

Método de identificação leite cru adulterado via ultrassom e regras fuzzy

Laura B. Alves,¹ Elaine C. C. Poletti,² Francisco J. Arnold,³
FT – UNICAMP, 13.484-332, Limeira/SP.

Eduardo T. Costa,⁴
CEB – UNICAMP, 13.083-852, Campinas/SP.

Resumo O propósito deste trabalho é apresentar um modelo de avaliação e classificação de amostras de leite cru baseado em um sistema de regras fuzzy. O leite cru, de origem bovina, é muito utilizado como fonte de alimento e está sujeito à possíveis adulterações que comprometem sua qualidade e sua composição trazendo risco à saúde humana e problemas de saúde pública. Desta forma, baseados em experimentações realizadas com um equipamento de ultrassom, parâmetros tais como o coeficiente de atenuação e a velocidade de propagação de ondas de amostras de leite foram avaliados e constituíram um sistema de apoio à tomada de decisão no tocante à regularidade das amostras. O método de análise desenvolvido caracteriza-se como um método alternativo que não causa interferências nem riscos às propriedades físico-químicas do produto, e se coloca como uma possibilidade de pré-análise e de pré-verificação da integridade das amostras.

Palavras-chave: *Qualidade do Leite, Modelagem, Lógica Fuzzy, Propagação de ondas.*

1. Introdução

Do ponto de vista nutricional, o leite é considerado um alimento rico e completo, essencial aos primeiros dias de vida dos humanos e tantos outros mamíferos. Sua composição é basicamente a junção de água, proteínas,

¹lauraalves@pos.ft.unicamp.br

²elainec@ft.unicamp.br

³arnold@ft.unicamp.br

⁴educosta@ceb.unicamp.br

gordura, sais minerais em solução. No mercado, o comércio do leite e seus derivados permite a movimentação de bilhões de reais em todo o mundo.

Devido a sua importância, a conservação de sua integridade é uma preocupação e coloca-se como um grande desafio de cooperativas e laticínios, pois a composição do leite pode sofrer alterações diárias, naturais, influenciadas por diversos fatores, tais como: espécie, raça, indivíduo, idade e saúde do animal, estágio da lactação, alimentação, estações do ano, manejo, pressão intramamária, dentre outros (CQualiLeite, 2014).

A legislação vigente no Brasil do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, MAPA, respeitando as possíveis variações da composição do leite, determina valores mínimos de seus componentes (Ministério da Agricultura, 1952). Todavia, há diversos registros de adulterações realizadas em lotes de leite com a adição de água, geralmente associados com outros produtos tais como água oxigenada, soda cáustica (hidróxido de sódio) e até mesmo ureia (Sommerfeld, 1901) (Gasparini, 2014) (Rodrigues e Griesinger, 2014).

As análises de controle de qualidade do produto, que podem indicar irregularidades são, normalmente, realizadas em laboratórios e caracterizam-se, geralmente, por procedimentos onerosos com tempo e grandes valores investidos. Desta forma são realizadas esporadicamente e por meio de amostragens.

Dentre as opções acessíveis, o ultrassom é uma alternativa para o desenvolvimento de um equipamento de medição com potencial, exato, pouco explorado e com custo menor. Desta maneira, esta pesquisa buscou desenvolver um método de avaliação e classificação de amostras de leite cru quanto à sua integridade, baseado em um equipamento de ultrassom e um sistema de apoio à decisão formado por um controlador fuzzy. A metodologia é baseada no estabelecimento de uma correlação de atenuação do ultrassom e da velocidade de propagação de ondas acústicas no leite com a presença de água como elemento adulterante.

2. O Ultrassom

O ultrassom consiste, basicamente, em uma onda mecânica cuja frequência está acima de 20 kHz e tem como característica a indução das partículas que constituem o material e que conduz esse tipo de onda sonora à vibração. A investigação de propriedades físicas de um meio de propagação podem ser feitas usando ultrassom, sendo que uma das técnicas mais conhecidas é a de pulso-

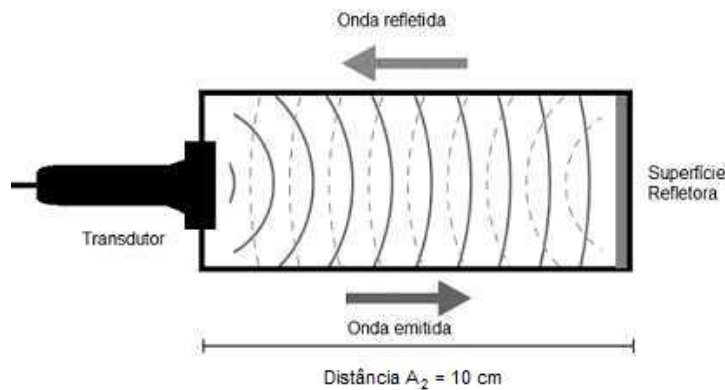


Figura 1: Método de experimentação pulso-eco.

eco. A Figura 1 mostra o sistema de um método denominado pulso-eco, no qual o mesmo transdutor funciona como emissor e receptor do sinal. A onda ultrassônica passa pelo leite, encontra a superfície refletora e volta ao ponto inicial.

Ao se propagar por um meio, neste caso as amostras de leite cru, o sinal de ultrassom sofre atenuação, principalmente, devido à absorção pelo meio e ao espalhamento do sinal pelas partículas de gordura presentes. O tamanho das partículas de gordura do composto influencia este processo pois, com a homogeneização do leite sem desnatado, há uma substancial interferência das moléculas na atenuação que cresce à medida que o grau de homogeneização aumenta (Christensen, 1988) (Miles et al., 1990).

No estudo das ondas no leite destacam-se duas variáveis: o coeficiente de atenuação e a velocidade de propagação de onda. O coeficiente de atenuação está relacionado ao *Broadband Ultrasound Attenuation*, BUA, um parâmetro de propagação avaliado que pode ser entendido como a expressão da taxa de atenuação do sinal ultrassônico em uma faixa de frequências demarcada.

O BUA define-se pela comparação dos espectros de frequência dos sinais ultrassônicos de um material de referência e de um material teste, na faixa de frequências desejada e é determinado a partir do coeficiente angular da reta gerada pela diferença em base logarítmica da Transformada de Fourier aplicada ao sinal capturado e a um sinal de referência, como mostra a Equação 2.1 (Hull et al., 1996) (Maia et al., 2009).

$$\alpha(f) = |20 \log_{10} |V_r| - 20 \log_{10} |V_m|| \quad (2.1)$$

Onde:

- $V_r(f)$ é o valor absoluto do espectro de frequência do sinal de referência;
- $V_m(f)$ é o valor absoluto do espectro de frequência do sinal que se propagou no material.

Após a aplicação da Equação 2.1, na faixa de frequências desejada (aqui padronizada de 4 a 7 MHz) é traçada uma reta pelo método dos mínimos quadrados. O coeficiente angular dessa reta é o coeficiente de atenuação da amostra, como pode ser visto na Figura 2 para uma amostra com 20% de água adicionada e que tem como referência uma amostra de leite cru considerada pura.

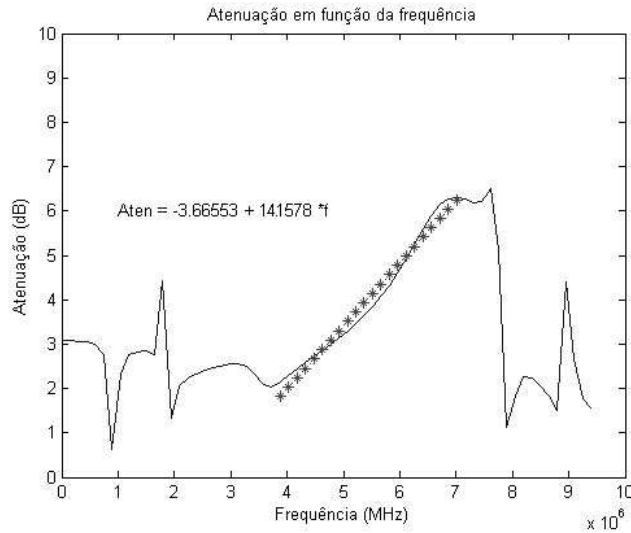


Figura 2: Reta do BUA de uma amostra adulterada com 20% de água.

A velocidade de propagação é tida como a velocidade de um pulso de ultrassom que se propaga por um meio qualquer e pode ser entendida pelo conceito básico de velocidade: variação da distância pela variação do tempo. O cálculo da velocidade de propagação baseia-se na técnica de detecção de picos, como pode ser observado na Figura 3.

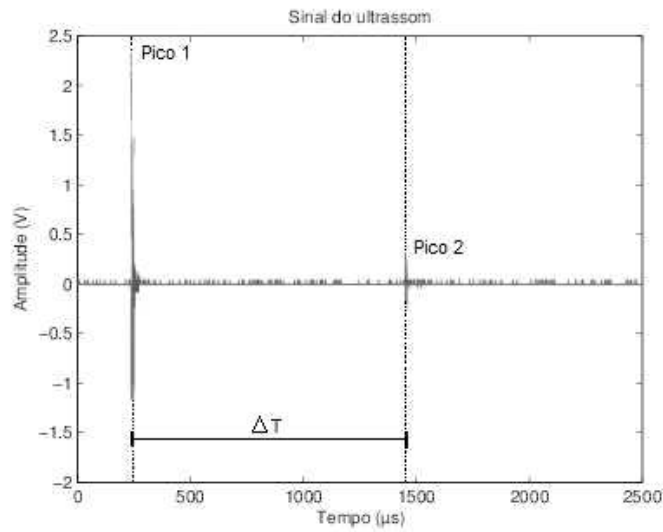


Figura 3: Sinal recebido pelo ultrassom, com picos da emissão e da recepção.

Desta forma, o tempo gasto na trajetória, desde a identificação do pico do sinal de emissão até o da chegada, no pico do sinal recebido, pode ser determinado tomando-se, por se tratar de um sistema de transmissão pulso-eco, o intervalo de tempo dividido por dois para que seja compatível com a distância de interesse (Equação 2.2).

$$V = \frac{A_2}{\frac{\Delta T_{12}}{2}} \quad (2.2)$$

Assim, sendo a distância percorrida conhecida, pois equivale à distância do transdutor até a face refletora do equipamento utilizado, a velocidade de propagação é medida considerando-se a diferença de tempo (ΔT_{12}) existente entre o pulso emitido (Pulso 1) e o primeiro eco (Pulso 2), com o comprimento do reservatório onde se encontra a amostra, A_2 . O valor encontrado que define a velocidade de propagação é uma das variáveis de entrada do sistema a ser analisado posteriormente.

3 A Modelagem dos Parâmetros

Considerando que a gordura e a quantidade de água no leite possuem uma relação direta com os critérios de regularidade do leite, estabeleceu-se uma relação da mesma com a velocidade de propagação e com coeficiente de atenuação. A partir daí buscou-se por instrumentos de modelagem que nos levaram até os controladores fuzzy, da Teoria dos Conjuntos Fuzzy, para o desenvolvimento de um sistema de tomada de decisão no tocante à aceitabilidade da amostra de leite.

Os controladores fuzzy, de acordo com (Barros et al., 2007), se constituem de um sistema baseado em regras fuzzy, SBRF, e se utilizam da lógica fuzzy nos processos de modelamentos onde algumas regras linguísticas, traduzidas por conjuntos fuzzy, descrevem uma base de conhecimento fundamental do processo.

Tais instrumentais têm sido amplamente utilizados em estudos de diversas naturezas e têm caracterizado um material em potencial para modelagens diversas, principalmente em situações em que os pressupostos representam relações múltiplas e situações difusas, englobando-se de forma totalitária. (Zadeh, 1965) (Barros et al., 2014) (Poletti e Meyer, 2009) (Bassanezi et al., 2012) (Oliveira, 1999) (Oliveira et al., 2010).

O controlador fuzzy é composto por quatro componentes: o processamento de entrada, a base de regras, a máquina de inferência e o processamento de saída.

O processamento de entrada é responsável pela fuzzyficação das entradas e consiste em mapear estes valores numéricos (obtidos nas medições de grandezas, por exemplo) em graus de pertinência a um ou mais conjuntos fuzzy. A inferência é a etapa de combinação dos graus de pertinência por meio de uma base de regras previamente definidas que estão diretamente relacionadas ao problema em si a ser modelado. O método de inferência utilizado neste estudo foi o de Mamdani.

A combinação produzida por meio das regras produz relações entre os conjuntos que, através do método de inferência, devolve, no final do processo, um valor numérico compatível com as grandezas sob controle na defuzzyficação, daí, o processamento de saída. O método de defuzzyficação considerado foi o Centro de Gravidade, semelhante à média ponderada para a distribuição de dados (Missio e Barros, 2009).

Para a modelagem, diversos experimentos foram desenvolvidos no La-

boratório de Ultrassom do Centro de Engenharia Biomédica (CEB) da UNICAMP, utilizando-se de um transdutor de ultrassom modelo Funbec 5 MHz/6mm fabricante MED. L. F., um equipamento emissor-receptor de ondas da Panametrics e um osciloscópio da Tektroniks.

Para as experimentações foram realizadas adulterações com adição de água em amostras de leite cru em proporções de 3, 6, 10, 15 e 20% de adição de água em amostras cujo volume total foi de 180 ml.

Como sinal de referência, utilizou-se amostras de leite cru sem adulteração com água. O leite utilizado foi proveniente de pequenos produtores da região de Limeira-SP, e os ensaios foram realizados em laboratório no mesmo dia da coleta, com as amostras mantidas a 25°C de temperatura.

As regras fuzzy foram estabelecidas de acordo com a estrutura SE 'condição' ENTÃO 'resultado'. O sistema contou com um controlador composto por duas variáveis de entrada: a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação, e uma saída: a aceitabilidade da amostra.

Primeiramente foram realizados os experimentos para definir, então, os limiares das variáveis envolvidas bem como o seu comportamento no conjunto de base de regras fuzzy.

A velocidade de propagação de onda foi modelada linguisticamente por: muito baixa (MB), baixa (BB), média (MD) e alta (AA) e o coeficiente de atenuação por: muito baixo (MB), baixo (BB), médio (MD), alto (AA) e muito alto (MA).

Com relação à aceitabilidade da amostra, utilizou-se: aceitável (AC), inaceitável (IN) ou aceitável com restrições (AR).

4. Resultados e Discussões

Ao considerar a amostra de leite cru pura como referência, verificou-se que *quanto maior o índice de água adicionada, maior o coeficiente de atenuação da onda e menor a velocidade de propagação.*

A velocidade de propagação da onda apresentou-se influenciada pela quantidade de partículas existentes na amostra analisada de modo que: *quanto maior a quantidade de partículas, maior os desvios realizados pelas ondas e, conseqüentemente, maior a sua velocidade e quanto menor a quantidade de partículas de gordura no meio, menores os desvios e menor a velocidade de propagação da onda.*

De acordo com (Nazario et al., 2009), existe uma dependência entre o coeficiente de atenuação com o nível de homogeneização das mesmas. Neste sentido, os ensaios indicaram que o coeficiente de atenuação está diretamente relacionado à homogeneização das partículas, assim como constatado por (Nazario et al., 2006), *quanto mais água é adicionada às amostras, maior a homogeneidade do líquido*.

Os resultados oriundos dos experimentos subsidiaram o estabelecimento das funções de pertinência do sistema fuzzy, bem como o modelamento das regras linguísticas. Na Tabela 1 estão as variáveis do sistema relacionada com suas siglas e limites.

Tabela 1: Tabela com as variáveis do sistema

Caracterização	Sigla	Limite atenuação	Limite velocidade	Limite aceitabilidade
Muito Baixo	MB	[0; 4]	[1464; 1510]	-
Baixo	BB	[1; 7]	[1505; 1520]	-
Médio	MD	[4; 10]	[1515; 1535]	-
Alto	AA	[7, 13]	[1530; 1610]	-
Muito Alto	MA	[10; 18]	-	-
Inaceitável	IN	-	-	[0; 4]
Aceitável com Restrições	AR	-	-	[3; 5]
Aceitável	AC	-	-	[4; 10]

Os limites adotados na Tabela 1 foram determinados a partir das experimentações realizadas, respeitadas as especificações de órgãos governamentais com base na Instrução Normativa 62 (Ministério da Agricultura, 2011) e possibilitam, então, o modelamento das funções de pertinência para a velocidade de propagação, Figura 4, para o coeficiente de atenuação, Figura 5 e para a aceitabilidade das amostras, Figura 6.

O conjunto de base de regras, estabelecido com base nas experimentações e no relacionamento entre as variáveis, segue na tabela 2.

No total foram 20 regras linguísticas que modelaram o relacionamento entre as variáveis.

No final do processo, as amostras caracterizadas por Aceitável indicam que estão dentro dos limiares mínimos que garantem a integridade da amostra. Aquelas caracterizadas por Aceitável com Restrições indicam que tais amostras

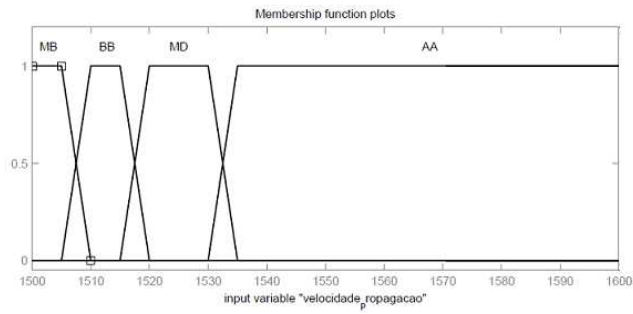


Figura 4: Função de pertinência para velocidade de propagação.

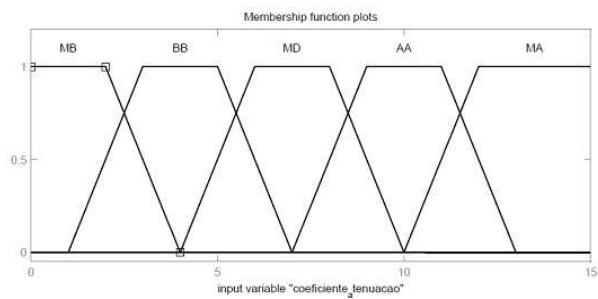


Figura 5: Função de pertinência para coeficiente de atenuação.

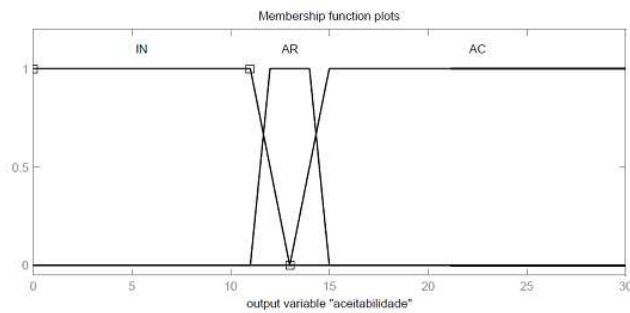


Figura 6: Função de pertinência para aceitabilidade.

precisam ser melhor analisadas para uma conclusão mais efetiva. Desta forma, o sistema sugere que análises físico-químicas sejam realizadas para a confirmação de uma possível adulteração. O mesmo acontece com as amostras consideradas

Tabela 2: Relação entre as variáveis do sistema

Coefficiente de Atenuação	Velocidade de Propagação	Aceitabilidade
BB	AA	AC
MA	BB	IN
MB	AA	AC
MA	MB	IN
AA	BB	IN
AA	MB	IN
MD	BB	IN
MD	MB	IN
MB	MD	AC
BB	MD	AC
AA	MD	IN
MD	MD	AR
MD	AA	AR
AA	AA	AR
MA	AA	IN
MA	MD	IN
BB	BB	AR
MB	BB	AR
MB	MB	AR
BB	MB	AR

Inaceitáveis.

Os resultados confirmam que o nível de homogeneização da amostra - que influencia o tamanho dos glóbulos de gordura do leite - é o fator que interfere no coeficiente de atenuação (Nazario et al., 2009), e a velocidade de propagação apresenta dependência com a temperatura do leite (Nazario et al., 2006). Na Figura 7, estão relacionadas as variáveis de entrada e saída do sistema.

De acordo com os resultados, verifica-se que a resposta do sistema fuzzy, após a calibração dos limiares, se mostrou adequada ao cenário. Os intervalos dos limiares foram definidos levando-se em consideração que as amostras também diferem entre si, em virtude da composição de extratos, teores de gordura, proteína, cálcio, entre outros, em virtude de fatores como a alimentação, raça, idade, estágio da amamentação entre outros podem afetar a composição físico-química do leite.

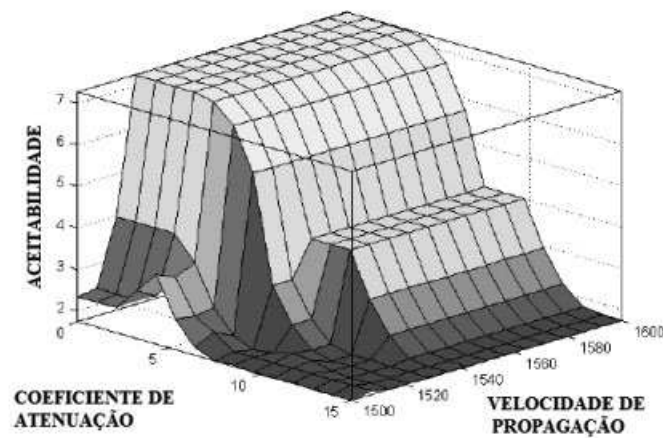


Figura 7: Relação entre as variáveis do sistema fuzzy.

5. Conclusões

O foco deste estudo foi o desenvolvimento de um método de avaliação e classificação de amostras de leite cru no tocante à regularidade e integridade da amostra. Desta forma, utilizando-se de ferramentas da lógica fuzzy acoplada à experimentação, foi possível modelar o fenômeno e identificar possíveis adulterações em amostras de leite cru, em termos dos índices de água e gordura, de acordo com os limiares estabelecidos em virtude das adulterações.

É importante ressaltar que o método desenvolvido não substitui as análises regulares físico-químicas, nem mesmo tem esta pretensão, entretanto a validação do método via experimentos laboratoriais permite a confirmação da eficiência da técnica, atrelada a um baixo custo, viabilidade que beneficia o setor leiteiro, com destaque para o pequeno produtor e para o laticínio, de modo que análises possam ser realizadas instantaneamente *in loco* e com maior frequência.

Agradecimentos

À CAPES pelo fomento à pesquisa, ao programa de pós-graduação da FT-UNICAMP.

Referências

- Barros, L. C., Oliveira, R. Z. G., Leite, M. B. F., e Bassanezi, R. C. (2014). Epidemiological models of directly transmitted diseases: An approach via fuzzy sets theory. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based System*, 22:769–781.
- Barros, L. C., Peixoto, M. S., Jafelice, R. S. M., e Bassanezi, R. C. (2007). Introdução à teoria dos conjuntos fuzzy. *Anais do Simpósio de Aplicações com Lógica Fuzzy*.
- Bassanezi, B. S., de Oliveira-Filho, A. G., Jafelice, R. S. M., Bustorff-Silva, J. M., e Udelsmann, A. (2012). Postoperative vomiting in pediatric oncologic patients: prediction by a fuzzy logic model. *Pediatric Anesthesia*, 23:68–73.
- Christensen, D. A. (1988). *Ultrasonic Bioinstrumentation*. Harper and Row.
- CQualiLeite (2014). Centro integrado de monitoramento da qualidade dos alimentos. Brasil.
- Gasparini, R. (2014). Ministério da agricultura interdita estabelecimentos que adulteravam leite. *Jornal Agrosoft*.
- Hull, J. B., Langton, C. M., Barker, S., e Jones, A. R. (1996). Identification and characterization of materials by broadband ultrasonic attenuation analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 56:148–157.
- Maia, J. F., Costa, E. T., Button, V. L. S. N., e Neto, J. F. M. (2009). Bua osteoporosis diagnostic with single position vs scanning systems: a comparative study. *The 2002 IEEE International Ultrasonics Symposium*, 1:1082–1085.
- Miles, C. A., Shore, D., , e Langley, K. (1990). Ultrasonics. *Information and Control*, 28:394–400.
- Ministério da Agricultura, P. e. A. (1952). Riispoa1952. Brasil.

- Ministério da Agricultura, P. e. A. (2011). Instrução normativa 62. IN62.
- Missio, M. e Barros, L. C. (2009). Modelo probabilístico para uma variável fuzzy. *Biomatemática (UNICAMP)*, 19:25–38.
- Nazario, S. L. S., Isepon, J. S., Buiochi, F., Adamowski, J. C., Kitano, C., e Higuti, R. T. (2009). Caracterização de leite bovino utilizando ultra-som e redes neurais artificiais. *Sba Controle e Automação*, 20.
- Nazario, S. L. S., Kitano, C., Isepon, J. S., e Higuti, R. T. (2006). Obtenção do teor de gordura do leite através de técnicas de ultra-som e redes neurais. *Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications*.
- Oliveira, R. Z. G. (1999). *Controle ótimo da aplicação de fungicidas na lavoura*. PhD thesis, UNICAMP, Campinas/SP, Brazil (*in Portuguese*).
- Oliveira, R. Z. G., Barros, L. C., Leite, M. B. F., e Bassanezi, R. C. (2010). Um estudo de controle ótimo usando base de regras fuzzy. *Anais do Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy*, páginas 132–152.
- Poletti, E. C. C. e Meyer, J. F. C. A. (2009). Dispersão de poluentes em sistema de reservatório: Modelagem matemática via lógica fuzzy e aproximação numérica. *Biomatemática (UNICAMP)*, 19:57–67.
- Rodrigues, A. e Griesinger, D. (2014). Cerca de 1 milhão de litros de leite adulterado foram colocados à venda, diz ministério público. *Jornal Agrosoft*.
- Sommerfeld, P. (1901). *Methods for the examination of milk for chemists, physicians and hygienists*. Alex and Eger.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353.

