

TÉCNICA DE CORRELAÇÃO CRUZADA DE SINAIS PARA MEDIÇÃO ÓTICA DE VAZÃO DE LEITE EM SISTEMAS DE ORDENHA

Adriano Marques Jaime, Charles Andre Haab e Leandro Michels

Departamento de Processamento de Energia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

Santa Maria, Brasil

adrianomjcp@gmail.com, eng.charleshaab@gmail.com, leandromichels@gmail.com

Resumo—Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma técnica de correlação cruzada aplicada a dispositivo de medição de vazão de fluido de escoamento intermitentes do tipo *slug-flow* tal como o que se observar em sistemas de ordenha de leite. O dispositivo desenvolvido emprega uma técnica de medição não invasiva baseada na medição óptica da absorbância do leite cru em conjunto com uma técnica de processamento de sinais para medir o tempo de trânsito de partículas entre dois transdutores defasados axialmente. Este artigo propõe o uso de uma técnica de correlação cruzada para medir o tempo de trânsito de partículas entre dois transdutores defasados axialmente. Para validar a técnica, realizou-se um conjunto de experimentos que foram comparados com uma medição absoluta do volume processado. Os resultados obtidos demonstram que a técnica mostra-se viável de ser empregada em sistemas de auxílio no controle de produção leiteira.

Palavras chave – correlação cruzada, medição de vazão, sensor de vazão, transdutor óptico, transmissão espectral de leite

I. INTRODUÇÃO

O controle da produção de leite individualizado em fazendas leiteiras de pequeno e médio porte é um trabalho árduo, muitas vezes manual e pouco eficiente quando somando a rotina de uma propriedade rural, o que torna difícil o controle de produção e obriga a utilização de equipamentos e métodos automatizados, pois essa informação permite mensurar a quantidade e qualidade do leite produzido por cada vaca, além de definir a classificação de lotes para produção [1].

Tratando-se da medição de vazão de um produto alimentício, é necessário a aplicação de técnicas de medição não invasivas, visto que a utilização de peças móveis que obstruam o canal de passagem do leite não é recomendada. Caso contrário, o risco de contaminação pelo acúmulo de resíduos e a pressão pulsada pode acarretar no desgaste precoce do dispositivo [2].

A principal característica de um escoamento *Slung Flow* de duas fases é sua intermitência inerente. O fluxo é instável, mesmo quando as taxas de fluxo de gás e líquido são mantidas constantes na entrada do tubo [3]. O leite é um fluido do tipo *Slung Flow*, caracterizado pela natureza complexa do processo de ordenha, que resulta em um fluxo circulante baixo,

irregular, com muitas bolhas e principalmente intermitente [4]. Além disso, o sistema de sucção do processo de ordenha emprega uma bomba de vácuo operando de forma pulsada, o que resulta no retorno parcial do fluido após cada pulso de bombeamento, aumentando a complexidade da medição [5].

Devido à essas premissas, a instrumentação para essa finalidade apresenta elevada complexidade, como consequência, essa solução é normalmente ofertada integrada à outros sistemas de controle da ordenha de grande porte, inviabilizando aplicação individualizada em fazendas de pequeno e médio porte [6].

Diante disso, o método eletrônico mais empregado para a medição de vazão intermitente em baixo volume é através de medidores ópticos em série. O princípio de funcionamento é baseado na medição do tempo de trânsito de um sinal de marcação (turbulência, aglomeração de partículas etc.) no fluxo entre dois transdutores defasados axialmente. O tempo de trânsito dessa partícula é medido através de um algoritmo que considera a distância entre os transdutores fixada, e com base no intervalo de tempo entre os sinais nos sensores calcula a velocidade do fluido [7] [8]. Após a medição da velocidade, é medido o nível de absorbância do leite ou variação de preenchimento da área transversal, obtendo assim, a vazão e volume de leite produzido como resultado final [9].

A presente técnica apresenta problemas devido a inconstância do fluxo e a formação de bolhas. Por isso, o uso de técnicas de processamento de sinais mostra-se vantajoso para obter medidas mais confiáveis. Uma das técnicas empregadas é a filtragem do sinal em conjunto com a correlação cruzada [10]. Este método tem sido empregado para medição de velocidade de fluxo em muitos medidores de vazão de uso industrial [11].

A proposta deste trabalho é avaliar a utilização da técnica de processamento de sinais de correlação cruzada em sensores de vazão de fluido do tipo *Slung Flow*, com foco na medição de vazão de leite cru em processos de ordenha.

II. CÁLCULO DA VAZÃO DE FLUIDOS COM ESCOAMENTO INTERMITENTE EMPREGANDO SENSORES ÓPTICOS

O método para cálculo de fluxo pulsado utilizando transdutores ópticos tem como premissas, um tubo retangular para

melhor escoamento e arranjo de sensores, com distanciamento entre transdutores de três vezes o diâmetro do canal [10]. O ciclo de pulsação em um sistema de ordenha convencional é em média 60 pulsos por minuto, o que remete em uma frequência de operação de 1 Hz [12].

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático do arranjo de sensores e as equações para determinar o cálculo da área e perímetro da seção de um tubo retangular. O tempo de trânsito de uma dada partícula é calculado a partir da defasagem entre os sinais dos transdutores, conforme é exemplificado.

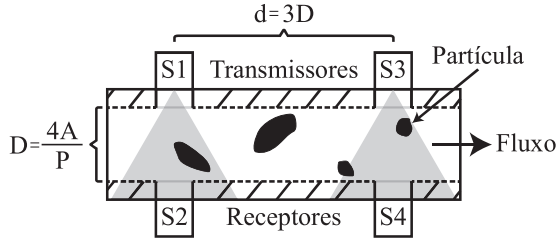


Figura 1. Arranjo de sensores para medição de vazão de fluidos

A taxa de variação de fluxo volumétrico ou *vazão* é dada por:

$$Q = A.V_a \quad (1)$$

em que A é a área da seção transversal do tubo e V_a é a velocidade média do fluxo da seção transversal.

A área da coluna de líquido é medida a partir da variação de sinal dos transdutores, ou seja, a partir da taxa de variação de absorvância do leite ou altura da coluna preenchida, com isso, mede-se o percentual de variação ou preenchimento de leite no canal de fluxo [13].

A *velocidade* do líquido é calculada por:

$$v = \frac{d}{t} \quad (2)$$

onde d é a distância conhecida entre sensores e t é o tempo de trânsito de um sinal de marcação (turbulência, aglomeração de partícula, etc) no fluxo entre dois transdutores separados axialmente [10]. O tempo de trânsito entre dois sinais defasados no tempo, conforme é apresentado na Figura 1 é calculado a partir de um algoritmo de processamento digital.

A Figura 2 apresenta um diagrama da instrumentação e processamento de sinal necessário para leitura e interpretação dos dados coletados para leitura de vazão empregando sensores óticos.

III. TÉCNICA DE CORRELAÇÃO CRUZADA PARA PARA MEDIÇÃO ÓTICA DE FLUIDOS INTERMITENTES

Correlação cruzada é uma ferramenta matemática utilizada em estatística para estimar a causa e relação de efeito em conjuntos de dados populacionais. Na engenharia, essa técnica é aplicada em questões que envolvam defasagem de sinais, no caso da instrumentação industrial, na correlação entre

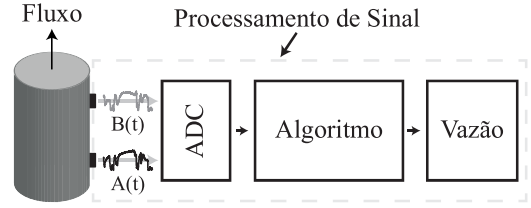


Figura 2. Diagrama do método de medição proposto

dois sinais de transdutores espaçados axialmente ao longo da direção do fluxo a ser medido, que descreve a semelhança geral ou dependência de um sinal em relação ao outro [14].

A Equação que modela o método de correlação cruzada é dada por:

$$R_{AB}(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} A(n).B(n + \tau) \quad (3)$$

onde R_{AB} é a correlação cruzada entre os sinais $A(n)$ e $B(n+\tau)$, τ é a defasagem dos sinais, n é o índice da amostra e N é o número total de amostras. Dessa forma para determinar a defasagem entre os sinais basta calcular qual o valor de τ para que R_{AB} seja máximo.

Para fins didáticos é dado como exemplo dois sinais defasados axialmente, sinal A dado por:

$$A = (a_1, a_2, a_3 \dots a_{100}) \quad (4)$$

e sinal B dado por:

$$B = (b_1, b_2, b_3 \dots b_{100}) \quad (5)$$

Os valores dos sinais são multiplicados entre si e somados, conforme demonstrado por:

$$X_{corr1} = a_1.b_1 + a_2.b_2 + a_3.b_3 \dots + a_n.b_n \quad (6)$$

O valor de (6) obtido é comparado com o valor de outro cálculo de X_{corr} , porém, agora com um dos sinais defasados em uma amostra, esse cálculo é demonstrado por:

$$X_{corr2} = a_1.b_2 + a_2.b_3 + a_3.b_4 \dots + a_{(n-1)}.b_n \quad (7)$$

O processo é repetido até que se encontre o valor de defasagem de amostras na qual o valor de X_{corr} é máximo, de tal modo que, nessa situação, significa que os sinais se encontram em fase.

IV. RESULTADOS

A. Protótipo de sensor desenvolvido

Um protótipo experimental foi desenvolvido com base na metodologia apresentada na Seção 3. O dispositivo físico foi confeccionado em impressora 3D utilizando material PETG, que apresenta resistência de até $80^\circ C$ e indicação para uso em produtos que apresentam contato direto com alimentos [15]. Foi prototipada uma peça retangular e oca para montagem

dos LEDs e fototransistores. A Figura 1 apresenta o arranjo de sensores seguido, sendo *S1* e *S3* LEDs infravermelhos e *S2* e *S4* pares de fototransistores.

O projeto mecânico foi desenvolvido para possibilitar a conexão em série com o sistema de ordenha, para uma vazão pulsada de 60 pulsos por minuto a área interna do canal do instrumento não poderia ser inferior a área interna da tubulação de ordenha, para evitar estrangulamento do canal. Também considerou-se no projeto o distanciamento dos transdutores de doze vezes a razão da área pelo perímetro do canal, para uma seção retangular, ou de três vezes do diâmetro do canal para uma seção tubular [10].

As dimensões do canal para passagem do fluido a ser medido são de 12x8mm e distanciamento de 30mm entre os transdutores. Uma placa de circuito impresso foi montada com a instrumentação necessária para medição e conversão dos dados medidos.

Contudo, o arranjo foi conectado a um adaptador que possibilitou a conexão em uma mangueira padrão de 24,5mm de diâmetro, utilizada em ordenhadeiras automatizadas conforme é apresentado na Figura 3 em vista isométrica.

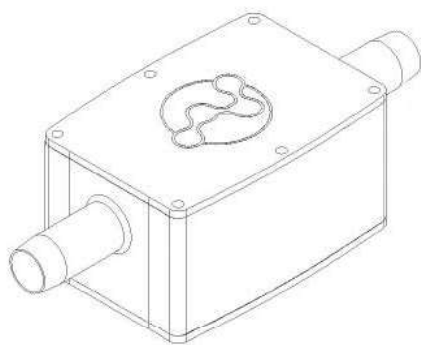


Figura 3. Esboço do protótipo utilizado para coleta de dados (vista isométrica)

A Figura 4 apresenta a vista frontal do instrumento com um canal retangular para passagem do fluido medido, além de compartimento para armazenamento do circuito eletrônico de processamento.

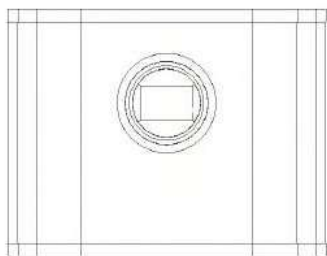


Figura 4. Esboço utilizado para coleta de dados (vista frontal)

Os LEDs são acionados por uma fonte de corrente conforme Figura 5, que garante uma uniformidade na emissão de luz infravermelha [16]. Os fototransistores foram conectados em

um circuito que mantém uma baixa impedância de saída para conexão a um conversor analógico-digital.

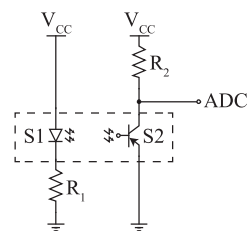


Figura 5. Diagrama esquemático do circuito

O objetivo é medir a variação da absorbância do leite cru durante a ordenha e, com isso, mensurar a variação da área transversal e/ou a variação da altura de coluna de leite (ausência ou presença de leite). A tensão gerada na saída do fototransistor ocasionada pela passagem de leite é medida no primeiro e no segundo par de componentes, a Figura 6 demonstra uma janela do sinal desenhado para fins de entendimento.

As linhas do sinal A na Figura 6 representam o primeiro par de sensores, já a linha representada pelo sinal B pertence ao segundo par, com isso, é possível perceber a similaridade dos sinais, porém, com defasagem devido a distância entre os sensores.

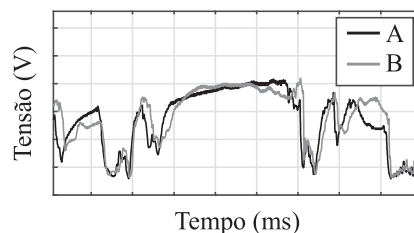


Figura 6. Exemplo de sinal obtido dos fototransistores

B. Setup experimental

Para coleta dos dados utilizou-se um tarro para armazenamento do leite coletado, tal sistema é utilizado para coleta de leite que é posteriormente descartado devido a enfermidades dos animais. O tarro apresenta 5,190Kg e volume máximo de 25L. Durante a ordenha, o leite passa atreves do medidor e é depositado no tarro para posterior pesagem, conforme é exemplificado no diagrama da Figura 7, completando o ciclo de ordenha. Para a pesagem utilizou-se uma balança normalizada do tipo DP35.

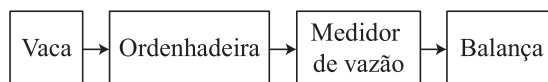


Figura 7. Diagrama esquemático do protótipo usado nos testes

C. Resultados experimentais

Para ajuste e estudo do instrumento, foi preparado um ensaio de bancada com diferentes níveis de preenchimento a 25%, 50% e 100%. A Figura 8 mostra o gráfico de leitura dos sensores com os diferentes níveis de preenchimento. Esse ensaio demonstra que a variação de tensão do fototransistor muda conforme a variação da altura da coluna de leite, e pode ser aproximado por uma equação de primeira ordem.

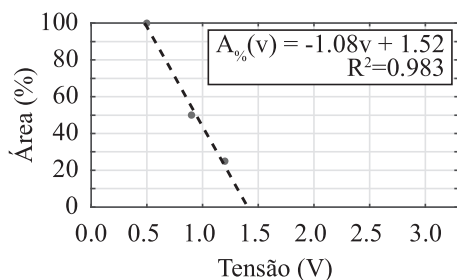


Figura 8. Gráfico de calibração

Para fins de calibração utilizou-se uma balança com certificação *INMETRO* com erro +/- 0,03g, segundo a legislação brasileira, os valores da densidade do leite devem variar entre 1,028 a 1,034 g/mL a 15°C [17]. Empregou-se a seguinte relação para equivalência entre as grandezas medidas:

$$1K_{g\text{leite}} = 1L_{\text{leite}} \quad (8)$$

A Figura 9 apresenta o resultado de medição em um único pulso de leite pelo canal de medição, como pode-se observar existe uma defasagem entre os sinal S_1 e S_3 que resulta no tempo de trânsito de partículas pelo fluido.

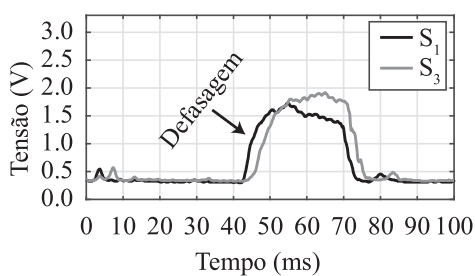


Figura 9. Medição realizada entre os transdutores S1 e S3

A Tabela I apresenta os resultados obtidos a partir da relação 8, obtendo assim o *valor pesado* x *valor medido*, com uma incerteza de medição que varia de 39% à 1% e uma média geral de incerteza de 20%.

A Figura 10 apresenta um gráfico de dispersão dos valores medidos e a equação de regressão para calibração do instrumento.

V. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que o leite cru apresenta elevada absorvância de radiação infravermelha, o que permite

Tabela I
RESULTADOS DE MEDIÇÃO

Valor pesado (kg)	Valor medido	precisão
05,16	08,00	65%
08,23	10,86	76%
08,49	13,82	61%
08,90	12,00	74%
09,23	07,05	76%
09,48	12,01	79%
10,54	09,63	91%
10,66	13,16	81%
10,77	11,13	97%
11,08	16,45	67%
12,83	09,14	71%
13,00	09,17	71%
13,12	11,30	86%
13,33	11,35	85%
13,44	14,47	93%
13,47	12,70	94%
13,70	12,65	92%
13,95	11,49	82%
14,02	13,90	99%
14,44	09,75	68%
14,44	09,97	69%
15,10	13,97	93%
16,09	10,56	66%
16,26	10,33	64%
16,42	13,14	80%
16,78	16,19	96%
17,66	15,34	87%
-	MÉDIA	80%

Fonte: Próprio autor

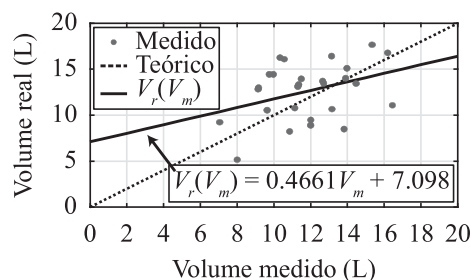


Figura 10. Resultados obtidos

a utilização de sensores ópticos para a medição precisa do volume produzido de leite. Com base nos dados, pode-se afirmar que um medidor de vazão óptico em conjunto com a técnica de correlação cruzada fornecem uma boa alternativa como ferramenta de auxílio para a medição da vazão de leite, com a medição da ausência ou presença de leite cru. Entretanto, pela característica do fluido ser turbulento e de baixa vazão é necessário uma maior amostragem para conseguir alcançar uma maior precisão e calibração do instrumento. Contudo, os primeiros ensaios demonstram viabilidade técnica e científica em desenvolver uma metodologia de algoritmo para medição precisa por infravermelho.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil

REFERÊNCIAS

- [1] D. Vilela, J. C. d. Resende, J. B. Leite, and E. Alves, “A evolução do leite no Brasil em cinco décadas,” *Revista de Política Agrícola*, vol. 26, no. 1, pp. 5–24, 2017.
- [2] R. F. Godinho and R. d. C. R. Carvalho, “Gestão de sistemas de produção de leite,” *Ciência ET Praxis*, vol. 2, no. 03, pp. 77–82, 2009, number: 03. [Online]. Available: <https://revista.uemg.br/index.php/praxys/article/view/2088>
- [3] Y. Taitel and D. Barnea, “Two-phase slug flow,” in *Advances in heat transfer*. Elsevier, 1990, vol. 20, pp. 83–132.
- [4] A. Kupczyk, M. Gaworski, J. Szlachta, K. Tucki, J. Wojdalski, A. Luberański, B. Drózdź, M. Krzywonos *et al.*, “A slug flow model in a long milk tube for designing a milking unit control system,” *JAPS, Journal of Animal and Plant Sciences*, vol. 29, no. 5, pp. 1238–1246, 2019.
- [5] C. A. V. Paiva, L. G. R. Pereira, T. R. Tomich, and F. P. Possas, “Sistema de ordenha automático,” *Embrapa Gado de Leite-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, 2015.
- [6] “A correlation-based optical flowmeter for enclosed flows.” [Online]. Available: <https://doi.org/10.13031/trans.56.10052>
- [7] D. L. Gysling, R. S. McGuinn, and C. R. Winston, “Optical flow rate measurement using unsteady pressures,” Mar. 25 2003, uS Patent 6,536,291.
- [8] H. Wamhof, M. Krasutzki, P. Kaever, and J.-h. Reurik, “Method and device for determining the volumetric flow rate of milk flowing during a milking process,” Jan. 2 2007, uS Patent 7,155,971.
- [9] E. Brayer, “Method and apparatus for measuring liquid flow,” May 26 1992, uS Patent 5,116,119.
- [10] M. S. Beck, “Correlation in instruments: cross correlation flowmeters,” *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 14, no. 1, pp. 7–19, Jan. 1981, publisher: IOP Publishing. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/14/1/001>
- [11] W. Q. Yang and M. S. Beck, “An intelligent cross correlator for pipeline flow velocity measurement,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 8, no. 2, pp. 77–84, Jun. 1997. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598697000228>
- [12] R. W. Blowey and P. Edmondson, *Mastitis control in dairy herds*. Cabi, 2010.
- [13] D. A. Gerasimov, S. A. Terentiev, A. V. Anikeev, E. S. Povenov, and E. V. Sytin, “Measuring of the irregular flow of milk by the contactless optical flow sensor,” Jun. 2017, pp. 388–390, ISSN: 2325-419X.
- [14] C. Wang, L. Zhang, L. Xie, and J. Yuan, “Kernel cross-correlator,” in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 32, no. 1, 2018.
- [15] K. Szykiedans, W. Credo, and D. Osiński, “Selected mechanical properties of petg 3-d prints,” *Procedia Engineering*, vol. 177, pp. 455–461, Jan. 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705817307531>
- [16] A. P. Malvino and D. J. Bates, *Eletrônica*. AMGH, 2011.
- [17] I. Nacional, “Instrução normativa nº 76, de 26 de novembro de 2018 - imprensa nacional.” [Online]. Available: <https://www.in.gov.br/materia>