

Desenvolvimento de um dispositivo com difração de luz para medição do teor de gordura do leite em ambiente acadêmico

Guilherme Suarez Baglione, 061210026@faculdade.cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Alyssa Heluany Zacarias Alves, 061210002@faculdade.cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Guilherme Pereira Correia de Oliveira, 061210033@faculdade.cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Henrique Araújo dos Anjos Lacerda Aímola, 061210030@faculdade.cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Henrique Ernesto de Oliveira, 061210032@faculdade.cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Marcella Cassares Pires, pro21002215@cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Marco Aurélio Vinchi de Oliveira, pro9111@cefsa.edu.br, Faculdade Engenheiro Salvador Arena

Resumo

Este estudo tem como princípio o desenvolvimento de uma solução que meça o teor de gordura do leite com base na difração da luz de dois lasers incidentes, absorvida por dois fotodiodos, embasando-se no princípio da taxa de espalhamento da luz (*Scattered Transmition Ratio* – STR). A pesquisa utilizou referencial teórico com base em um experimento que mediu teor de gordura através do STR. A estrutura do protótipo consiste em um orifício para a amostra e dois lasers apontando para dois fotodiodos, além de um Arduino e um amplificador. As amostras foram preparadas usando ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA) Tetrassódico e analisados teores entre 0,1% e 6% de gordura. Os resultados mostram que a relação entre o teor de gordura do leite e o STR é linear a partir de 2,5%. Para a continuidade, sugere-se estudar o aumento da amplificação e aplicação da programação na solução.

Palavras-chave: Gordura. Leite. Difração. Luz.

Introdução

De modo geral, o leite, por ser um alimento complexo na sua composição contendo concentrações elevadas de macro e micronutrientes, contribui para a nutrição e desenvolvimento humano (Siqueira, 2019). Adicionalmente, os estudos de Anuário do Leite (2023) nas regiões aderentes ao Programa de Pagamento por Qualidade do Leite (PPQL), que considera teores de gordura como critérios de remuneração ao produtor, o preço-base do leite pode ser acrescido com base nesses componentes, o que mostra a importância econômica destes no processo produtivo e a necessidade de controlá-los.

Para a realização do teste de medição de gordura, Instituto Adolfo Lutz (2008) apresenta o método de Gerber, que utiliza ácido sulfúrico, álcool isoamílico e posterior centrifugação para a concretização do teste. No quesito de equipamentos, são necessários lactobutirômetro de Gerber, pipetadores automáticos, pipetas volumétricas e termocentrífuga/centrífuga de Gerber, necessitando em média 23 minutos para a realização do processo (Instituto Adolfo Lutz, 2008).

Os estudos de Xin *et al.* (2006) se baseiam na teoria de que somente as moléculas de gordura e proteína possuem tamanho suficiente para, a partir da dispersão do espectro de luz, determinar suas concentrações na solução. Para tanto, Xin *et al.* (2006) utilizaram a técnica de espalhamento de luz a laser para realizar a medição do teor de gordura do leite. Uma solução de leite com ácido etilenodiamino tetraacético (EDTA) foi feita para desnaturar as proteínas da amostra, pois assim a proteína não gera interferência na medição do teor de gordura (Xin *et al.*, 2006).

O trabalho de Xin *et al.* (2006) valida o método que utiliza a variável STR de luz (taxa de espalhamento da luz), através de um laser He-Ne de 632,8 nm de comprimento de onda para medição de gordura e proteína do leite, de modo que os ângulos da luz espalhada variaram entre $90^\circ \pm 0,05^\circ$ e $0^\circ \pm 0,05^\circ$, a partir do feixe de luz incidente.

Portanto, em contrapartida a métodos químicos convencionais, foi escolhido para estudo o de difração de luz, que se utiliza do STR para relacionar concentrações de gordura, conforme descrito por Xin et al (2006). O objetivo do projeto é estabelecer uma medição de até 10 segundos (o convencional consome 23 minutos), com resolução de até 0,1 % na faixa de teor de gordura entre 0,1 % e 6 %, com atenção maior a partir de 2,5% (por serem os teores mais próximos ao leite ordenhado), conforme descrito por TetraPak (2023), utilizando ferramental de fácil manuseio para uso em ambiente acadêmico, com possibilidade de uso em campo para pequenos produtores.

Metodologia

A Figura 1 apresenta o fluxograma funcional do protótipo. No item (1), é representado o laser, que tem sua luz difratada pelas partículas de gordura do leite. Os feixes de luz são captados pelos fotodiodos, que são sensores de luz, nos itens (2), um a 180° e outro a 90° em relação ao feixe incidente. Os sensores enviam os dados ao amplificador operacional presente no item (3), que amplifica o sinal de corrente e converte em tensão. No item (4), é mostrado o Arduino Nano, que trata o sinal de tensão e envia o dado tratado ao display, presente no item (5). O osciloscópio, apresentado no item (6), é utilizado para medir as tensões dos dois sensores na saída do amplificador durante os testes de funcionamento.

Figura 1 - Fluxograma de funcionamento



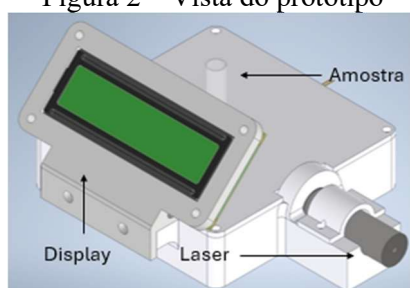
Fonte: Autor (2025)

A base do protótipo foi idealizada em software CAD e materializada por meio de impressão 3D FDM utilizando filamento ABS. O modelo possui suporte para o laser e os dois fotodiodos, e é projetado para diminuir a interferência na medição.

Como recipiente para o leite, foi utilizado um conta-gotas de vidro soda-cal com 7 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento para ser lido pelo laser. A vista na Figura 2 ilustra a montagem em 3D com a

ampola de vidro posicionada logo atrás do display. Há também a tampa do protótipo, que é utilizada para isolar a luz externa da amostra durante a medição com o laser, além do display para apresentar os resultados. As cavidades internas da base servem como passagem para a luz difratada, para então ser capturada pelo fotodiodo.

Figura 2 – Vista do protótipo

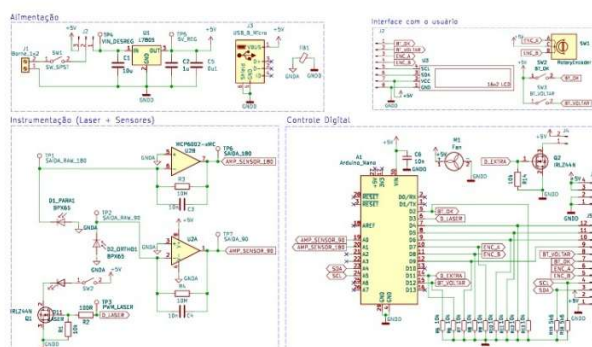


Fonte: Autor (2025)

O sinal de saída do amplificador é lido por duas entradas analógicas distintas do Arduino, sendo a faixa de valores lidos pelo ADC da placa entre 0 e 204, e após o tratamento de dados e conversão para teor de gordura através de programação, estes são enviados ao display. Foi feito uso do osciloscópio durante o desenvolvimento para entender o tempo de acomodação da amplificação e oscilações indesejadas.

Para o contato inicial da medição, foi utilizado um Laser Genérico 250mW 635nm. Ao apontar para a amostra, o leite difrata a luz, que é captada por dois fotodiodos BPX 65. O sinal lido pelos fotodiodos é enviado a um amplificador operacional duplo. Devido ao baixo sinal lido, o fator de amplificação é de 10^7 , convertendo o sinal de corrente na ordem dos 100 nA de cada fotodiodo em tensões na ordem dos 1 V. A Figura 3 apresenta o diagrama elétrico.

Figura 3 – Diagrama elétrico



Fonte: Autor (2025)

Xin et al (2006) apresenta uma fórmula matemática que define o teor de gordura do leite através da medição do STR, onde o termo $I_{\perp}$ representa *scattered light intensity* (intensidade da luz espalhada, a 90° do eixo do feixe incidente) e o termo $I_{\parallel}$ representa *transmitted light intensity* (intensidade da luz transmitida, no próprio eixo do feixe incidente), ambas sendo absorvidas pelos sensores fotodiodos. Peatross e Ware

(2025) afirmam que os termos *intensity* e *irradiance* são sinônimos, e define irradiância (do inglês *irradiance*) como a potência eletromagnética entregue a um receptor. Possui grandeza em W / cm^2 .

Outro termo que aparece é o de responsividade, que segundo Ben Miller (2023), é a razão entre a tensão ou corrente gerada por um sensor e a potência óptica (eletromagnética) que incide sobre ele em Watts. A responsividade é uma grandeza também apresentada por Mouser Eletronics (2025) na folha de dados do sensor BPX 65, medida em A/W. Como Xin et al (2006) apresenta o STR como uma razão entre duas grandezas, na equação simplificada predomina a razão entre as duas tensões ou correntes lidas.

$$STR = \frac{(Tensão_{\perp} \text{ ou } Corrente_{\perp})}{(Tensão_{\parallel} \text{ ou } Corrente_{\parallel})} \quad (1)$$

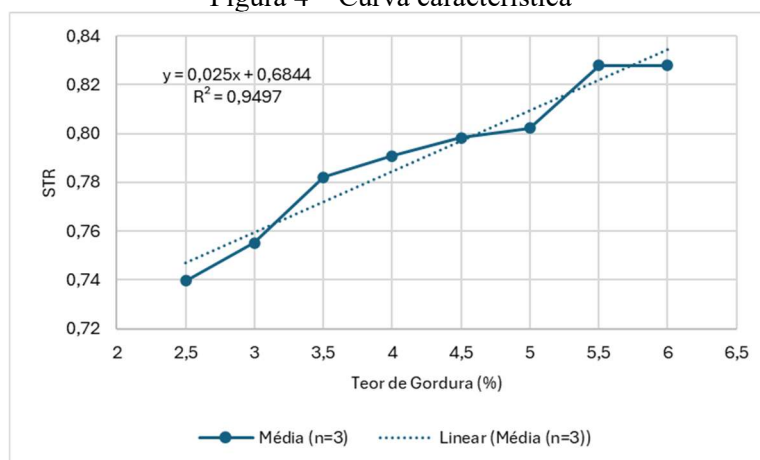
Onde Tensão $_{\perp}$ ou Corrente $_{\perp}$ representa a tensão ou corrente absorvida pelo fotodiodo a 90° , e Tensão $_{\parallel}$ ou Corrente $_{\parallel}$ representa a tensão ou corrente absorvida pelo fotodiodo a 180° .

Para fins de testes, foram utilizadas amostras de leite padronizadas, divididas em desnatado (0% de gordura) e creme de leite (37% de gordura) adicionadas de EDTA. Após a preparação da amostra de teste, esta é colocada dentro de um conta gotas, onde será feita a difração da luz. Segundo Lin *et al.* (1972), a quantidade apropriada de EDTA Tetrassódico para desnaturar a proteína é de 0,9 mmol /100 mL de leite, e o utilizado possui massa molar de 452,23 g/mol. Portanto obteve-se uma concentração final de 0,4 g de EDTA para cada 100 mL de leite.

Resultados preliminares

Foram realizados 3 testes com 12 amostras cada, que variavam entre 0,1 % e 6 % de gordura, com intervalos de 0,5 %. Esses teores foram obtidos através da mistura de amostras padronizadas com 0 % e 37 % de gordura. A Figura 4 apresenta a média das curvas características com os valores a partir de 2,5 %.

Figura 4 – Curva característica



Fonte: Autor (2025)

A curva gerada sugere uma relação linear entre o STR e a gordura do leite, nos pontos estudados. A curva é sensível abaixo de 1 % e precisaria melhorar a sensibilidade nessa faixa. Os desvios padrões de

cada amostra foram, respectivamente: 0,02; 0,05; 0,05; 0,04; 0,07; 0,04; 0,04; 0,04. O valor de R^2 foi de 0,94. Tendo em vista a continuidade do projeto, sugere-se fazer mais testes utilizando triplicata, com aumento na amplificação utilizada, e posterior teste com a programação no Arduino.

Referências

Anuário do Leite. Brasília: Embrapa, 2023. Anual. Uma Edição Com 120 Páginas e 35 Artigos, Com Indicadores do Atual Cenário da Pecuária de Leite do Brasil e do Exterior. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1154264/anuario-leite-2023-leite-baixo-carbono>. Acesso em: 04 abr. 2025.

Ben Miller. Keysight. **Optical Power Meters: Understand Their Uses and Internals.** 2023. Disponível em: <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/educ/2023/optical-power-meters>. Acesso em: 03 jun. 2025.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ (São Paulo). Secretaria de Estado da Saúde. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos.** 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p. Disponível em: <https://www.ial.sp.gov.br/ial/publicacoes/livros/metodos-fisico-quimicos-para-analise-de-alimentos>. Acesso em: 18 ago. 2025.

Lin, S. H. C. *et al.* Effect of Calcium Ion on the Structure of Native Bovine Casein Micelles. **Biochemistry**, S.L., v. 11, n. 10, p. 1818-1821, 9 maio 1972.

MOUSER ELETRONICS. **OSRAM BPX 65 Datasheet.** Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/588/prd_pim_datasheet_2220086_EN_pdf-3418864.pdf. Acesso em: 18 ago. 2025.

Peatross, Justin; Ware, Michael. Plane Waves and Refractive Index: radiometry, photometry, and color. In: PEATROSS, Justin *et al.* **Physics of Light and Optics.** 2. ed. S. L.: Brigham Young University, 2025. p. 66. Disponível em: <https://optics.byu.edu/docs/opticsBook.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2025.

Siqueira, Kennya Beatriz. O Mercado Consumidor de Leite e Derivados. 120. ed. Juiz de Fora: Embrapa, 2019. 17 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1110792/1/CT120MercadoConsumidorKennya.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2025.

Xin, Qi *et al.* The rapid determination of fat and protein content in fresh raw milk using the laser light scattering technology. **Optics And Lasers In Engineering**, [S.L.], v. 44, n. 8, p. 858-869, ago. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.02.007>.

Tetra Pak. (2023). **Dairy processing handbook.** Tetra Pak Processing Systems. Disponível em: <https://dairyprocessinghandbook.tetrapak.com/>. Acesso em: 23 ago. 2025.