

METHODOLOGY TO QUANTIFY THE ECONOMIC IMPACT OF THE MANUFACTURING STANDARDS SELECTION WITHIN NUCLEAR POWER INDUSTRY

Rodríguez-Prieto, Álvaro; Camacho López, Ana M.; Sebastián Pérez, Miguel Ángel
ETSI INDUSTRIALES UNED

During the design of any building project of a structural element, it is important to analyze certain variables inherent to the selection of manufacturing codes or standards, which may affect project economics. In this work, the economic impact involved in selecting German (KTA standards) or American standards (ASME B&PV code) for the manufacture of nuclear reactor vessels for the nuclear industry are analyzed. These standards have been selected because they are, at present, of application to Spanish nuclear power stations. The methodology is based on an analysis of direct costs and an analysis of indirect costs arising from the selection of manufacturing standards of nuclear reactor pressure-vessels. In general, it has been concluded that the selection of ASME B&PV generates a lower cost compared to the selection of the KTA standards for the manufacture of nuclear reactor pressure-vessels.

Keywords: cost analysis; project; requirements; standards; manufacturing codes; nuclear power industry

METODOLOGÍA PARA CUANTIFICAR EL IMPACTO ECONÓMICO ASOCIADO A LA SELECCIÓN DE NORMATIVA DE FABRICACIÓN EN LA INDUSTRIA NUCLEAR

Durante la concepción de cualquier proyecto de construcción de un elemento estructural es de suma importancia analizar ciertas variables, intrínsecas a la selección de normativa de fabricación, que puedan afectar a la economía del proyecto. En este artículo, se analizar la repercusión económica que conlleva la selección de normativa alemana (normas KTA) o norteamericana (código ASME B&PV) para la fabricación de vasijas de reactor nuclear para la industria nuclear. Se han seleccionado estas normativas ya que son, en la actualidad, las de aplicación al parque nuclear español. La metodología se ha basado en un análisis de costes directos y en un análisis de costes indirectos derivados de la selección de normativa de fabricación de vasijas de reactor nuclear. Con carácter general, se ha podido concluir que la selección de ASME B&PV genera un coste menor asociado en comparación con la selección de las normas KTA para la fabricación de la vasija de un reactor nuclear.

Palabras clave: análisis de costes; proyecto; requisitos; normativa; código de fabricación; industria nuclear

Correspondencia: Álvaro Rodríguez Prieto - alvaro.rodriguez@invi.uned.es

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por la ayuda anual de la ETSII de la UNED de referencia 2016-ICF04.

1. Introducción

La seguridad es el aspecto más importante a tener en cuenta en las etapas de diseño y construcción de una central nuclear. Así, desde este punto de vista, uno de los componentes principales de una central nuclear es la vasija a presión del reactor que se construye principalmente a partir de aceros ferríticos, con exigencias específicas en cuanto a proceso de fabricación (IAEA TECDOC - 1442, 2005). Por ello, para asegurar su función de seguridad (IAEA, 2010), la fabricación e inspección en servicio de vasijas de reactor se lleva a cabo mediante códigos o normas de fabricación, entre los que destacan el código ASME B&PV (EEUU), el código RCC - MR (Francia) y las normas KTA (Alemania).

Particularizando al caso del parque nuclear español, en la actualidad, si se escoge el código ASME B&PV, se deben cumplir las directrices marcadas por las leyes 10CFR emitidas por la comisión de regulación nuclear de Estados Unidos (en inglés, Nuclear Regulatory Commission – NRC). Sin embargo, si se emplean las normas KTA, se deberá cumplir con las directrices indicadas en la Ley alemana de la energía nuclear, entre otras legislaciones de origen en materia de protección radiológica. Históricamente, se han desarrollado trabajos destacando la importancia que tiene articular un adecuado marco jurídico (Martín – Retortillo, 1963), que asegure la correcta supervisión del uso civil de la energía nuclear. Hoy en día, las reglamentaciones en materia de seguridad nuclear y radiológica tienden a homogeneizarse en todos los países del mundo, sin embargo no alcanzan una misma formulación legal, dado que ésta es competencia de los parlamentos nacionales. Esto se traduce en que actualmente existen todavía serias diferencias en las reglamentaciones nucleares de algunos países y por tanto en los requisitos tecnológicos de fabricación de componentes principales, que son debidas a las vicisitudes históricas vividas desde el comienzo de la era nuclear.

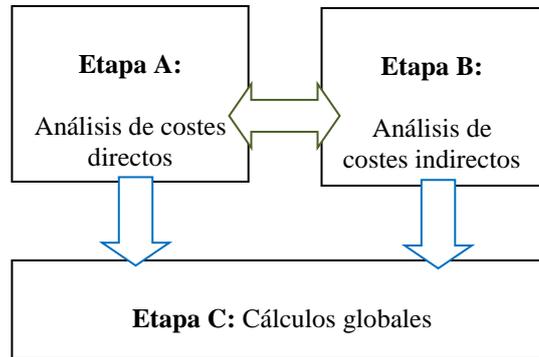
2. Objetivos

Dado que estas implicaciones afectan de manera sustancial a las fases de diseño y fabricación, se encuentran diferencias en cuanto a requisitos (Rodríguez-Prieto, Camacho y Sebastián, 2016 y 2013) que es necesario tener en cuenta a la hora de decantarse por una u otra normativa. Así, el objetivo del presente trabajo es analizar la repercusión económica que conlleva la selección de normativa alemana (normas KTA) o norteamericana (código ASME B&PV) para la fabricación de vasijas de reactor nuclear para la industria nuclear. Se han seleccionado estas normativas ya que son, en la actualidad, las de aplicación al parque nuclear español.

3. Metodología

La metodología se basa en un análisis de costes directos (etapa A), en un análisis de costes indirectos (etapa B) y totales (etapa C) derivados de la selección de normativa de fabricación de vasijas de reactor nuclear.

Figura 1: Desarrollo de la metodología para el estudio de la repercusión económica asociada a la selección de normativa de materiales



Por tanto, según se muestra en la figura 1, se procede a desarrollar las tres etapas:

En la etapa A, se procede a analizar ciertos costes directos asociados a la selección de normativa de fabricación, como son los derivados de la propia adquisición de los códigos o normas de fabricación y la propia compra del material. Se han descartado los costes asociados a los procesos involucrados en la construcción de la vasija, ya que no se considera que pueda haber diferencias económicas sustanciales debidas a requisitos disimilares de fabricación. En la etapa B, se analizan ciertos costes indirectos derivados de la selección de la normativa de fabricación. Estos son la realización de pruebas de lote del material de aporte, la compra de normas requeridas por los códigos o normativas de fabricación, la certificación de operadores de ensayos no destructivos y la homologación de procedimientos de soldadura y certificación de soldadores. La etapa C queda destinada a la realización de cálculos globales.

4. Resultados

A continuación se muestran los resultados a través del desarrollo de las etapas A, B y C.

4.1 Etapa A – Análisis de costes directos

Compra del código ASME B&PV y normas KTA

A continuación se indica el precio que supone la compra de secciones del código ASME B&PV, así como de normas KTA implicadas en el proceso de diseño, fabricación e inspección en servicio de una vasija de reactor. Las secciones y “Code Cases” involucrados del código ASME B&PV, así como su coste, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Secciones y “Code Cases” del código ASME B&PV, involucrados en el proceso de diseño, fabricación e inspección en servicio de una vasija de reactor, incluyendo su coste de adquisición

Sección de ASME B&PV	Coste (€)
Sección II (Materiales): Parte A (materiales férreos)	531,3
Sección II (Materiales): Parte C (materiales de aporte)	531,3
Sección III (Reglas de construcción de instalaciones nucleares) División 1 - Subsección NB - Clase 1	408,1
Sección III (Reglas de construcción de instalaciones nucleares: Componentes Clase I) División 1 -	446,6
Sección IX (Soldadura)	400,4
Sección XI (Inspección en servicio)	539
Code cases	535,15
TOTAL	3391,85

Por tanto, el precio total de las secciones del código necesarias para el diseño, fabricación e inspección en servicio de una vasija de reactor asciende a una cantidad de 3391,85 €. Por el contrario las normas KTA son normas de libre acceso a través de la página web KTA German (www.kta-gs.de), la adquisición de estas normas no supone ningún coste (tabla 2).

Tabla 2. Normas KTA involucradas en el proceso de diseño, fabricación e inspección en servicio de una vasija de reactor

NORMAS KTA
KTA 3201.1 (Materiales y formas de producto)
KTA 3201.3 (Fabricación)
KTA 1408.01 (Prueba de idoneidad de materiales
KTA 1408.02 (Prueba de recepción de materiales
KTA 1408.03 (Prueba de lote de materiales de
KTA 3201.4 (Inspección en servicio y monitorización operacional)
KTA 3203 (Vigilancia del comportamiento de los materiales bajo radiación)

Sin embargo, sí es necesaria la adquisición de las normas que son exigidas en las normas KTA, al igual que requiere el código ASME B&PV.

Coste del material

Para el cálculo de costes asociados a la compra de material, se han considerado los materiales SA - 508 Clase 3 forjado y SA-533 Tipo B Clase 1 especificados por el código ASME B&PV (2013) y los materiales forjados y laminados designados como DIN 20MnMoNi55 según las normas KTA (KTA 3201.1, 1998). Los materiales objeto de estudio son considerados como materiales equivalentes (Bringas, 2002; Stahlschlüssel, 2013) y son

materiales de empleo habitual en los reactores de segunda y tercera generación que actualmente están en operación en el parque nuclear mundial.

A modo de ejemplo, las dimensiones de la vasija del reactor (PWR) de la Central Nuclear de Trillo (tecnología alemana) y la Central Nuclear de Almaraz (tecnología americana), se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones de la vasija del reactor de la C.N. de Trillo y de la C.N. de Almaraz (Fuente: CNAT)

DIMENSIONES DE LA VASIJA	DIÁMETRO EXTERIOR (mm)	ESPESOR (mm)	ALTURA (mm)	PESO APROXIMADO (kg)
C.N. TRILLO	4878	245	11039	429.000
C.N. ALMARAZ	4000	250	11000	429.000

Tal y como se puede observar, con los datos mostrados en la tabla 3, el material necesario para la fabricación de la vasija y por tanto, su coste asociado, dependen de las dimensiones de la vasija; en todo caso éstas dependen del diseño, el cuál en este sentido no se ve exclusivamente influenciado por la selección de normativa. De esta forma la selección de normativa no afecta directamente a la cantidad de material necesario para fabricar la misma. En relación a las diferencias entre costes del material empleado en el recubrimiento interno anticorrosión, se ha comprobado que no hay diferencias significativas entre los precios de los materiales especificados bajo norma alemana o norteamericana.

Sin embargo, los materiales SA - 508 Clase 3 y SA - 533 Tipo B Clase 1, así como el material DIN 20MnMoNi55 (material forjado y laminado) presentan distintos precios (tabla 4), por lo que, el coste total asociado al material forjado y laminado presenta sustanciales diferencias. Para el cálculo del coste total asociado al material forjado y laminado especificado por las normas KTA, se ha procedido a multiplicar el peso total de la vasija (429.000 kg) por el coste por kilogramo del material (5€/kg), obteniéndose un coste total que asciende a 2.145.000 €.

Por otro lado, para el coste total asociado al material forjado y laminado especificado por el código ASME B&PV, ha resultado necesario realizar varias aproximaciones para poder estimar el peso total de los componentes forjados (toberas y bridas) y el peso de las partes laminadas. Se ha considerado que el recipiente presenta geometría cilíndrica (con superficie $S = \pi \cdot d \cdot l$ y volumen $V = \pi \cdot d \cdot l \cdot e$; donde d corresponde con el diámetro interior, l con la altura del cilindro y e con el espesor de la vasija) y se construye de material laminado. Y adicionalmente se le suman componentes forjados hasta completar el peso esperado (429.000 kg).

De esta manera, y considerando la densidad del acero (ρ) constante e igual a 7.850 kg/m³, se obtiene que la masa de material laminado, para un espesor de 0,245 m (245 mm, indicado en la tabla 3) es de 324.205 kg, por lo que la masa de material forjado ascendería a 104.795 kg.

Multiplicando la masa (kg) por el coste del material (€/kg), se obtiene el precio del material forjado y laminado necesario para la fabricación de la vasija. En la tabla 4 se presenta el resultado obtenido en el caso del código ASME B&PV y se compara con el resultado obtenido para el material especificado por las normas KTA.

Tabla 4. Cálculo del coste total asociado a la compra del material

NORMA/CÓDIGO	MATERIAL FORJADO	MATERIAL LAMINADO	TOTAL
ASME B&PV	7 €/kg x 104.795 kg= <u>733.565 €</u>	2 €/kg x 324.205 kg= <u>648.410 €</u>	1.381.975 €
KTA	5 €/kg x 429.000 kg = <u>2.145.000 €</u>		2.145.000 €

Analizando el resultado mostrado en la tabla 4, se concluye que el coste asociado a los materiales KTA resulta ser un 55% mayor que el coste asociado a los materiales ASME B&PV.

4.2 Etapa B – Análisis de costes indirectos

Pruebas de lote del material de aporte para el proceso de fabricación

De acuerdo con los requisitos especificados por el código ASME B&PV y las normas KTA, se procede a elaborar una tabla para su valoración conjunta. Para cuantificar económicamente la diferencia entre la totalidad de ensayos requeridos sobre los materiales de aportación especificados en dichas normativas, se procede a asignar coste a cada uno de los ensayos requeridos, para cuantificar la diferencia entre lo requerido por ambas normativas (tabla 5).

Tabla 5. Estimación económica de los costes unitarios por ensayo asociados al ensayo de materiales de aporte según ambas normativas

TIPO DE ENSAYO	KTA (€)	ASME B&PV (€)
Químico	85	85
Ferrita \bar{o}	35	-
Fisuras	115	-
Corrosión intergranular	135	-
Tracción T ^a amb	87,20	87,20
Tracción en caliente	167,40* ¹	-
Impacto	412,40* ²	-
Flexión	60,70	-
Doblado	-	50,20
Metalográfico	85,50	-
Dureza	77,70	-
Radiográfico	104,50	104,50
TOTAL	785,60	326,90

Nota (*¹): Ensayo a 125°C, 250°C y 350°C.

Nota (*²): Ensayo a 25°C, 125°C, 250°C y 350°C.

El análisis realizado pone de manifiesto que la validación de material de aporte según lo exigido por las normas KTA resulta ser un 42% más costosa que la validación exigida por ASME B&PV, siendo la diferencia, 458,70€.

Compra de normas

Normas europeas (de acuerdo con las normas KTA)

En la tabla 6 se calcula el coste asociado a la compra de normas empleadas en el análisis.

Tabla 6. Coste total asociado a normas europeas requeridas por KTA para el diseño y fabricación de vasijas de reactor (Fuente: BEUTH - DIN y AENOR)

NORMAS	COSTE(€)
DIN EN 875 (1995)	48,70
DIN EN 910 (1996)	98,60
DIN EN 10002 - 1 (2001)	136,50
DIN EN 10002 - 5 (1991):	98,60
DIN EN ISO 15792 - 1 (2008)	69,33
ISO 17641 - 2 (2005)	76,90
UNE-EN 1600 (1998)	30,45
UNE-EN ISO 5817 (2009)	35,55
UNE-EN ISO 6789 (2004)	32,96
UNE-EN ISO 6847 (2002)	20,50
UNE-EN 10088 - 3 (2008)	82,80
UNE-EN 10095 (2000)	36,64
UNE-EN 10204 (2006)	27,08
UNE-EN ISO 14343 (2010)	32,19
UNE-EN ISO 15609 - 1 (2005)	28,33
UNE-EN ISO 15614 - 1 (2012)	17,50
TOTAL	872,63

De acuerdo con el planteamiento del apartado se presentan los costes derivados de la compra de normas, de tal manera que el coste total asociado a la compra de normas DIN, UNE-EN y UNE-EN ISO asciende a la cantidad de 872,63€.

Normas norteamericanas (de acuerdo con el código ASME B&PV)

De forma análoga, se ha procedido a estimar económicamente el coste asociado a la compra de normas ASTM (tabla 7).

Tabla 7. Coste total asociado a la compra de normas norteamericanas requeridas por el código ASME B&PV para el diseño y fabricación de vasijas de reactor (Fuente: ASTM)

NORMAS	COSTE(€)
ASTM A 20 / A 20M	43,84
ASTM A 370 (2012)	49,23
ASTM A 788/ A 788M	35,38
ASTM E8/ E8M (2013)	49,23
ASTM E 23 (2012)	43,84
ASTM E 290 (2013)	35,38
TOTAL	256,90

La diferencia entre el coste total asociado a la compra de normas requeridas por ambas normativas es sustancialmente importante. Siendo la compra de normas, en el caso de KTA, un 173% más costosa que la compra de normas exigida por ASME B&PV.

Certificación de operadores de Ensayos no destructivos para la detección de defectos de fabricación

El código ASME B&PV exige que los operadores de ensayos no destructivos se cualifiquen de acuerdo con la práctica recomendada SNT - TC - 1A (2011) emitida por la sociedad americana de ensayos no destructivos (en inglés, American Society for Non Destructive Testing - ASNT). Así mismo, tal y como vimos anteriormente, las normas KTA recomiendan el empleo de la norma europea EN 473 (2009) para la cualificación de operadores de ensayos no destructivos.

Para la cualificación de operadores de ensayos no destructivos según ASNT, según exige el código ASME B&PV, se requieren una serie de requisitos mínimos de formación y experiencia, tal y como se representa en la tabla 8. Los requisitos presentados en esta tabla corresponden a la obtención del nivel II de acuerdo a la ASNT, para lo cual es necesario, previamente, cumplir con los requisitos mínimos correspondientes al nivel I; de tal forma que, los requisitos presentados en la tabla, corresponden a la suma de los correspondientes al nivel I y nivel II.

Tabla 8. Requisitos mínimos de formación y experiencia para la obtención directa del nivel II como operador de ensayos no destructivos de acuerdo con ASNT (en base a SNT - TC – 1A, 2011)

ENSAYO	FORMACIÓN (HORAS)	EXPERIENCIA MÍNIMA (HORAS)
Ultrasonidos	80	880
Ultrasonidos TOEFD	104	960
Ultrasonidos - Phased	120	960
Radiografía	80	880
Radiografía digital	104	960
Partículas Magnéticas	20	320
Líquidos Penetrantes	12	240
Ondas guiadas	40	120

A continuación, se realiza un cálculo de costes asociados al proceso de obtención de certificación de operadores de ensayos no destructivos, teniendo en cuenta el coste por hora de formación (ya que según la norma SNT - TC1A el formador puede ser personal interno experimentado) y el coste por hora de los alumnos o futuros operadores.

La sistemática empleada para el cálculo del gasto total englobando las horas de formación y experiencia mínima requerida, será la siguiente:

- El coste de la hora de trabajo se ha fijado en 45 €/h, a efectos de cálculo, ya que se considera que el alumno mientras se encuentra en periodo de formación realizando periodos de acompañamiento, no participa en la facturación de la empresa, por lo que es un gasto a asumir y que es considerado en el cálculo.
- Se ha considerado que el coste por hora referente a la formación de un alumno se puede obtener como el coste del alumno (45 €/h), más el coste del formador dividido entre un número de 20 alumnos ($60 \text{ €/h} / 20 \text{ alumnos} = 3 \text{ €/h}$ por cada alumno). De tal manera que el coste de formación será de 48 €/h.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, y tras realizar los cálculos pertinentes, se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Coste total para la obtención directa del nivel II como operador de ensayos no destructivos de acuerdo con ASNT

ENSAYO	COSTE TOTAL
Ultrasonidos	43.440
Ultrasonidos TOEFD	48.192
Ultrasonidos - Phased	48.960
Radiografía	43.440
Radiografía digital	48.192
Partículas Magnéticas	15.360
Líquidos Penetrantes	11.376
Ondas guiadas	7.320

A raíz de este análisis de carácter económico, se puede observar cómo el ensayo más caro a realizar es el ensayo por ultrasonidos *Phased Array*. Ensayo que si bien no está exigido como requisito de fabricación de la vasija, sí es un ensayo ampliamente empleado en la inspección en servicio de la vasija. Al contrario ocurre con el ensayo de ondas guiadas que se emplea en la detección de defectos internos en tuberías de conexión del sistema primario, que presenta el menor coste de todos. Si recurrimos a los ensayos convencionales, exigidos en las especificaciones de material SA - 508 y SA - 533, los ensayos más costosos corresponden al ensayo ultrasónico y radiográfico, siendo la modalidad digital de este la más cara, aunque no suele ser de empleo para este tipo de tareas.

Análogamente al análisis realizado, se procede a definir la sistemática para el cálculo de costes asociados a la cualificación y certificación de operadores de ensayos no destructivos, de acuerdo con la norma UNE-EN 473 (2009).

A diferencia de lo exigido por la norma SNT - TC1A, la norma UNE-EN 473 requiere que la formación para la cualificación y certificación de operadores de ensayos no destructivos sea certificada por un organismo externo mediante examen, que en este caso, corresponde con CERTIAND, perteneciente a la Asociación Española de Ensayos No Destructivos (AEND). Por tanto, es necesario tener en cuenta este costo que afecta finalmente al coste total referido a la cualificación y certificación, empleándose, los siguientes datos de partida:

- El coste para la obtención de la certificación en cualquiera de las técnicas asciende a 926 €; sin embargo para la obtención de la certificación en varias técnicas, el precio, por cada técnica se abarata. En este caso, se ha empleado la oferta que se ofrece para la certificación en cuatro técnicas, obteniéndose un precio por técnica de 882,5 €.
- El coste de la hora de trabajo se ha fijado en 45 €/h, a efectos de cálculo, ya que se considera que el alumno mientras se encuentra en periodo de formación, realizando periodos de acompañamiento, no participa en la facturación de la empresa, por lo que es un gasto a asumir y que es considerado en el cálculo.
- Se ha considerado que el coste por hora relacionado con la formación de un alumno se puede obtener como el coste del alumno (45 €/h), más el coste del formador dividido entre un número de 20 alumnos ($60 \text{ €/h} / 20 \text{ alumnos} = 3 \text{ €/h}$ por cada alumno), de tal manera que, el coste de formación será de 48 €/h.

De igual manera, siguiendo la misma metodología empleada en el análisis del proceso según la norma SNT - TC1A, en el caso de la norma UNE-EN 473 se presentan los requisitos de formación y experiencia mínima requerida en la tabla 10.

Tabla 10. Requisitos mínimos de formación y experiencia para la obtención directa del nivel II como operador de ensayos no destructivos de acuerdo con ASNT (en base al procedimiento DINF - PCO3 - 2 (AEND), 2011)

ENSAYO	FORMACIÓN	EXPERIENCIA MÍNIMA
Ultrasonidos	144	1.920
Radiografía	152	1.920
Partículas	40	640
Líquidos	40	640
Corrientes	104	1.920
Inspección visual	40	640

Teniendo en cuenta los datos de partida anteriormente indicados, se procede al cálculo del coste total, de acuerdo con la tabla 11.

Tabla 11. Coste total para la obtención directa del nivel II como operador de ensayos no destructivos de acuerdo con lo especificado en la norma UNE-EN 473 y los precios aportados por la AEND

ENSAYO	COSTE TOTAL
Ultrasonidos	94.195
Radiografía	94.579
Partículas	31.603
Líquidos	31.603
Corrientes inducidas	92.275
Inspección visual	31.603

De forma similar al estudio de la norma SNT - TC1A, se observa cómo los ensayos radiográfico y ultrasónico son los más caros. El ensayo por corrientes inducidas, si bien no se exige en la especificación DIN 20MnMoNi55 ni en las normas KTA, suele ser de empleo en la inspección en servicio de envolveres.

Para concluir, se realiza una comparación económica de los cuatro ensayos convencionales requeridos en las especificaciones de materiales tanto base como de aportación, según se especifica en ASME B&PV y KTA. Para ello, se ha elaborado la tabla 12.

Tabla 12. Comparativa del coste total asociado a la cualificación y certificación del personal de operación de ensayos no destructivos, de acuerdo con las normas SNT - TC1A y UNE-EN 473

	RADIOGR AFÍA (€)	ULTRASONID OS (€)	PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (€)	LÍQUIDOS PENETRANT ES (€)	TOTAL (€)
UNE-EN 473	94.579	94.195	31.603	31.603	251.980
SNT-TC1A	43.440	43.440	15.360	11.376	113.616
Diferencia (€)	51.139	50.755	16.243	20.227	138.364
Diferencia (%)	117,7	116,8	105,7	177,8	121,8

Por tanto, del estudio se desprende que la cualificación y certificación para el personal que va a realizar ensayos no destructivos exigida según las normas KTA, de acuerdo con la norma UNE-EN 473 (2009), es un proceso sustancialmente más costoso que el exigido por el código ASME B&PV de acuerdo con lo exigido en la norma SNT - TC - 1A (ASNT).

La diferencia económica entre ambos asciende hasta 138.364 €. Sin embargo, los requisitos de la norma UNE-EN 473, en cuanto a formación y número de horas mínimas de experiencia son mucho más estrictos. Es importante tener en cuenta de cara a una adecuada selección de normativa de fabricación, cuáles son las variables técnicas y económicas más importantes, ya que sin lugar a dudas, existen diferencias relevantes, para encontrar un equilibrio adecuado entre una decisión de carácter económico y una decisión en la cual pesen los factores técnicos.

Como conclusión global se puede extraer que tal y como demuestra la práctica, la formación y experiencia mínimas exigidas por la norma SNT - TC - 1A son suficientes para el correcto desempeño de las actividades, para las cuales habilita. Por lo que, bajo este análisis, se consideran suficientes estos requisitos. Por tanto, teniendo en cuenta este juicio, la elección del código ASME B&PV repercute en el ahorro de 138.364 €, en relación a la cualificación y certificación del personal que realiza ensayos no destructivos.

Homologación de procedimientos de soldadura y certificación de soldadores

Para la homologación de procedimientos de soldadura y certificación del soldador de cara al desempeño de las tareas de soldadura a realizar para la fabricación de la vasija del reactor, se deben llevar a cabo una serie de ensayos mecánicos y macrográficos, tal y como determinan ASME B&PV y KTA. Así, en la tabla 13 se presentan los costes asociados a cada uno de los ensayos requeridos por la normativa analizada.

Tabla 13. Coste asociado a los ensayos para la homologación del procedimiento de soldadura

ENSAYO	ASME	KTA
Ensayo visual	0	0
Ensayo radiográfico	104,50	104,50
Ensayo de doblado	50,20	50,20
Ensayo de rotura	50,20	50,20
Ensayo de tracción	87,20	87,20
Ensayo superficial de grietas (Líquidos penetrantes)	75,20	75,20
Macrografía	-	85,50
Dureza	-	77,70
TOTAL	367,30	530,50

A la vista del cálculo mostrado en la tabla 13, se observa que las normas KTA exigen asumir un coste mayor para la homologación del procedimiento de soldadura, a lo que exige el código ASME B&PV. En este caso, las normas KTA exigen que el gasto total relativo a este concepto sea un 44,43% mayor que lo especificado por ASME B&PV para este mismo concepto. Resultando una diferencia de 162,60 €.

4.3 Etapa C – Tratamiento de datos

De acuerdo con los resultados obtenidos se procede a calcular el monto total (tabla 14) asociado a las operaciones derivadas de la selección de normativa de fabricación, que han sido consideradas en el análisis.

Tabla 14. Coste total asociado a los costes directos e indirectos considerados

TIPO DE COSTE	COSTE S/ ASME (€)	COSTE S/
Código/Normativa	3.391,85	0
Coste del material	1.381.975	2.145.000
Pruebas de lote del material de aporte	326,90	785.60
Compra de normas requeridas por el Código/Normativa	332,77	872.73
Certificación de operadores de ensayos no destructivos	113.616	251.980
Homologación de procedimientos de soldadura y certificación de	367.30	530.50
TOTAL	1.499.829,82	2.399.168,73

Observando el resultado final, se comprueba que el coste derivado de la selección de normas KTA es un 60% superior al coste derivado de la selección de ASME B&PV, por lo que desde un punto de vista económico, el empleo del código ASME B&PV supone un considerable ahorro, con respecto al empleo de las normas KTA.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado un análisis de la repercusión que conlleva la selección de normativa sobre la fabricación de la vasija de un reactor nuclear, aportando un estudio económico que ha permitido comparar algunas diferencias de costes que se generan debidos a la selección de una normativa u otra.

Se ha podido comprobar cómo la selección de normativa de fabricación afecta de manera sustancial a las fases de diseño y fabricación, ya que se encuentran diferencias en cuanto a requisitos que deben tenerse en cuenta a la hora de decantarse por una u otra normativa.

Esta disimilitud entre ambas normativas se traduce en una diferencia de costos en relación al cumplimiento de los distintos requisitos especificados por cada uno de ellos, de cara a la consecución de ensayos, homologación de procedimientos, así como en relación a la certificación del personal para la realización de trabajos de soldadura e inspección por Ensayos No Destructivos.

Con carácter general, se puede concluir que las normas KTA son sustancialmente más restrictivas en relación a la realización de ensayos y certificaciones y por tanto suponen un coste superior a lo que supone la elección del código ASME B&PV. Así pues, el coste total asociado al empleo de las normas KTA (alrededor de 2,4 M€), en base a las hipótesis tenidas en cuenta para el análisis, resulta ser un 60% superior al asociado al empleo del código ASME B&PV (1,5 M€).

Con respecto a la metodología propuesta, es importante destacar que ésta puede aplicarse al análisis de cualquier normativa de fabricación con interés industrial.

5. Referencias

- ASME Boiler and Pressure Vessel (B&PV) Code (2013), American Society of Mechanical Engineers, New York.
- DIN EN 875 (1995): "Destructive tests on welds in metallic materials - Impact tests - Test specimen location, notch orientation and examination". German standards, Berlin (Germany).

- DIN EN 910 (1996): "Destructive test on welds in metallic materials - Bend tests". German standards, Berlin (Germany).
- DIN EN 10002 - 1 (2001): "Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of testing at ambient temperature". German standards, Berlin (Germany).
- DIN EN 10002 - 5 (1991): "Tensile testing of metallic materials; method of testing at elevated temperature". German standards, Berlin (Germany).
- DIN EN ISO 15792 - 1 (2008): "Welding consumables - Test methods - Part 1: Test methods for all - weld metal test specimens in steel, nickel and nickel alloys" (ISO 15792 - 1: 2000). German standards, Berlin (Germany).
- International Atomic Energy Agency (IAEA), (2003): "Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety – Primary components in PWRs", IAEA Publications, Vienna (Austria).
- International Atomic Energy Agency (IAEA) TECDOC - 1442 (2005): "Guidelines for prediction of irradiation embrittlement of operating WWER - 440 reactor pressure vessels". International Atomic Energy Agency Publications, Vienna (Austria).
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2010): "Power reactor information system (PRIS)". International Atomic Energy Agency Publications, Vienna (Austria).
- ISO 17641 - 1 (2004): "Destructive test on welds in metallic materials – Hot cracking test for weldments - Arc welding processes. Part 1: General". International Standards Organisation, Geneva (Switzerland).
- J.E. Bringas (Ed.), 2002: "Handbook of comparative world steel standards". American Society for Testings and Materials, Philadelphia.
- KTA Safety Standard 1408.1 (2008): "Quality assurance of weld filler metals and welding consumables for pressure and activity retaining systems in nuclear power plants. Part 1: Qualification testings". Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Germany.
- KTA Safety Standard 1408.2 (2008): "Quality assurance of weld filler metals and welding consumables for pressure and activity retaining systems in nuclear power plants. Part 2: Manufacturing". Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Germany.
- KTA Safety Standard 1408.3 (2008): "Quality assurance of weld filler metals and welding consumables for pressure and activity retaining systems in nuclear power plants. Part 3: Processing". Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Germany.
- KTA Safety Standard 3201.1 (1998): "Components of the Reactor Coolant Pressure Boundary of Light Water Reactors. Part 1: Materials and Product Forms". Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Germany.
- KTA Safety Standard 3201.3 (2007): "Components of the reactor coolant pressure boundary of light water reactors - Part 3: manufacture". Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Germany.
- KTA Safety Standard 3201.4 (2010): "Components of the reactor coolant pressure boundary of Light Water Reactors - Part 4: In - Service Inspections and operational monitoring". Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Germany.
- KTA Safety Standard 3203 (2001): "Surveillance of the irradiation behaviour of reactor pressure vessel materials of LWR facilities". Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Germany.
- Martín – Retortillo L. (1963): "Energía nuclear y derecho". CEPC, Madrid (España).

- Rodríguez Prieto A., Camacho López A.M., Sebastián M.A. (2013): "Propuesta para cuantificar la eficacia de requisitos tecnológicos de materiales estructurales para la industria nuclear". XVII Congreso internacional de dirección e ingeniería de proyectos, 17-19 de Julio, 1324-1336. Logroño, España.
- Rodríguez-Prieto A., Camacho A.M. and Sebastián, M.A. (2016): "Material selection criteria for nuclear power applications: a decision algorithm". JOM, 68 (2), 496-506.
- SA-508/SA-508M (2013): "Specification for quenched and tempered vacuum – treated carbon and alloy steel forgings for pressure vessels". ASME B&PV II Section A. American Society of Mechanical Engineers, New York (USA).
- UNE-EN 473 (2009): "Ensayos no destructivos. Cualificación y certificación del personal que realiza ensayos no destructivos. Principios generales". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN 1600 (1998): "Consumibles para el soldeo. Electrodo revestidos para el soldeo manual por arco de aceros inoxidable y resistentes al calor. Clasificación". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN 10088 - 3 (2008): "Aceros inoxidable. Parte 3: Condiciones técnicas de suministro para productos semi - acabados, barras, alambres, alambre, perfiles y productos brillantes de aceros resistentes a la corrosión para usos generales". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN 10095 (2000): "Aceros y aleaciones de níquel refractarias". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN 10204 (2006): "Productos metálicos. Tipos de documentos de inspección". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN ISO 5817 (2009): "Solder. Uniones soldadas por fusión de acero, níquel, titanio y sus aleaciones (excluido el soldeo por haz de electrones). Niveles de calidad para imperfecciones". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN ISO 6789 (2004): "Herramientas de maniobra para tornillos y tuercas. Herramientas dinamométricas manuales. Requisitos y métodos de ensayo para verificar la conformidad del diseño, de la calidad y del procedimiento de recalibración". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN ISO 6847 (2002): "Consumibles para el soldeo. Ejecución de un depósito de metal de soldadura para su análisis químico". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN ISO 14343 (2010): "Consumibles para el soldeo. Electrodo de alambre, electrodo de banda, alambres y varillas para el soldeo por fusión de aceros inoxidable y resistentes al calor. Clasificación". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN ISO 15609 - 1 (2005): "Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 1: Solder por arco". AENOR, Madrid (España).
- UNE-EN ISO 15614 - 1 (2012): "Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Ensayo de procedimiento de soldeo. Parte 1: Solder por arco y con gas de aceros y soldeo por arco de níquel y sus aleaciones". AENOR, Madrid (España).
- SNT - TC - 1A (2011): "Personnel qualification and certification in non -destructive testing". American Society for Nondestructive Testing, Columbus (USA).
- Stahlschlüssel (Key to steel), 2013. Verlag, Berlin.