



# DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO PARA INSPECCIÓN AUTOMATIZADA DE UNIONES SOLDADAS EN TUBERÍAS DE PLÁSTICO. PROYECTO EUROPEO TESTPEP

R. Rodríguez<sup>1</sup> y M. Trounghton<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, <sup>2</sup>TWI

## RESUMEN

Las tuberías de plástico ofrecen avances significativos sobre otros materiales como acero, cobre y hormigón para el transporte de fluidos como gas natural, agua y líquidos corrosivos.

Actualmente, la mayor parte de las tuberías de distribución de gas y agua en Europa son de plástico, o se ha previsto su sustitución, en un futuro inmediato, por otras del mencionado material. Muchas de las fugas en esas tuberías de plástico tienen su origen en la fusión inadecuada de las uniones soldadas. El mejor método para atenuar el riesgo de fugas, y mantener la calidad de las uniones soldadas en las citadas tuberías, es inspeccionarlas previamente a su puesta en servicio. Sin embargo, no hay ningún método de END aceptado para el ensayo de tuberías de plástico. Esto ha restringido el uso de estos sistemas de tuberías para aplicaciones más exigentes, como es el caso de la industria nuclear, como consecuencia de la falta de confianza en su fiabilidad a largo plazo.

El principal objetivo del proyecto TestPEP, el cual es parte del Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea, es diseñar y construir un único instrumento que pueda ser usado para inspeccionar uniones de tubos realizadas a tope y por electrofusión de tuberías de polietileno con diámetros hasta 1.000 mm. Se requerirá que el instrumento tenga suficiente memoria para almacenar los datos de una inspección y descargarlos en un ordenador. El prototipo del equipo diseñado y construido como parte del proyecto será evaluado en condiciones de laboratorio y de campo.

**PALABRAS CLAVE:** Ultrasonidos, soldadura, Phased Array, plásticos, tuberías.

## 1. ANTECEDENTES

Los tubos de plástico ofrecen ventajas significativas sobre otros materiales como acero, cobre y hormigón, para el transporte de líquidos como gas natural, agua y efluentes líquidos corrosivos. No se corroe; tiene una vida prolongada durante el servicio, con sustituciones menos frecuente; su instalación es menos costosa debido a su flexibilidad y poco peso; se producen menos fugas debido al proceso de soldadura. Sin embargo, su uso generalizado está siendo restringido por la falta de un método fiable de evaluación no destructiva (END) para las uniones soldadas, así como la falta de criterios de aceptación y rechazo. Las fugas en tuberías no sólo causan grandes gastos de reparación, sino que además pueden tener consecuencias desastrosas para el medio ambiente e incluso ocasionar la pérdida de vidas.

Aunque existen normas europeas para la inspección volumétrica de soldaduras de tubería plástica hay una falta de sistemas comercialmente disponibles para la inspección de las soldaduras. Todas las tuberías de acero de gran diámetro para el transporte de gas natural y GLP están sujetos a inspección volumétrica. La mejor práctica actualmente para la inspección de las soldaduras de acero es la utilización de ultrasonidos *phased array*. Desde esta evidencia está claro que la industria de tubería plástica queda muy por detrás de la industria de tubería de acero. La razón principal es porque el plástico es un material difícil inspeccionar debido a sus propiedades acústicas específicas de alta atenuación y baja velocidad ultrasónica.



Se han realizado varios estudios para desarrollar un método fiable de ensayos no destructivos para uniones soldadas de plásticos. Los estudios se han centrado en las dos principales técnicas de soldadura para tubos plástico, electrofusión (EF) y soldadura a tope (BF). En los últimos años, la tecnología de ultrasonidos *phased array* (PAUT) ha sido considerada para evaluar la integridad de los accesorios EF [1, 2]. Sin embargo, estos estudios se concentraron en tuberías con diámetros de 125 y 250 mm.

La principal ventaja con el uso de *phased array* sobre estas uniones es que la zona de fusión longitudinal, en la dirección de tubería, está cubierta por barrido electrónico de la sonda y sólo es necesaria la exploración mecánica en la dirección circunferencial. Esta solución ofrece enormes ventajas en tiempo de inspección y a la hora de interpretación de datos.

Las uniones a tope BF han sido examinadas mediante transductores de ultrasonidos convencionales [3, 4, 5]. Sin embargo, debido a la geometría de las uniones BF se requiere una combinación de varias técnicas de ultrasonidos para lograr una cobertura suficiente de la zona de fusión. Las técnicas que se han empleado incluyen pulso-eco, tándem, ondas reptantes y del tiempo de vuelo difracción (TOFD).

En los últimos años, se han realizado estudios para inspeccionar las uniones BF utilizando PAUT [6, 7]. La principal técnica utilizada fue el pulso-eco, consiguiéndose una representación sectorial de la zona de fusión mediante el barrido con diferentes ángulos.

Actualmente, los sistemas de inspección ultrasónica comerciales para tuberías de plástico son de América del Norte y Corea del Sur [8, 9]. El sistema estadounidense se limita a las soldaduras BF y utiliza TOFD s en lugar de *phased array* y, como consecuencia no es aplicable a configuraciones más complejas de soldadura tales como codos, reductores y tes. El sistema coreano se limita a uniones EF y no tiene registro de datos.

Además de las técnicas de ultrasonidos, para el examen de tubos de plástico, han sido considerados otros métodos de ensayos no destructivos, incluyendo termografía e interferometría con microondas. Sin embargo, no se ha demostrado la validez de estas técnicas.

El proyecto TestPEP forma parte del 7º programa marco de la Unión Europea. El coordinador del proyecto es el TWI siendo los miembros actuales los que se muestran en la tabla 1.

<b>Asociaciones industriales/Industry Associations</b>	<b>Centros de investigación/Research Organisations</b>
European Federation for Welding, Joining and Cutting (Portugal) Asociación Española de Ensayos no Destructivos (Spain) Surface Mount and Related Technologies (UK) Pipeline Industries Guild (UK) Associazione Italiana Prove non Distruttive (Italy)	TWI (UK) Hessel Ingenieurtechnik (Germany) Kaunas Technical University (Lithuania) Consorzio Catania Ricerche (Italy)
<b>Fabricantes/Manufacturers</b>	<b>Usuarios finales/End Users</b>
Vermor (France) Isotest Engineering (Italy) M2M (France) Plasflow (UK)	E.ON Ruhrgas (Germany/Alemania) British Energy (UK/Reino Unido)

Tabla 1. Composición del consorcio del proyecto

El proyecto TestPEP pretende el desarrollo de técnicas y equipos de ensayos no destructivos mediante ultrasonidos *phased array* para el examen volumétrico de uniones soldadas en tubos de plástico hasta 1 m de diámetro. Además, el proyecto desarrollará un sistema de inspección automatizada que será capaz de inspeccionar las uniones a tope de tubería con tubería y de tubería con accesorios en diversos materiales plásticos y diámetros entre 90 mm y 1.000 mm.

Un objetivo fundamental del proyecto es desarrollar un sistema de inspección que sea resistente y fácil de utilizar. El concepto de este proyecto es disponer de un instrumento de caja negra con una simple conexión *ethernet* para descargar los datos registrados y



proporcionar la necesaria solidez de la sonda de ultrasonido *Phased Array*, de tal modo que, a través de un análisis semiautomático, se obtenga cómo respuesta la aceptación/rechazo de las soldadura y el sistema pueda ser operado por el personal habitual de tendido de tuberías.

El desarrollo se hará para uniones soldadas que contienen discontinuidades conocidas. Se analizarán los datos para determinar los límites de detección para cada técnica. En paralelo, se establecerá la importancia de la cantidad y tamaño de defecto en relación con los requerimientos de servicio. Esto se logrará mediante pruebas mecánicas a largo plazo de las uniones que contienen discontinuidades conocidas y la comparación con los resultados obtenidos para soldaduras que no contienen discontinuidades.

El prototipo del equipo diseñado y construido como parte de este proyecto se evaluará en condiciones de laboratorio y de campo.

## 2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto se estructura en 8 paquetes de trabajo según se muestra en la figura 1.

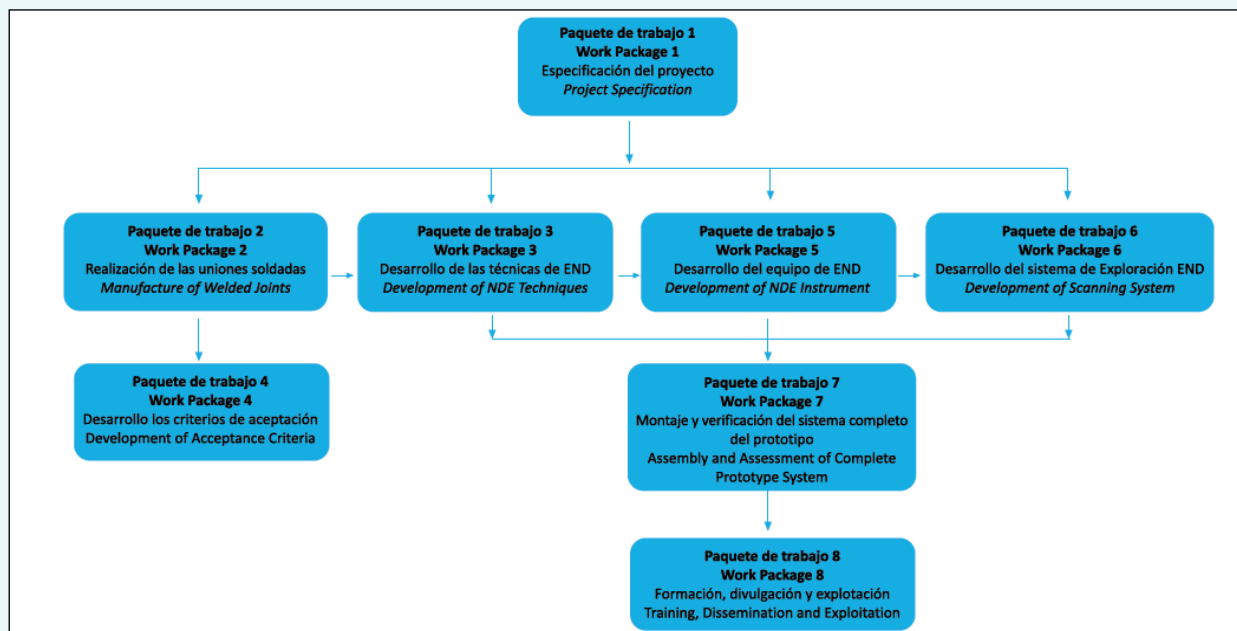


Figura 1. Esquema del proyecto

### Paquete de Trabajo 1. Especificación del proyecto.

Las asociaciones industriales que forman parte del consorcio han realizado estudios entre sus miembros a fin de definir los materiales plásticos (p. e. PE, PP, PVC, PVDF y ABS), rango de tamaños de los tubos y tipos de juntas (p.e. fusión a "a tope", electrofusión, tubo-a tubo, tubo-a-accesorio) que son de más interés para las compañías europeas involucradas en la industria de los tubos de plástico.

Asimismo, se han investigado los principales tipos de discontinuidades que pueden aparecer durante la soldadura de tubos de plástico en campo.

También es esencial que el sistema de END TestPEP desarrollado (equipo, palpadores *phased array*, técnicas y software de proceso de datos) esté directamente relacionado con las necesidades del mercado. Por esta razón, las asociaciones industriales deberán realizar estudios entre sus miembros a fin de desarrollar una especificación funcional para los sistemas de END.



Con las 72 respuestas obtenidas desde 10 países diferentes se establece que:

- En el 82 % de los casos el material utilizado es polietileno (PE)
- Un 72% de las tuberías está comprendido entre 110 mm a 1000 mm.
- El tipo de soldadura empleada es por electrofusión en un 41% y a tope en un 42%.
- El tipo de uniones entre tuberías y accesorios (codos, reducciones uniones en T) es diversa, bien sean estos fabricados o moldeados.

Como discontinuidades típicas se encuentran:

Falta de penetración	19%	Soldadura fría	25%	Partículas gruesas	14%
Discontinuidades planas	19%	Partículas finas	20%		

Basándose en la información proporcionada, se han elegido dos tipos de tubo de polietileno (PE 80 y PE 100) con uniones soldadas por electrofusión y a tope para ser examinados dentro del ámbito del proyecto, y serán evaluados hasta cinco tamaños de tubo y cinco tipos de discontinuidades

Las dos técnicas principales utilizadas para soldar tubos de plástico son la soldadura a tope por fusión y la electrofusión.

### **Soldadura a tope.**

En la soldadura a tope por fusión (Figura 2), los extremos de los tubos, que han sido cortados a escuadra y alisados, son empujados contra una placa calefactora de metal hasta que funden, en ese momento se retira la placa y los tubos son empujados uno contra otro dejándolos enfriar hasta que forman la unión soldada.

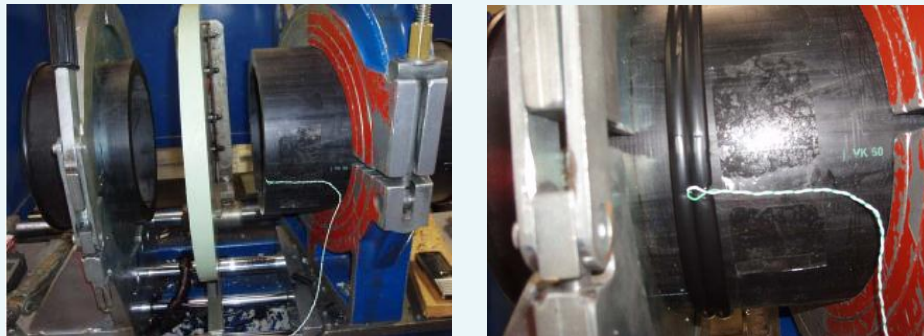


Figura 2. Soldadura de tubos a tope (PLASFLOW)

## Electrofusión

En la soldadura por electrofusión los extremos de los tubos son empujados, desde ambos lados, en el interior del accesorio EF, el cual contiene una bobina calefactora en su interior (Figura 3). Se hace pasar corriente a través de la bobina, que calienta el interior del accesorio y el exterior de los tubos hasta la fusión, produciendo la soldadura.



Figura 3. Soldadura por electrofusión (ISOTEST)

## Propiedades de los materiales

Las propiedades acústicas del polietileno (PE), están relacionadas con la frecuencia, deben determinarse, la velocidad y la atenuación de ondas longitudinales, para el desarrollo de las técnicas ensayo, configuración de los equipos, la medida del espesor de la pared, la detección de discontinuidades, así como para el modelado que se utiliza durante el desarrollo de la técnica de inspección.

Las propiedades de los ultrasonidos tendrán que ser determinadas para los diferentes grados de PE para poder desarrollar y validar las técnicas de inspección. Sin embargo, en esta etapa, las propiedades ultrasónicas sólo se han medido para un grado de tubería de PE.

De una tubería se han fabricado ocho muestras con superficies paralelas. El espesor de las muestras osciló entre 2,5-20,0 mm. Se han realizado mediciones utilizando la técnica de pulso eco en inmersión mediante transductores de ultrasonidos con frecuencias centrales de 1 a 5 MHz. El resultado no muestra ninguna dependencia significativa de la frecuencia y el valor medio de la velocidad ultrasónica fue 2.240m/s, con una variación de  $\pm 10$ m/s.

Los resultados mostraron que la variación de las velocidades estimadas es altamente dependiente de la exactitud de la medición del espesor y una variación de 10 $\mu$ m (0,4%) da un cambio de 9 m/s. Las ocho muestras también se utilizaron para determinar la atenuación del material. Los resultados mostraron un aumento de atenuación de 0,3dB/mm con un aumento de la frecuencia de 1 MHz, comenzando a 0,2dB / mm a 1 MHz.

## Paquete de trabajo 2. Realización de las uniones soldadas.

Se deberán realizar una serie de uniones soldadas conteniendo las diferentes discontinuidades definidas en el Paquete de trabajo 1, con los materiales, tipos de junta y tamaños de tubería, también definidos en el mencionado paquete de trabajo, habida cuenta que tanto para la validación de los END, como para los criterios de aceptación, es necesario conocer el tamaño exacto de cada discontinuidad y/o la cantidad discontinuidades, muchas de las cuales pueden ser simulaciones idealizadas de discontinuidades reales que pueden encontrarse "en campo".

Basados en la experiencia previa, los tipos de discontinuidades serán, probablemente, discontinuidades planas, simulando huellas de dedos, aceite, grasa y gotitas de lluvia, partículas finas, polvo en suspensión en el aire, partículas gruesas, arena y suciedad, soldaduras con aporte de calor reducido, que pueden tener lugar en campo si no se siguen los procedimientos correctos, y específicamente para las soldaduras *shocket*, penetración

incompleta del tubo en el accesorio, que puede ocurrir cuando en campo no se utilizan abrazaderas de montaje (*pipe clamps*).

Para el desarrollo de las técnicas en las uniones BF, se utilizaron talados a fondo plano (FBHs) y ranuras, en tuberías fabricadas. Los FBHs se mecanizan en los extremos de la tubería y las ranuras fueron practicadas en medio de la tubería. Los tamaños de las probetas de prueba se muestran en la tabla 2.

BF pipe	100 mm SDR 11	220 mm SDR11	355 mmSDR11	450 mm SDR17	710 mm SDR 17
EF fitting	100 mm SDR 11	220 mm SDR11	355 mmSDR11	450 mm SDR17	710 mm SDR 17

Tabla 2. Tamaños de tuberías utilizadas para el desarrollo de las técnicas

Las ranuras se utilizaron para evaluar las ondas reptantes y la técnica TOFD. Los FBHs se utilizaron para evaluar las técnicas sectoriales de pulso eco y tándem. La disposición de los FBHs y ranuras para tuberías de 225 mm de diámetro exterior se muestran en la figura 4

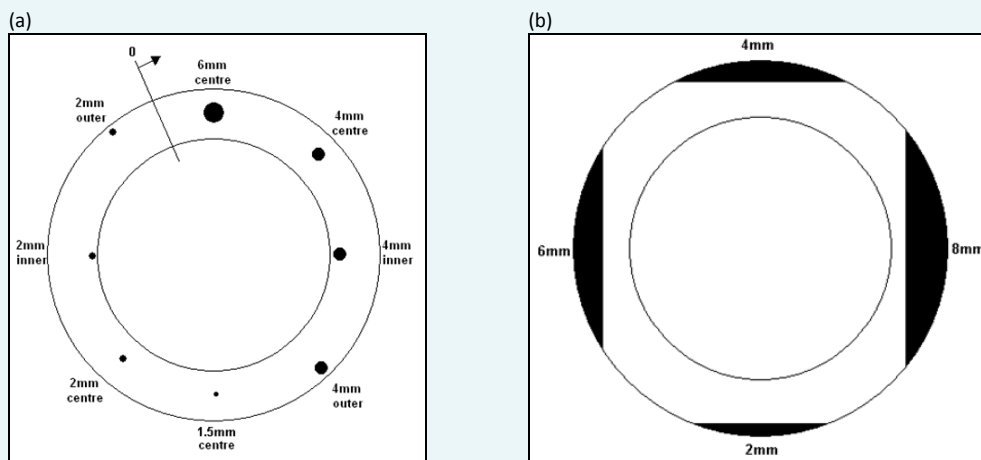


Figura 4. (a) Disposición de FBHs en el extremo de la tubería. (b) Disposición de las ranuras en la tubería.

A fin de desarrollar la técnica PAUT para las uniones EF, se llevaron a cabo ensayos de inspección inicial utilizando conexiones fabricadas. Se propuso que si se conseguía suficiente resolución para la detección de los hilos, la zona de fusión situada justo debajo de los hilos podría ser inspeccionada.

### Paquete de Trabajo 3. Desarrollo de las técnicas de END.

Las técnicas de END mediante ultrasonidos *Phased Array* serán desarrolladas para la detección de discontinuidades en los tipos de juntas y materiales de los tubos de plástico definidos en el Paquete de Trabajo 1, esto incluirá las especificaciones técnicas y funcionales del palpador *Phased Array*, diseño y especificación técnica del equipo y del manipulador. Esta tarea debe incluir el desarrollo de los algoritmos para el análisis de los datos requerido para las soldaduras efectuadas mediante EF. Deberán ser definidas las propiedades de los materiales plásticos seleccionados, así como, los métodos para superar la muy baja velocidad de propagación de los ultrasonidos y naturaleza altamente atenuante de esos materiales. Estos dos factores serán incorporados en la especificación del palpador.

Se diseñarán y fabricarán suelas especiales para los palpadores de ultrasonidos, Para las soldaduras por fusión, las suelas necesitan ser fabricadas a partir de materiales de muy baja velocidad de propagación de los ultrasonidos; las soldaduras por EF requerirán cuñas especializadas para acoplar con agua. La capacidad de los sistemas de END optimizados será determinada utilizando las soldaduras de tubos producidas en el Paquete de Trabajo 2. Seguidamente a la optimización, se generaran procedimientos del plan general de inspección.

### 3.1 Palpadores

Para la evaluación de la técnica de inspección en uniones EF se utilizaron dos palpadores diferentes 1D lineal de 128 elementos; un palpador de 5 MHz; y un palpador de 7 MHz. Ya que no se requiere ninguna angulación el *pitch* puede ser grande sin reducir el rendimiento del palpador. Los requerimientos del palpador para su angulación son bajos y solo es necesario centrarse en la focalización sobre la zona de fusión.

Las uniones BF tienen un área más pequeña de fusión y son necesarios ángulos altos para cubrir totalmente la zona de fusión. Los palpadores utilizados pueden ser físicamente más pequeños, permitiendo el uso de un *pitch* más pequeño y aumentar las capacidades de angulación.

Haces angulares son necesarios para inspeccionar uniones BF y dado que la capacidad de angulación es limitada con estos palpadores, fueron usadas cuñas angulares para minimizar la angulación por los elementos del palpador. Para la evaluación de las técnicas de inspección en uniones BF se utilizaron dos pares idénticos de palpadores 1D lineal de 32 elementos, un par de 2 MHz y un par de 4 MHz. Para el uso de estos palpadores sobre las tuberías de plásticos, el  $p$  del *pitch*, será mayor que media longitud de onda,  $p > \lambda/2$ .

### 3.2 Cuñas

Para realizar la inspección de tubos de plástico han sido diseñados y fabricados prototipos de cuña de agua. Las ventajas de utilizar una cuña de agua son, baja atenuación y una relación de velocidad que permite la angulación de los haces a la zona de fusión. Los principales retos con una cuña de agua son las posibles burbujas de aire y mantener el agua entre los palpadores y el material de PE

Al diseñar y fabricar las cuñas, el objetivo era hacerlas físicamente tan pequeñas como fuese posible, pero debía seguir permitiendo el intervalo deseado de ángulos a transmitirse en el material. Los palpadores para uniones EF requieren cuñas de agua de 0° y los palpadores para uniones de BF requieren cuñas de agua en ángulo. Los ángulos refractados para todas las técnicas tamaños de tubería fueron entre 55-90 grados. Por la aplicación de la ley de Snell, los ángulos incidentes calculados para estos dos ángulos refractados son de 32,8 y 41,5 grados respectivamente. Mediante la construcción de la cuña de agua con un ángulo de 35 grados, la matriz sólo necesita angular el haz a un máximo de 6,5 grados.

Fotos de ambos tipos de cuñas con el palpador montado sobre ellas se muestran en la figura 5. La figura muestra también la falda sellada que se utiliza para mantener eficazmente el agua en la cuña del palpador. El material sellado es flexible y la falda sellada puede adaptarse a las formas específicas de la superficie exterior de los accesorios de EF.

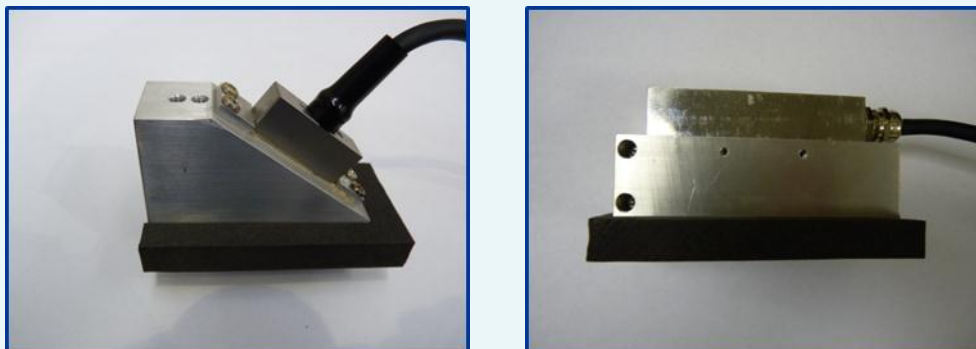


Figura 5. Diferentes tipos de cuñas

### 3.3 Desarrollo de técnicas de inspección

#### UNIONES EF

Para las uniones de EF se utilizó una cuña de agua de 0 grados con una columna de agua entre el palpador y la superficie de conexión de tubería. Fue usada exploración lineal con haz normal focalizado en el área de fusión entre la conexión y la tubería, ver la figura 6.

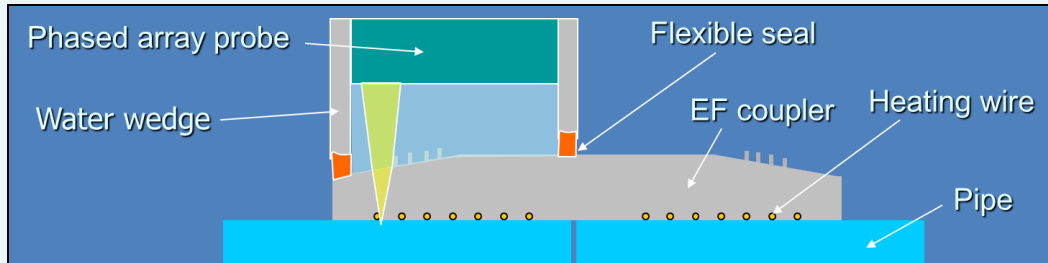


Figura 6. Esquema de inspección de soldaduras por electrofusión

Las principales limitaciones que impiden la plena cobertura de las uniones EF son los conectores, inscripciones y etiquetado alrededor de la superficie del accesorio.

Como puede verse en la figura 6, los cables de calefacción están ubicados justo encima de la zona de fusión y es necesaria una resolución suficiente para poder ver tanto los cables como entre los cables. Los factores más críticos para la inspección de uniones EF son la cobertura y la resolución. La resolución generalmente depende de la frecuencia, las frecuencias más altas darán mayor resolución. Sin embargo, el PE es un material con una alta atenuación y la atenuación aumenta exponencialmente con frecuencia. Así, la frecuencia debe reducirse para poder obtener suficiente propagación del sonido en tubos más grandes. Afortunadamente, en los accesorios para tubos de mayores diámetros, el diámetro de alambre y el espaciado entre alambres son también más grandes por lo que la resolución es suficiente. Para las tuberías de menores diámetros de alambre con el espaciado entre dos cables adyacentes menor, es necesario, para poder inspeccionar, un palpador con una frecuencia superior.



## UNIONES BF

Se han investigado cuatro técnicas para inspeccionar las uniones BF: tándem; sectorial pulso-eco; ondas reptantes y TOFD tal como se muestra en la figura 7 y se describen a continuación.

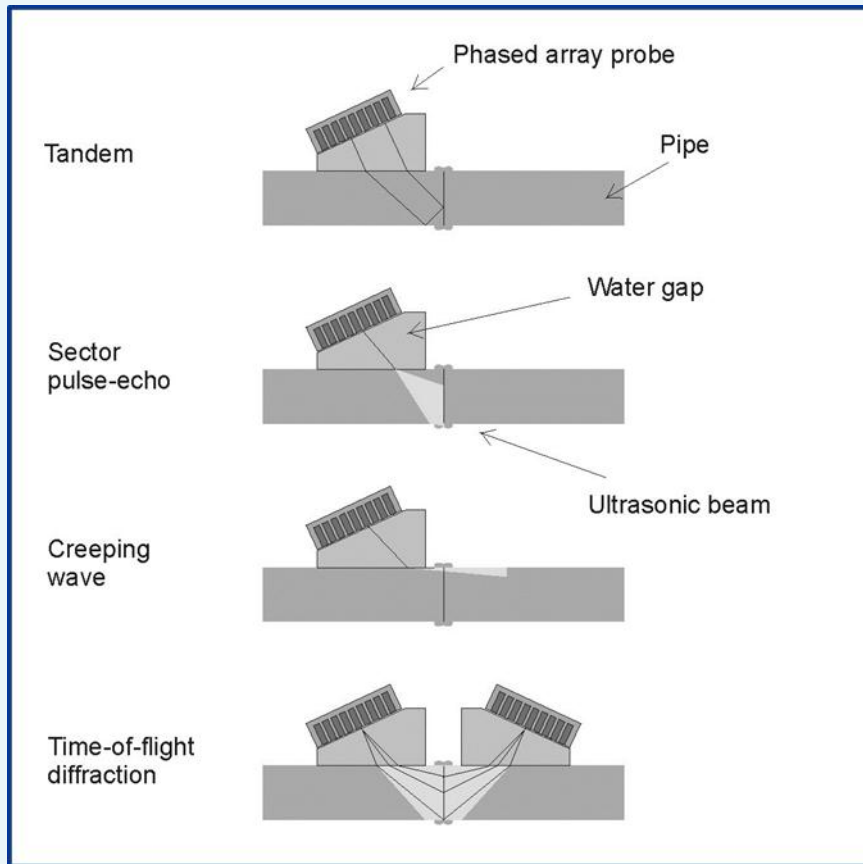


Figura 7. Esquema de diferentes técnicas de inspección de soldaduras a tope

### Tandem

La técnica de tándem se centra en una zona más cercana a la superficie interior de la soldadura; abarca aproximadamente dos terceras partes de la cara de fusión desde la superficie interior de la soldadura. Muestra un buen comportamiento sobre discontinuidades planas dentro de la soldadura. La técnica tándem es difícil de implementar debido al gran recorrido de sonido que tiene que realizar dentro del material muy atenuante junto con varias reflexiones internas que disminuirán la relación señal/ruido.

En la inspección por ultrasonidos convencional, la técnica de tándem se implementa mediante un transmisor y un receptor, uno delante del otro. Sin embargo, cuando se utiliza un palpador *phased array* único, una técnica de auto-tándem puede lograrse utilizando una parte de la matriz como el transmisor y una parte como el receptor.

Fue empleado un palpador de 32 elementos. Los últimos 16 elementos (17 a 32) se utilizaron para el transmisor y los primeros 16 elementos (de 1 a 16) fueron usados para el receptor. El posicionamiento entre el palpador/cuña con el centro de soldadura, y el espesor de la pared de la tubería determinan el ángulo adecuado para la técnica de auto-tándem.

### Sector pulse-echo

La técnica sectorial de pulso-eco cubre la mayor parte de la zona de fusión de la soldadura, excepto para el  $\frac{1}{4}$  superior de la soldadura cerca a la superficie exterior. La técnica utiliza



todos los elementos de la matriz para crear una abertura, barriendo con el haz desde el ángulo inferior al ángulo superior.

Los haces transmitidos se centraron a la distancia de la superficie interior y se ha utilizado la técnica de focalización dinámica en profundidad (DDF) en recepción.

Esta técnica se beneficia de tener señales de pulso eco directo y señales de tándem reflejando desde la pared interna antes que refleja un defecto en la línea de soldadura y volver a la matriz. Esto aumenta las señales detectadas de los defectos, pero deberá realizarse una interpretación cuidadosa de todas las señales detectadas.

### **Creeping waves**

Son ondas de compresión que se propagan inmediatamente debajo de la superficie de inspección para detectar defectos que afloran a la superficie y cercanos a ella. En la propagación de las ondas reptantes se producen conversiones de modo en la superficie que causan ondas secundarias de cizalladura.

Sin embargo, las ondas de cizalladura no viajan a una distancia significativa en PE y son efectivamente anuladas. Esta transferencia continua de energía da como resultado una alta atenuación de las ondas y la inspección sólo es eficaz en un rango relativamente corto

Crear ondas reptantes o cerca de la superficie con un palpador de ultrasonido *phased array* se consigue mediante un barrido sectorial con ángulos comprendidos entre 78 grados y 90 grados de modo similar a la técnica de pulso eco sectorial, y por lo tanto, cubre la parte superior de la soldadura que no pueden ver las técnicas pulso eco sectorial y la técnica de tándem.

### **Time-of-flight diffraction (TOFD)**

La técnica TOFD está preparada para cubrir toda la zona de fusión de soldadura aunque existe la posibilidad que un par de milímetros cerca a la superficie exterior queden fuera, dependiendo de cómo se aplica la técnica. La técnica convencional utiliza la difracción producida en los extremos de las discontinuidades y es sensible a los defectos perpendiculares a la superficie de la tubería.

La principal ventaja es que la amplitud de la señal buena se logra en cada ubicación debida a la focalización. La principal limitación es que la configuración mecánica es muy importante para poder recibir el sonido transmitido. Esta configuración proporciona una solución de compromiso entre las exigencias del instrumento, los resultados de inspección y de desarrollo de software.

Utilizando las capacidades de angulación y enfoque de *phased array*, pueden considerarse varias configuraciones distintas.

- 1) Imitando TOFD convencional. La apertura se utiliza para transmitir y recibir un haz en la misma forma. La limitación es que produce una amplitud de la señal débil, ya que no se utilizan las capacidades de focalización de *phased array*.
- 2) Emisor receptor con barrido sectorial. Con esta técnica, el transmisor usa una gran apertura para transmitir haces focalizados en el centro de la soldadura. Se utilizan ángulos que cubren la totalidad del espesor de la pared de la tubería. El receptor está configurado de la misma manera. La principal ventaja es que se logra una buena amplitud de señal en cada ubicación debido a la focalización. La principal limitación es que la configuración mecánica es muy importante para poder recibir el sonido transmitido. Los palpadores deben colocarse cuidadosamente a la misma distancia de la línea de soldadura.
- 3) Una combinación de TOFD convencionales y barrido sectorial. Esta técnica transmite un haz con haz extendido como la técnica 1. El sonido es recibido con haces focalizados con una gran apertura como la técnica 2. Las ventajas con esta técnica son que configuración



mecánica es menos importante y que tiene alto grado de flexibilidad. Las principales limitaciones son que la técnica es exigente para que el equipo a utilizar y que la señal recibida debe ser ponderada de acuerdo con el sonido de transmitido, lo cual tiene que aplicarse cuidadosamente.

La configuración evaluada en esta etapa del proyecto es la segunda técnica (emisor- receptor con barrido sectorial). Proporciona una solución de compromiso entre las exigencias del instrumento, los resultados de inspección y de desarrollo de software.

#### **Paquete de Trabajo 4. Desarrollo los criterios de aceptación.**

Las soldaduras inspeccionadas en el Paquete de Trabajo 3 serán ensayadas mecánicamente usando probetas, y sometiendo un tubo completo a un ensayo de rotura por deformación progresiva (bajo carga constante). Los resultados de estos ensayos serán analizados para cada uno de los diferentes tipos de discontinuidades y comparados con los resultados de los ensayos de soldaduras conteniendo discontinuidades no planificadas. El tamaño real de las discontinuidades en las juntas, frente al de las discontinuidades insertadas en las juntas antes de su soldadura, será determinado seccionando una serie de probetas de ensayo. Los niveles reales de la contaminación por partículas serán determinados usando técnicas de análisis superficial en las interfases de la soldadura. Se generarán gráficos de "tamaño de discontinuidades/nivel de contaminación por partículas" con respecto al "tiempo transcurrido hasta la rotura", a fin de calcular los tamaños/niveles críticos que reducen la integridad de la soldadura a largo plazo, para cada material, tamaño de tubo y tipo de junta. Esta información será comparada con las discontinuidades detectadas utilizando el prototipo del equipo de END que permita la aceptación o rechazo de la soldadura inspeccionada.

#### **Paquete de Trabajo 5. Desarrollo del equipo.**

El prototipo del sistema de adquisición de datos y análisis END mediante ultrasonidos *Phased Array* será desarrollado en el paquete de trabajo 5, incluye el diseño del control electrónico del haz y del procesado de los datos. Esto requerirá la implementación en el equipo de los algoritmos desarrollados en el Paquete de Trabajo 3. Se llevaran a cabo esfuerzos importantes de miniaturización del equipo y se procurará la inclusión de conexión *wireless*. Un modelo del prototipo se muestra en la figura 8.

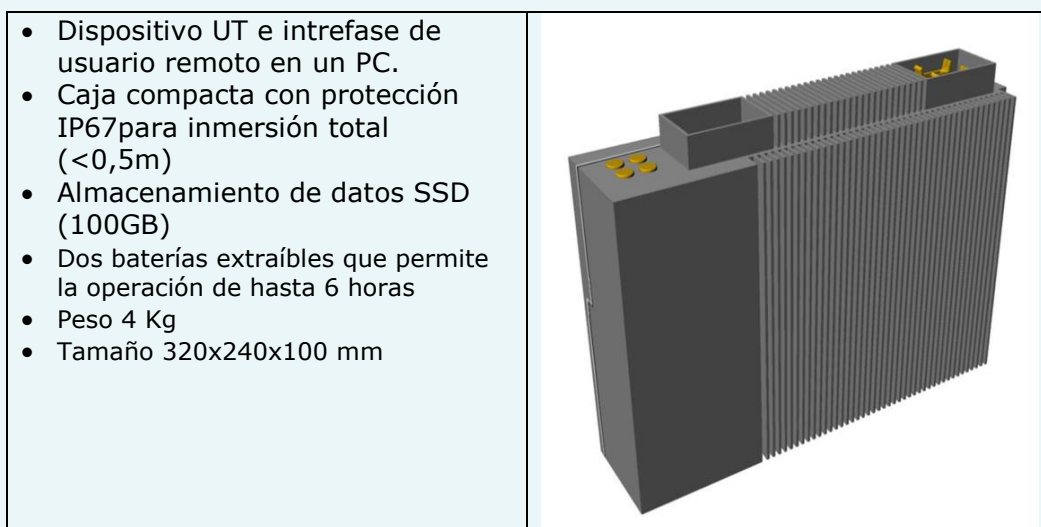


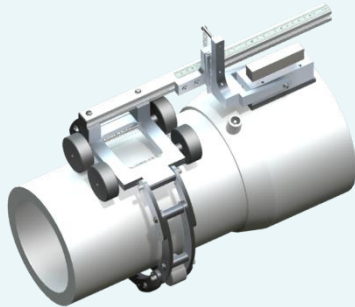
Figura 8. Miniaturización del equipo

## Paquete de Trabajo 6. Desarrollo del sistema de exploración.

Se ha diseñado, un prototipo de posicionador flexible y adaptable a un rango amplio de tamaño de tubos y geometría de juntas, para explorar con el(los) palpador(es) de ultrasonidos *Phased Array*, que permita un desplazamiento completo de 360° alrededor de la unión mientras proporciona datos detallados de su posicionado (ver figura 9).

El sistema consta de una parte principal que mantiene el posicionador en posición alrededor de la tubería con varios enlaces y un mecanismo de ajuste. Este sistema flexible debe permitir que el posicionador pueda inspeccionar tuberías con un diámetro exterior de 90 mm a 1 m. El dispositivo principal contiene el codificador y también el soporte de los portapalpadores para los dos diferentes tipos de unión que requieren diferentes configuraciones de los palpadores.

(a)



(b)

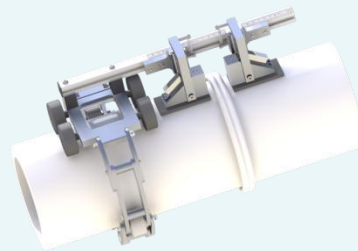


Figura 9 Sistema de exploración (a) porta palpadores para EF (b)porta palpadores para BF

## Paquete de Trabajo 7. Montaje y verificación del prototipo.

El sistema completo de END, incluyendo el equipo, palpador(es) y sistema de exploración, será montado y verificado en campo por el usuario final que forma parte del proyecto, así como por miembros de las asociaciones industriales que estén interesados, para evaluar la sensibilidad, reproducibilidad y facilidad de uso del sistema. Este Paquete de Trabajo incluirá la validación el sistema para el rango de soldaduras especificado en el Paquete de Trabajo 1. Se realizarán una serie de soldaduras de tuberías, para la validación, en las que la localización y número de discontinuidades permanecerán ocultas para el operador de END.

## Paquete de Trabajo 8. Formación divulgación y explotación.

El conocimiento generado durante en el transcurso del proyecto será difundido, tanto a los responsables de las pequeñas y medianas empresas que vayan a proveer los nuevos servicios de inspección, como a los usuarios finales. Esto se llevará a cabo vía "página web" del proyecto, temarios y directrices para la formación, campañas de concienciación, jornadas técnicas, publicaciones, comunicados y conferencias.

## AGRADECIMIENTOS

Las investigaciones llevadas a cabo para obtener estos resultados están financiadas por el Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea, gestionado por la REA (Agencia Ejecutiva de Investigación) <http://ec.europa.eu/research/rea> (FP7-SME-2008-2) según el acuerdo de subvención nº. 243791.

La información contenida en este documento se proporciona tal cual no garantiza su uso para un propósito particular. El usuario utiliza la información a su exclusivo riesgo y responsabilidad



## REFERENCES

1. Polytec, "The Development and Validation of Non-Destructive Testing Techniques for Electrofusion Joints in Polyethylene Pipes", EC: COOP-CT-2003-507376, October 2006.
2. D S Caravaca, C Bird and D Kleiner, "Ultrasonic Phased Array Inspection of Electrofusion Joints in Polyethylene Pipes", Insight, vol 49, no 2, February 2007
3. WINDEPP, "The Development and Validation of Non-Destructive Testing Techniques for Butt Fusion Joints in Polyethylene Pipes", EC project COOP BES2-5611, October 2001.
4. M.J. Troughton, "Welding with integrated non-destructive examination of polyethylene pipes", Plastics Pipes XI Conference, Munich, Germany, 3-6 September 2001.
5. I.J. Munns and G A Georgiou, "Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes", Insight, vol. 41, no. 5, May 1999.
6. C Frederick, D Zimmerman, and A Porter, "High-density polyethylene piping butt-fusion joint examination using ultrasonic phased array", Pressure Vessels and Piping, Prague, Czech Republic, 26-30 July 2009.
7. S.L. Crawford, S.E. Cumblidge, S.R. Doctor, T.E. Hall, M.T. Anderson, "Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion", PNNL, May 2008.
8. B Messer, M Yarmuch and P den Boer, "Novel High Resolution Defect Detection for Thermoplastic Butt -Welds", Pipeline and Gas Journal, March 2003.
9. H J Shin, Y H Jang, J R Kwon and E J Lee, "Nondestructive Testing of Fusion Joints of Polyethylene Piping by Real Time Ultrasonic Imaging". Plastics Pipes XII Conference, Milan, Italy, 19-22 April 2004.