyándose en el sistema de gestión electrónico de INC permite la aceptación y retención del producto, marcando el producto afectado por la INC; y por último el Programa de Acciones Correctivas (PAC) cuyo objetivo es la gestión de acciones derivadas de cualquier evento identificado, estableciéndose un proceso integrado para el control y seguimiento de las acciones, desde su alta hasta su cierre definitivo. Dentro de dichas acciones pueden encontrarse tanto acciones correctivas, como acciones preventivas, determinadas por el GMCF (Grupo de Mejora de Calidad de Fabricación) que derivan de las propuestas de Mejora de los Grupos Operativos de Calidad (GOC).

En este punto no debemos olvidarnos de nuestro sistema de control de

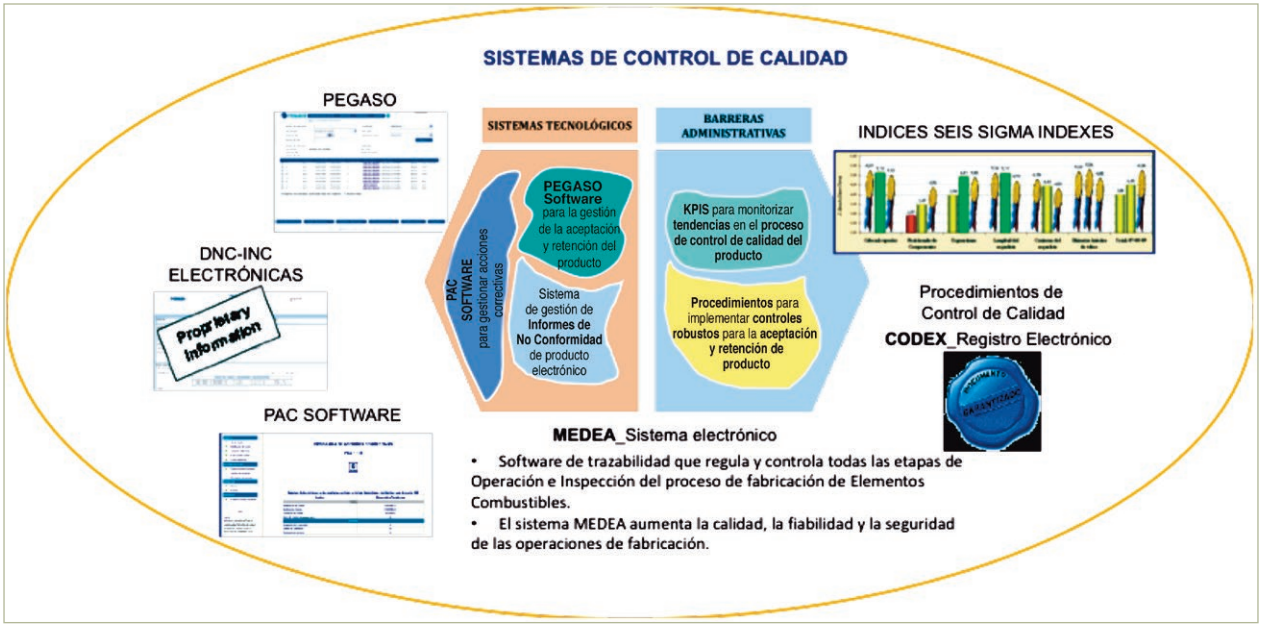

Figura 11. Sistemas de Control de Calidad.

la trazabilidad, llamado *Medea*, que inmerso en un proceso continuo de mejora, nos permite además de regular todas las etapas de operación e inspección del proceso de fabricación, aumentar la calidad, la fiabilidad y la seguridad de todas las operaciones.

En lo que se refieren a barreras administrativas, hay que destacar que en los últimos tiempos Enusa ha apostado por el MCRS *Management, Control and Reporting System* basado fundamentalmente en que toda la organización conoce lo que personalmente tiene que lograr, gestionar y/o controlar con el fin de que los principales objetivos del negocio se consigan.

Dentro del MCRS se definen una serie de indicadores clave de rendimiento (KPI) que permiten un seguimiento pormenorizado de todos los procesos críticos. En lo que se refiere a los KPI aplicables al seguimiento de la calidad del producto, éstos indicadores son definidos siguiendo la metodología 6 Sigma implantada en Enusa desde el año 1997.

Respecto a nuestro proceso documental hay que destacar la focalización a las necesidades del cliente, lo que se refleja en la emisión de la documentación de fabricación detallada para cada cliente.

CONCLUSIONES

Enusa mantiene unos procesos de fabricación robustos gracias a la experiencia acumulada de estos 30 años y a una actualización continua de los sistemas y equipos de fabricación e inspección que nos permite mantenernos en el mercado con la calidad requerida por nuestros clientes.