



INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

RT-IEN- 02/2005

**Fundamentos teóricos e práticos
para a medida de vazão pela técnica ultra-sônica
de tempo de trânsito**

por

***José Luiz Horacio Faccini
Sílvia Barbosa Galvão Cesar
Marcos Santana Farias
Carlos Alfredo Lamy***

Março/2005

**NOTA
ESTE RELATÓRIO É PARA USO EXCLUSIVO DO
INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

O direito a utilização de informações relacionadas ao trabalho de pesquisa realizado no IEN é limitado aos servidores da CNEN e pessoal de organizações associadas, nos limites dos termos contratuais que regem os respectivos convênios. O conteúdo dos relatórios não pode ser separado ou copiado sem autorização escrita do IEN



INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

Título: Introdução à medida de vazão de água por técnicas ultra-sônicas

Autor(es): José Luiz Horacio Faccini, Silvia Barbosa Galvão Cesar, Marcos Santana Farias e Carlos Alfredo Lamy

e-mail: faccini@ien.gov.br

Identificação:
RT-IEN-02.05

Nº de páginas:
16

Tipo de Divulgação:
Irrestrita (X) Restrita ()

Divulgar para:
DIRE, DICH,
SETER(2),
SEINS, SETEQ

Localização:
http://intranet_ien

Publicação externa associada (congresso/periódico):

Palavras chave: Ultra-som, medida de vazão, instrumentação eletrônica, circuito termohidráulico.

Resumo:

Este relatório técnico apresenta os fundamentos teórico-práticos da medição de vazão pela técnica ultra-sônica de tempo de trânsito, de acordo com o estado da arte da literatura pesquisada. São apresentadas de forma ordenada os principais conceitos e práticas recomendadas para a correta utilização desta técnica por parte de pessoal interessado na sua aplicação e/ou pesquisa, que vão desde os fundamentos teóricos de modo simplificado passando pela instrumentação básica descrevendo os seus componentes tais como gerador de pulsos, osciloscópio e transdutores, e finalmente a escolha e montagem corretas do sistema com recomendações acerca das suas possíveis configurações.

Abstract:

Emissão		Nome	Rubrica	Data
Data: 24/03/2005	Elaboração:	José Luiz Horacio Faccini, Silvia Barbosa Galvão Cesar, Marcos Santana Farias e Carlos Alfredo Lamy		
Divisão: DIRE	Revisão:	Carlos Alfredo Lamy		
Serviço: SETER	Aprovação :	Reinaldo Jacques Jospin		

Instituto de Engenharia Nuclear:

Via 5 s/n, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP 21945-970, CP 68.550, Rio de Janeiro – RJ - Brasil .

Tel.: 00 55 21 2560-4113 Internet: www.ien.gov.br

1. Introdução

A indústria dos medidores de vazão ultra-sônicos vem crescendo rapidamente devido à conveniência e precisão dessa instrumentação. Uma eletrônica bem projetada e sistemas ultra-sônicos modernos fornecem resultados precisos mesmo nas mais difíceis aplicações. Os medidores ultra-sônicos são apropriados para a maioria de materiais de tubulação encontrados em plantas industriais, tais como aço inox, plástico, vidro, aço carbono, ferro revestido com borracha, e podem ser usados em uma larga escala de diâmetros da tubulação. O escoamento pode ser medido nos dois sentidos.

Os primeiros estudos com medidores de vazão ultra-sônicos, com aplicação em tubulação de plástico, foram relatados em 1954, Lynnworth [1]. Em 1957 foi divulgado um segundo trabalho, sugerindo modificações na parede de tubulação de metal para forçar uma propagação ao longo de um desejável trajeto oblíquo. Em 1964, medições práticas de escoamento de água com medidor ultra-sônico em grandes tubulações de aço foram realizadas no Japão, e em 1970 a tecnologia foi importada, e disponibilizada, pelos Estados Unidos.

Esse método, de simples conceito teórico, só se desenvolveu, técnica e comercialmente, nos últimos 25 anos, Lynnworth et al. [2], pois não havia meios de medir os tempos de trânsito típicos, da ordem de grandeza de microsegundos, com a precisão necessária. O aperfeiçoamento da eletrônica e de algoritmos de tratamento de sinal, possibilitou a construção de equipamentos confiáveis, com aplicações a cada dia mais correntes no meio industrial.

Suas vantagens naturais na aplicação industrial têm sido, de um modo geral, ofuscadas pela falta de informação adequada de suas reais capacidades, associadas a conhecimentos técnicos deficientes sobre os diferentes avanços tecnológicos ocorridos nos últimos anos.

Por volta de 1992, o grupo de Termohidráulica Experimental e o grupo de Técnicas Ultra-sônicas, ligados às antigas Supervisão de Metalurgia (SUMET) e Supervisão do Reator Argonauta e Circuitos Termohidráulicos (SUMAR), realizaram estudos preliminares sobre a viabilidade de um sistema ultra-sônico para a medição de vazão, Pio et al. [3], no Circuito de Água do IEN [4]. Tais estudos não tiveram prosseguimento devido à falta de recursos de instrumentação e de pessoal disponível.

Em 1999 teve início o projeto BRA/8/027 “Non-destructive testing for inspection of NPP materials” patrocinado pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), cujo objetivo, entre outros, visava o desenvolvimento da aplicação de técnicas ultra-sônicas para a medição de escoamentos de fluidos, utilizando as facilidades do Laboratório de Termohidráulica Experimental (LTE/SETER/DIRE/IEN). O projeto, sob a responsabilidade do grupo de Técnicas Ultra-sônicas, da Divisão de Química e Materiais Nucleares (DIQN), implementou melhorias no LTE, principalmente no que diz respeito à modernização da instrumentação do circuito e montagem de uma seção de testes para a realização de medidas ultra-sônicas da vazão de escoamentos monofásicos de água. Os estudos da técnica ultra-sônica aplicada na medida de vazão, foram então retomados, agora também em colaboração com o LABUS/DIQN e SEINS/DICH.

2. Tecnologia de medidores de vazão ultra-sônicos de tempo de trânsito

2.1- Fundamentos

Equipamentos ultra-sônicos de tempo de trânsito têm um princípio de funcionamento bastante simples: a contagem do tempo que um pulso de ultra-som leva para percorrer uma trajetória

conhecida em um meio material, Fig. 1. Cálculos são realizados a partir deste tempo medido, e várias informações podem ser obtidas do meio, como por exemplo, a vazão em tubulações.

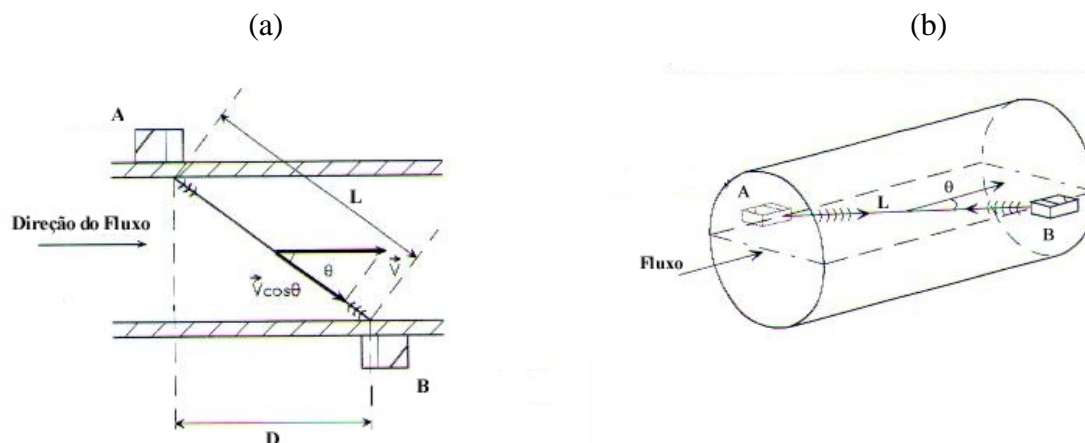


Figura 1 – Percurso da onda ultra-sônica

Pela Fig. 1a o tempo de trajeto da onda no líquido do transdutor A até o transdutor B é igual a, [5]:

$$T_{AB} = \frac{L}{C + V \cdot \cos \theta} \quad , \text{ onde } C \text{ é a velocidade do som no líquido em repouso e } V \text{ a}$$

velocidade média do escoamento.

O tempo de B para A:

$$T_{BA} = \frac{L}{C - V \cdot \cos \theta}$$

Assim,

$$\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} = \frac{2 \cdot V \cdot \cos \theta}{L} = \frac{2 \cdot V \cdot D}{L^2} \quad , \text{ onde } \cos \theta = \frac{D}{L} \text{ sendo } D \text{ e } L \text{ distâncias}$$

definidas na Fig. 1a.

Então,

$$V = \frac{L^2}{2D} \left(\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} \right) \quad \text{ou,} \quad V = \frac{L^2}{2D} \cdot \frac{\Delta T}{T_{AB} \cdot T_{BA}} \quad \text{onde,} \quad \Delta T = T_{BA} - T_{AB}$$

Assim, tem-se para a vazão de água no interior da tubulação, a expressão:

$$Q = \frac{\pi \cdot \Phi_{\text{int}}^2}{4} \cdot \frac{L^2}{2D} \cdot \frac{\Delta T}{T_{\text{AB}} \cdot T_{\text{BA}}}$$

, onde Φ_{int} é o diâmetro interno da tubulação

2.2- Instrumentação

A unidade eletrônica, ilustrada na Fig.2, é composta por um gerador de pulsos, um osciloscópio e um microcomputador. É neste conjunto que o tempo entre a emissão e a recepção do pulso é medido e tratado eletronicamente, cálculos são realizados e o processo é refeito de maneira ininterrupta, várias vezes por segundo.

A emissão e a recepção dos pulsos ultra-sônicos são feitas pelos transdutores. Dentro deles está localizado um cristal piezelétrico que vibra quando estimulado por pulsos elétricos vindos de um dispositivo controlador de pulsos. Os pulsos elétricos são levados aos transdutores pelos cabos coaxiais. Os transdutores são acessórios frágeis e caros, e devem ser manuseados com cuidado, evitando quedas, pancadas e até mesmo batidas mais secas na superfície onde estão instalados.

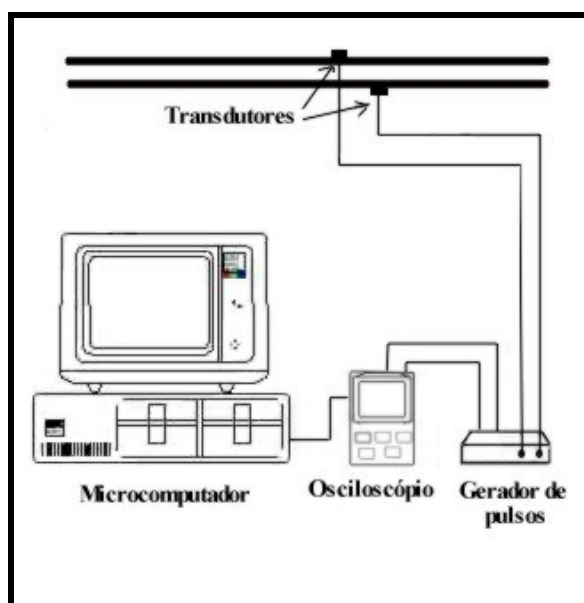


Figura 2 - Instrumentação

2.3- Transdutores

Algumas considerações sobre transdutores ultra-sônicos:

Ângulo de incidência: Para medições em instalações de aço inox contendo água, os transdutores são os de ondas cizalhantes, inclinados de 70° .

Frequência: Na escolha do transdutor, o parâmetro da frequência deve ser observado para as faixas de diâmetros da tubulação:

- 0,5 MHz – grandes diâmetros, 500 mm a 5000 mm
- 1 MHz – 50 mm a 2000 mm
- 2 MHz – pequenos diâmetros, 10 mm a 100 mm
- 4 MHz – diâmetros muito pequenos.

Se existem bolhas ou partículas no escoamento, uma frequência baixa é indicada. A mesma recomendação é feita no caso de problemas de obtenção do sinal ultra-sônico através da tubulação.

Montagem: A Fig. 3, Flood [6], apresenta as três possíveis configurações de montagens dos transdutores em tubulações: transmissão direta (tipo Z), reflexão simples (tipo V) e múltiplas reflexões (tipo W).

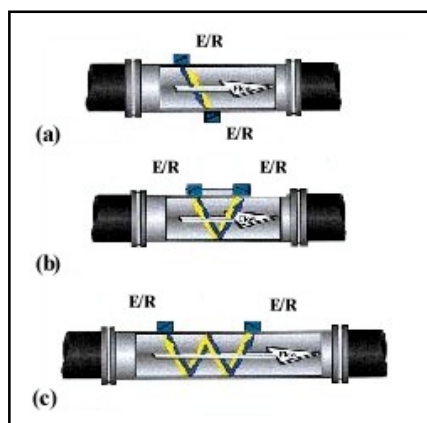


Figura 3 – Configurações de montagens dos transdutores:
(a) em Z; (b) em V; em W

A configuração tipo Z, onde o tempo de percurso da onda é mais curto que nas outras configurações, é mais adequada para tubulações de grandes diâmetros, Sanderson et al. [7]. Porém, a correta instalação dos transdutores é mais difícil, devido a dificuldade de medida da distância e do alinhamento.

A configuração tipo V é a mais recomendada, pois o trajeto é mais longo, dando um melhor tempo de resolução. O posicionamento e o alinhamento é muito mais fácil e preciso, pois os transdutores estão do mesmo lado da tubulação.

A configuração tipo W é a mais indicada para tubulações pequenas, devido a necessidade de se aumentar o trajeto da onda ultra-sônica entre os transdutores.

Localização na tubulação: Para líquido puro e sem partículas ou bolhas, a orientação dos transdutores é irrelevante.

Em tubulações horizontais, deve-se assegurar que os transdutores não serão colocados no topo e na base da geratriz da tubulação, pois são regiões sujeitas à depósito de resíduos e formação de bolhas. A Ref. [5] sugere que áreas correspondentes a um ângulo de 30°, Fig. 4, sejam evitadas na localização dos transdutores.

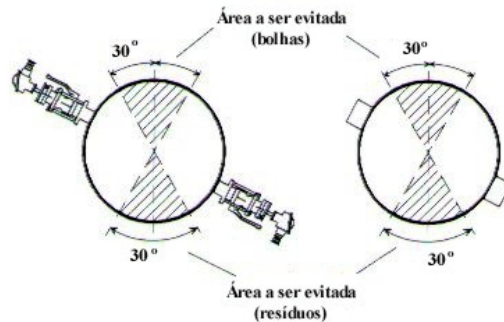


Figura 4 – Localização dos transdutores na tubulação horizontal

Se, depois de montados os transdutores, os sinais não aparecem, alguns fabricantes sugerem que se mova um transdutor em relação ao outro até que um sinal seja encontrado, ou que o sinal se torne mais forte. Se o sinal é encontrado desta forma, significa que o diâmetro da tubulação, espessura da parede, materiais e fluido selecionados podem estar errados, pois existe somente uma posição “correta”.

3. Equacionamento das configurações de montagens dos transdutores

3.1- Configuração “Z”

A Fig. 5 apresenta a configuração adotada inicialmente, baseada nos estudos iniciados em 1992.

a) Percurso da onda na água:

$$\text{Lei de Snell - Descartes} \rightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \rightarrow \frac{\sin 70^\circ}{\sin \beta} = \frac{3230}{1483} \rightarrow \beta = 25,6^\circ$$

$$\text{como } \gamma = 90 - \beta \rightarrow \gamma = 64,4^\circ$$

$$\cos \gamma = \frac{d}{l}; \text{ mas } l' = l \cdot \cos \beta \rightarrow l = \frac{51,2}{0,902} \rightarrow \boxed{l = 56,763 \text{ mm}}$$

$$d = 56,763 \times 0,432 \rightarrow \boxed{d = 24,522 \text{ mm}}$$

b) Percurso da onda no aço:

$$e = l'' \cdot \cos \alpha \rightarrow l'' = \frac{2,9}{0,342} \rightarrow \boxed{l'' = 8,479 \text{ mm}}$$

$$\sin \alpha = \frac{d'}{l''} \rightarrow d' = 8,479 \times 0,9397 \rightarrow \boxed{d' = 7,968 \text{ mm}}$$

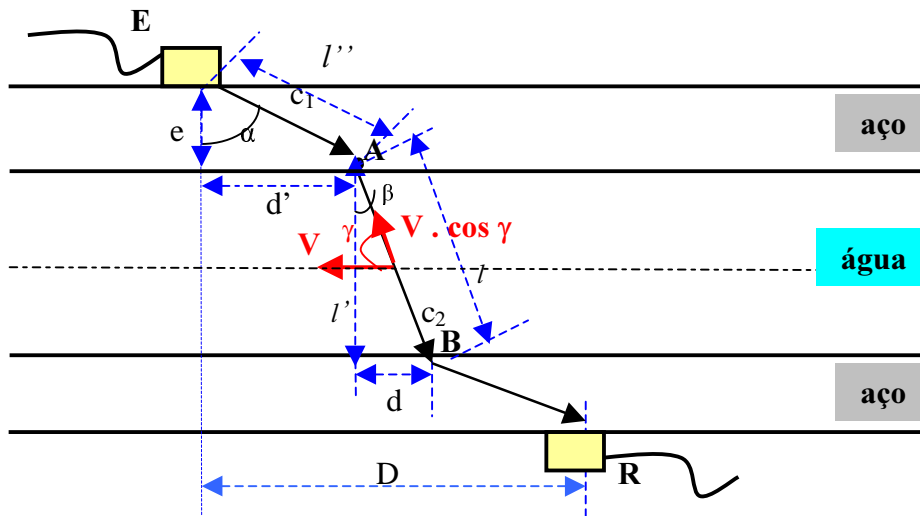


Figura 5 – Modelo do trajeto da onda ultra-sônica – Configuração em Z

- E e R são os transdutores angulares ($\alpha = 70^\circ$) ultra-sônicos, emissor e receptor, respectivamente.
- β é o ângulo de propagação da onda ultra-sônica na água.
- c_1 e c_2 são as velocidades da onda ultra-sônica cizalhante no aço inox e longitudinal na água (3230 m/s e 1483 m/s, a 20 °C), respectivamente.
- D é a distância entre os transdutores, determinada geometricamente.
- e é a espessura da parede da tubulação (2,9 mm).
- l' é o diâmetro interno da tubulação (51,2 mm).
- l e l'' são as distâncias percorridas pela onda US na água e no aço, respectivamente.
- V é a velocidade média da água na tubulação.

c) Distância entre os transdutores E e R:

$$D = 2 \times d' + d = 2 \times 7,97 + 24,53 \rightarrow \boxed{D = 40,458 \text{ mm}}$$

d) Tempo de percurso da onda nos transdutores \rightarrow é determinado na situação de velocidade da água (V) igual a zero:

Para $V = 0 \rightarrow$ tempo total de percurso da onda será:

$$[T_{\text{total}}]_{V=0} = 2 \times T_{\text{transdutor}} + 2 \times T_{\text{aço}} + [T_{\text{água}}]_{V=0}$$

$$\boxed{2 \times T_{\text{transdutor}} = [T_{\text{total}}]_{V=0} - 2 \times T_{\text{aço}} - [T_{\text{água}}]_{V=0}}$$

e) Tempo de percurso da onda na água:

$$[T_{total}]_{V \neq 0} = 2 \times T_{transdutor} + 2 \times T_{aço} + [T_{água}]_{V \neq 0}$$

$$[T_{água}]_{V \neq 0} = [T_{total}]_{V \neq 0} - \{ [T_{total}]_{V=0} - 2 \times T_{aço} - [T_{água}]_{V=0} \} - 2 \times T_{aço}$$

$$[T_{água}]_{V \neq 0} = [T_{total}]_{V \neq 0} - [T_{total}]_{V=0} + [T_{água}]_{V=0}$$

Mas:

$$[T_{água}]_{V=0} = \frac{l}{c_2} = \frac{56,763 \cdot 10^{-3}}{1483} = 3,8276 \cdot 10^{-5}$$

Então:

$$[T_{água}]_{V \neq 0} = [T_{total}]_{V \neq 0} - [T_{total}]_{V=0} + 3,8276 \cdot 10^{-5} \text{ [s]}$$

f) Velocidade da água na tubulação:

Com o auxílio da Fig. 5, deduz-se que o tempo de percurso da ultra-sônica do ponto A até o ponto B, é dado por:

$$T_{AB} = \frac{l}{c_2 - V \cos \gamma} = [T_{água}]_{V \neq 0}$$

Assim,

$$V = \frac{1}{\cos \gamma} \left(c_2 - \frac{l}{T_{AB}} \right) \quad \rightarrow \quad V = \frac{1}{0,432} \left(1483 - \frac{56,763 \cdot 10^{-3}}{[T_{água}]_{V \neq 0}} \right) \text{ [m/s]}$$

g) Vazão da água:

$$Q = V \cdot A$$

$$A = \pi \cdot \frac{(l)^2}{4} \quad \rightarrow \quad A = \pi \cdot \frac{(51,2 \cdot 10^{-3})^2}{4} \quad \rightarrow \quad A = 2058,874 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Q = \frac{2058,874 \cdot 10^{-6}}{0,432} \left(1483 - \frac{56,763 \cdot 10^{-3}}{[T_{água}]_{V \neq 0}} \right)$$

$$Q = 7,06785 - \frac{27,05275 \cdot 10^{-5}}{[T_{\text{água}}]_{V \neq 0}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Ou,

$$Q = \left[7,06785 - \frac{27,052745 \cdot 10^{-5}}{[T_{\text{água}}]_{V \neq 0}} \right] \cdot 3600 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

h) Percurso da onda no transdutor:

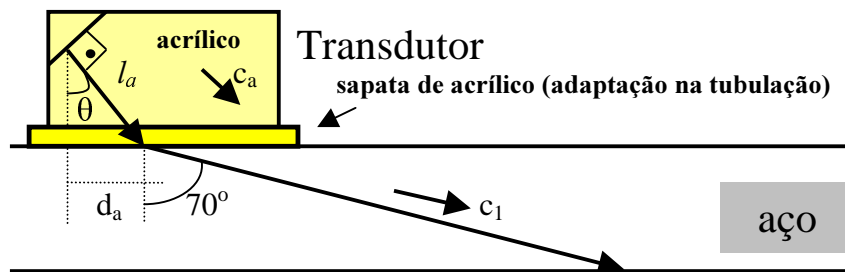


Figura 6 – Trajeto da onda ultra-sônica no interior do transdutor

- e' é a espessura da sapata de acrílico, ~ 2 mm
- c_a e c_1 são as velocidades da onda ultra-sônica longitudinal no acrílico e cizalhante no aço (2730 m/s e 3230 m/s, a 20 °C), respectivamente.
- d_a é a distância entre o ponto de origem da onda e o ponto de saída na sapata, 12,64 mm

Observação importante: Na execução da instalação dos transdutores na tubulação, d_a não pode ser esquecido, e portanto, deve-se acrescentar 2 (duas) vezes o seu valor na distância entre os transdutores.

$$\text{Lei de Snell – Descartes} \rightarrow \frac{\text{sen } \theta}{\text{sen } 70} = \frac{c_a}{c_1} \rightarrow \theta = 52,58^\circ$$

$$l_a = \frac{d_a}{\text{sen } \theta} \rightarrow l_a = 15,91 \text{ mm}$$

3.1.1. Exemplo de cálculo dos tempos teóricos de percurso da onda ultra-sônica desde a sua geração (cristal) no transdutor de emissão até a recepção, para água à 20 °C

a) Vazão = 0

$$T_{\text{total}} = 2 \times T_{\text{transdutor}} + 2 \times T_{\text{aço}} + T_{\text{água}}$$

$$T_{\text{transdutor}} = \frac{l_a}{c_a} = \frac{15,91 \cdot 10^{-3}}{2730} = 5,83 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$T_{\text{aço}} = \frac{l'}{c_1} = \frac{8,5 \cdot 10^{-3}}{3230} = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$[T_{\text{água}}]_{V=0} = \frac{l}{c_2} = \frac{56,763 \cdot 10^{-3}}{1483} = 38,276 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$[T_{\text{total}}]_{V=0} = 55,196 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 55,196 \text{ } \mu\text{s}$$

b) Vazão 15 m³/h

Do item 3.1. (g):

$$Q = \frac{2058,874 \cdot 10^{-6}}{0,432} \left(1483 - \frac{56,763 \cdot 10^{-3}}{[T_{\text{água}}]_{V \neq 0}} \right) \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Assim,

$$\frac{15}{3600} [T_{\text{água}}]_{V \neq 0} = 4765,912 \cdot 10^{-6} \left[1483 [T_{\text{água}}]_{V \neq 0} - 56,763 \cdot 10^{-3} \right]$$

$$[T_{\text{água}}]_{V=15} = 38,298 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Do item 3.1. (e):

$$[T_{\text{água}}]_{V \neq 0} = [T_{\text{total}}]_{V \neq 0} - [T_{\text{total}}]_{V=0} + [T_{\text{água}}]_{V=0}$$

Assim,

$$[T_{\text{total}}]_{V=15} = 38,298 \cdot 10^{-6} + 55,196 \cdot 10^{-6} - 38,276 \cdot 10^{-6}$$

$$[T_{\text{total}}]_{V=15} = 55,218 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 55,218 \text{ } \mu\text{s}$$

A diferença entre os tempos de trânsito da onda US para as vazões 0 e 15 m³/h, será portanto, 22.10⁻⁹ s (**22 ns**).

3.2- Configuração “V”

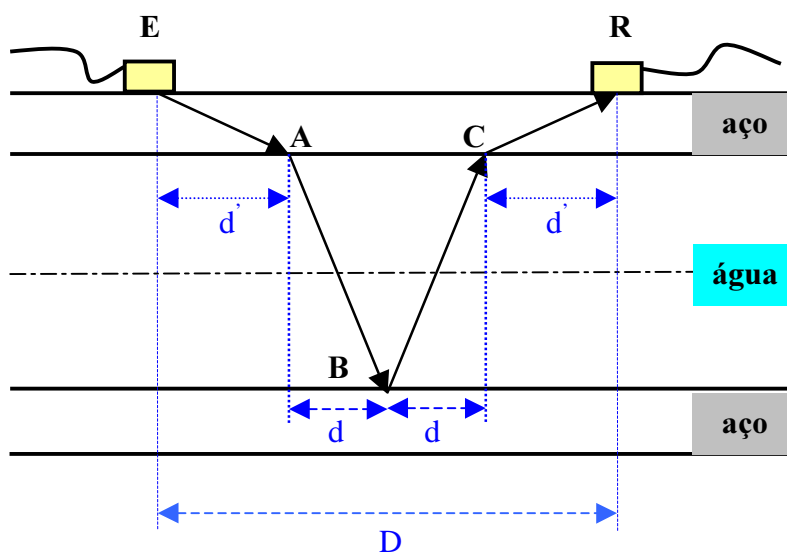


Figura 6 - Modelo do trajeto da onda ultra-sônica – Configuração em V

Distância entre os transdutores E e R:

As distâncias d e d' são as mesmas calculadas anteriormente no item 3.1. (a) e (b), ou seja:

$$d = 24,53 \text{ mm}$$

$$d' = 7,97 \text{ mm}$$

$$\text{Assim: } D = 2 \times d' + 2 \times d = 2 \times 7,97 + 2 \times 24,53 \rightarrow \boxed{D = 65,00 \text{ mm}}$$

Observação importante: Do mesmo modo que na configuração em Z, na execução da instalação dos transdutores na tubulação, d_a não pode ser esquecido, e portanto, deve-se acrescentar 2 (duas) vezes o seu valor na distância entre os transdutores.

3.2.1. Exemplo de cálculo dos tempos teóricos de percurso da onda ultra-sônica desde a sua geração (cristal) no transdutor de emissão até a recepção, para água à 20 °C

a) Vazão = 0

Os tempos $T_{\text{transdutor}}$, $T_{\text{aço}}$ e $T_{\text{água}}$ são os mesmos calculados anteriormente no item 3.1.1 (a):

$$T_{\text{transdutor}} = 5,83 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$T_{\text{aço}} = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$[T_{\text{água}}]_{AB} = [T_{\text{água}}]_{BC} = 38,276 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Assim, para esta configuração:

$$T_{\text{total}} = 2 \times T_{\text{transdutor}} + 2 \times T_{\text{aço}} + 2 \times [T_{\text{água}}]_{AB}$$

$$[T_{\text{total}}]_{V=0} = 93,472 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 93,472 \text{ } \mu\text{s}$$

b) Vazão $15 \text{ m}^3/\text{h}$

$$T_{AB} = T_{BC} = \frac{l}{c_2 - V \cos \gamma} \quad \rightarrow \quad T_{AC} = \frac{2 \cdot l}{c_2 - V \cos \gamma} = [T_{\text{água}}]_{V \neq 0}$$

Então,

$$V = \frac{1}{\cos \gamma} \left(c_2 - \frac{2 \cdot l}{[T_{\text{água}}]_{V \neq 0}} \right) \quad \text{e} \quad Q = \frac{2058,874 \cdot 10^{-6}}{0,432} \left(1483 - \frac{2 \times 56,763 \cdot 10^{-3}}{[T_{\text{água}}]_{V \neq 0}} \right) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Assim,

$$\frac{15}{3600} [T_{\text{água}}]_{V \neq 0} = 4765,912 \cdot 10^{-6} [1483 [T_{\text{água}}]_{V \neq 0} - 113,526 \cdot 10^{-3}]$$

$$[T_{\text{água}}]_{V=15} = 76,595 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Como no item 3.1.1.(b),

$$[T_{\text{água}}]_{V \neq 0} = [T_{\text{total}}]_{V \neq 0} - [T_{\text{total}}]_{V=0} + 2 \times [T_{\text{água}}]_{V=0}$$

Assim,

$$[T_{\text{total}}]_{V=15} = 76,595 \cdot 10^{-6} + 93,472 \cdot 10^{-6} - 2 \times 38,276 \cdot 10^{-6}$$

$$[T_{\text{total}}]_{V=15} = 93,513 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 93,513 \text{ } \mu\text{s}$$

A diferença entre os tempos de trânsito da onda US para as vazões 0 e $15 \text{ m}^3/\text{h}$, será, portanto, $41 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ (**41 ns**).

3.3- Configuração “W”

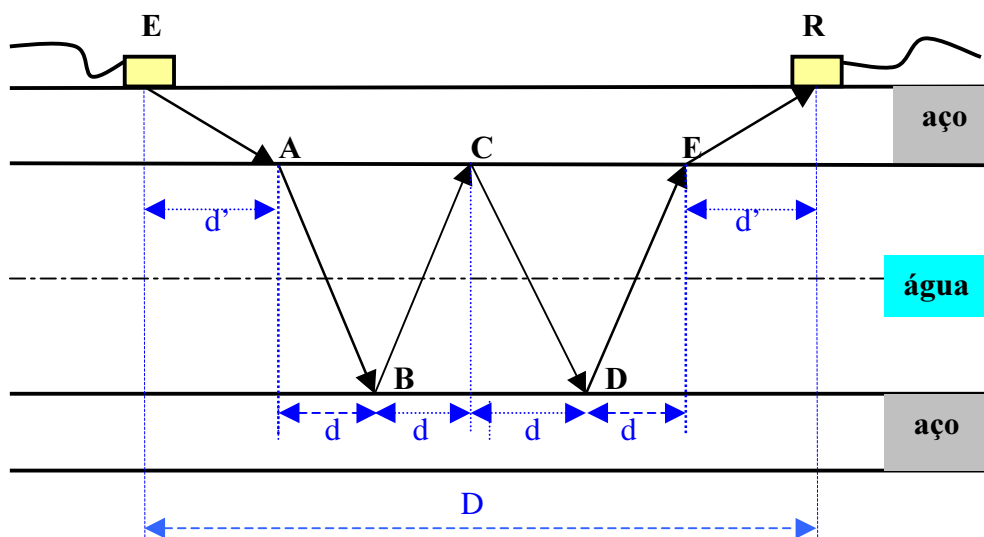


Figura 7 - Modelo do trajeto da onda ultra-sônica – Configuração em W

Distância entre os transdutores E e R:

As distâncias d e d' são as mesmas calculadas anteriormente no item 3.1. (a) e (b), ou seja:

$$d = 24,53 \text{ mm}$$

$$d' = 7,97 \text{ mm}$$

$$\text{Assim: } D = 2 \times d' + 4 \times d = 2 \times 7,97 + 4 \times 24,53 \rightarrow \boxed{D = 114,06 \text{ mm}}$$

Observação importante: Do mesmo modo que nas configurações em Z e V, na execução da instalação dos transdutores na tubulação, d_a não pode ser esquecido, e portanto, deve-se acrescentar 2 (duas) vezes o seu valor na distância entre os transdutores.

3.3.1 Exemplo de cálculo dos tempos teóricos de percurso da onda ultra-sônica desde a sua geração (cristal) no transdutor de emissão até a recepção, para água à 20 °C

a) Vazão = 0

Os tempos $T_{\text{transdutor}}$, $T_{\text{aço}}$ e $T_{\text{água}}$ são os mesmos calculados anteriormente no item 3.1.1 (a):

$$T_{\text{transdutor}} = 5,83 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$T_{aço} = 2,63 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$[T_{\text{água}}]_{AB} = [T_{\text{água}}]_{BC} = [T_{\text{água}}]_{CD} = [T_{\text{água}}]_{DE} = 38,276 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Assim, para esta configuração:

$$T_{\text{total}} = 2 \times T_{\text{transdutor}} + 2 \times T_{aço} + 4 \times [T_{\text{água}}]_{AB}$$

$$[T_{\text{total}}]_{V=0} = 170,024 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 170,024 \text{ } \mu\text{s}$$

b) Vazão 15 m³/h

$$T_{AB} = T_{BC} = T_{CD} = T_{DE} = \frac{l}{c_2 - V \cos \gamma} \quad \rightarrow \quad T_{AE} = \frac{4 \cdot l}{c_2 - V \cos \gamma} = [T_{\text{água}}]_{V \neq 0}$$

Então,

$$V = \frac{1}{\cos \gamma} \left(c_2 - \frac{4 \cdot l}{[T_{\text{água}}]_{V \neq 0}} \right) \quad \text{e} \quad Q = \frac{2058,874 \cdot 10^{-6}}{0,432} \left(1483 - \frac{4 \times 56,763 \cdot 10^{-3}}{[T_{\text{água}}]_{V \neq 0}} \right) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Assim,

$$\frac{15}{3600} [T_{\text{água}}]_{V \neq 0} = 4765,912 \cdot 10^{-6} \left[1483 [T_{\text{água}}]_{V \neq 0} - 227,052 \cdot 10^{-3} \right]$$

$$[T_{\text{água}}]_{V=15} = 153,191 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Como no item 3.1.1.(b),

$$[T_{\text{água}}]_{V \neq 0} = [T_{\text{total}}]_{V \neq 0} - [T_{\text{total}}]_{V=0} + 4 \times [T_{\text{água}}]_{V=0}$$

Assim,

$$[T_{\text{total}}]_{V=15} = 153,191 \cdot 10^{-6} + 170,024 \cdot 10^{-6} - 4 \times 38,276 \cdot 10^{-6}$$

$$[T_{\text{total}}]_{V=15} = 170,111 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 170,111 \text{ } \mu\text{s}$$

A diferença entre os tempos de trânsito da onda US para as vazões 0 e 15 m³/h, será, portanto, 87.10⁻⁹ s (**87 ns**).

4. Conclusões

Foram apresentados os fundamentos teóricos e práticos da medição de vazão pela técnica ultra-sônica de tempo de trânsito. Estes fundamentos representam o estado da arte da técnica ultra-sônica aplicada à medição de vazão de acordo com a literatura pesquisada. O rápido e recente desenvolvimento desta técnica gerou uma quantidade enorme de trabalhos publicados nos últimos anos, com idêntica quantidade de informações, as quais contém em sua maioria, a experiência prática dos autores. Daí a necessidade de coletar e ordenar estes dados na forma como é apresentada neste relatório. Este trabalho é referência para um estudo experimental sobre a medição de vazão por técnica ultra-sônica em andamento no LTE e cujos primeiros resultados serão apresentados em um próximo relatório.

Referências:

- [1] Clamp-On Flowmeters for Fluids, L. Lynnworth, Panametrics, Inc., Sensors Magazine, Aug 2001.
- [2] Industrial Process Control Sensors and Systems, L. C. Lynnworth, V. Mágori, Physical Acoustics, Vol. XXIII, 1999.
- [3] Estudo preliminar de medição de vazão através de ondas ultra-sônicas, R. R. Pio, J. L. H. Faccini, C. A. Lamy e M. S. Q. Bittencourt, Comunicação Técnica IEN-68, Outubro/1995, IEN/CNEN.
- [4] Circuito de Água, Manual de Operação, LTE/SETER/DIRE/IEN, Abril/2003.
- [5] Ultrasonic Measurements, Manual do Usuário, Ultraflux S.A., 1998.
- [6] Ultrasonic Flowmeter Basics, John Flood, Krohne, Inc., Sensors Magazine, Oct 1997.
- [7] Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering techniques, M. L. Sanderson, H. Teung, Department of Process and Systems Engineering, School of Engineering Cranfield University. Cranfield, Bedford MK 43 OAL, UK, Jul 2002.