

# Protótipo de sistema de pasteurização de leite de búfala com controle e monitoramento via rede Wi-Fi

André R. S. Biazotto, Diego K. N. Silva, Kamylyle V. A. Carneiro, Leslye E. C. Eras e Maria E. A. Massa

**Resumo**— Este artigo descreve a idealização de um sistema de controle e monitoramento via Wi-Fi da pasteurização de leite de búfala voltado aos pequenos produtores da região amazônica, proporcionando-lhes uma solução acessível. O sistema será usado especificamente para a esterilização e estabilização do leite até que ele fique apropriado para o consumo e tenha uma maior durabilidade e qualidade. No trabalho, foram realizadas diversas medições e estudos para embasar o uso da rede Wi-Fi e a internet das coisas.

**Palavras-Chave**— IoT, bubalinocultura leiteira, pasteurização, MQTT.

**Abstract**— This article describes the design of a Wi-Fi control and monitoring system for pasteurizing buffalo milk, aimed at small producers in the Amazon region, providing them with an affordable solution. The system will be used specifically to sterilize and stabilize the milk until it is suitable for consumption and has greater durability and quality. In the work, various measurements and studies were carried out to support the use of Wi-Fi and the Internet of Things.

**Keywords**— IoT, dairy buffalo farming, pasteurization, MQTT.

## I. INTRODUÇÃO

Na região da Amazônia, é comum a criação de bubalinos tanto como animais de corte quanto para extração de leite. Famílias de pequenos produtores locais usam esse leite de búfala para fabricação de queijo e outros derivados como meio de sustentação. Em 2022, o IBGE fez um levantamento sobre os rebanhos e produção de leite no Brasil, conforme os dados, a região norte do país tem 68,11% da produção de rebanhos bubalinos [1]. Dos 34.6 bilhões de litros de leite produzido nacionalmente, 12% foram providos de búfalas desses rebanhos e resultaram em aproximadamente 9.6 milhões de reais de receita. [2]

O avanço da indústria 4.0 na pecuária tem auxiliado produtores a terem um melhor controle de qualidade em seus empreendimentos. Diversos projetos de internet das coisas (IoT – *Internet of Things*) são implementados diante disso. Esses projetos visam auxiliar em atividades diárias que exigem esforço físico e disponibilidade do produtor, como por exemplo, verificação da saúde de animais, nível de produção, acompanhamento de rebanho, entre outras [3]. Como uma maneira de remodelar o desempenho das produções, o uso de conexões remotas tem sido optado principalmente para monitoramento e controle precisos a longas distâncias dos

equipamentos. Em um projeto IoT, essa conexão pode ser facilmente implementada através de redes Wi-Fi, graças ao aumento considerável de acessos a internet pelas famílias de zonas rurais no Brasil, como afirma a pesquisa realizada pelo CETIC (Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação), onde esses acessos passaram de 51% em 2019 para 71% em 2021 [4].

A fim de colaborar com a economia da Amazônia neste mercado da bubalinocultura leiteira, este trabalho tem como objetivo demonstrar um protótipo de baixo custo de um sistema de controle e monitoramento de um pasteurizador próprio para o leite de búfala. Este possui suas peculiaridades em relação ao leite bovino, logo sendo necessária uma diferente maneira de tratar o alimento. A pasteurização na indústria alimentícia tem uma grande importância ao garantir que o alimento ou bebida seja tratado adequadamente antes de ser oferecido para o consumo. Ela trata-se de ferver a substância até uma temperatura abaixo do seu ponto de ebulição e prontamente submetê-la ao resfriamento a fim de erradicar os micróbios nocivos presentes [5]. Implementar esta técnica no cenário da pecuária familiar pode ser benéfica para escalar a produção, prolongar a durabilidade e aumentar a qualidade do leite. Com o sistema que será apresentado, o pequeno produtor pode monitorar a sua produção por completo, garantindo a produtividade diária, sem precisar estar próximo aos maquinários, eliminando as chances de contaminação e desperdícios desnecessários do alimento se fossem realizadas medições manuais.

No protótipo em construção foram utilizados sensores de nível de líquido e temperatura cruciais para analisar se o leite está no ponto correto para as próximas etapas de produção [6]. Além de motores para o fluxo do leite pelo equipamento, foram utilizados um refrigerador e um aquecedor, essenciais no processo de pasteurização. Todos esses controlados pelo ESP-WROOM-32. Para a comunicação remota foi optado a rede Wi-Fi pelo seu alcance superior em relação ao Bluetooth, além de roteadores usados neste tipo de rede serem dispositivos de fácil acesso com o fluxo de dados maior devido sua largura de banda [7].

Neste artigo, serão apresentados os resultados obtidos em um estudo com dados adquiridos em uma campanha de medições com o equipamento utilizado no protótipo em desenvolvimento para avaliar os recursos utilizados no sistema, onde são analisados indicadores de qualidade do sinal que serão apresentados a seguir.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. RSSI - Receive Signal Strength Indicator

O RSSI (Receive Signal Strength Indicator) mede a força de um sinal recebido por um ponto de acesso. Sua medida é dada em uma escala negativa em decibéis (dBm), de modo que, quanto maior o módulo da medição, mais fraco é o sinal. Esse indicador é importante, pois ao sofrer atenuação de meio, potência do transmissor, barreiras e outros obstáculos; mostra a capacidade dos pontos de acesso e fornece dados para criar uma rede de qualidade [8].

Nesse trabalho, o RSSI foi usado como parâmetro para para força de sinal recebido.

### B. Modelos de propagação

Os modelos de propagação são técnicas de previsão e otimização de sistemas de comunicação sem fio. Existem diversos modelos desenvolvidos com diversos fins. Para esse estudo, o modelo adotado para validação dos dados é da União Internacional de Telecomunicações (ITU) presente na recomendação ITU-R P.1546-6. Para conferir mais exatidão, será usado o modelo de atenuação em vegetação presente na recomendação ITU-R P.833-10.

Recomendação ITU-R P.1546-6 [12]: Essa recomendação apresenta um modelo empírico de medição ponto a área, utilizando espaços abertos em terra e mar. O anexo 16 conta com um modelo para propagação a menos de 1 Km, sendo utilizado por esse presente trabalho.

Recomendação ITU-R P.833-10 [11]: Essa recomendação apresenta uma série de modelos para cálculo da atenuação quando o receptor está dentro de uma floresta. A fórmula base do modelo é:

$$A_{ev} = A_m [1 - \exp(-d\gamma/A_m)] \quad (1)$$

Onde:

- $A_m$ : atenuação máxima para um terminal dentro de um tipo específico e profundidade de vegetação (dB);
- $\gamma$ : atenuação específica para caminhos vegetativos muito curtos (dB/m);
- $d$ : comprimento do caminho dentro da floresta (m).

O valor de  $A_m$  pode ser calculado através da relação:

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (2)$$

Esses valores são empíricos e, no Brasil, foram medidos no Rio de Janeiro tendo os valores de  $A_1 = 0.18dB$  e  $\alpha = 0.752$ .

### C. Perda em espaço livre

A perda em espaço livre é o modelo de propagação que considera a atenuação de uma onda eletromagnética emitida por uma fonte pontual no vácuo, sem interferências, tendo a distância como uma das principais variáveis. Embora idealizada, é uma boa aproximação para a perda observada enlaces de comunicação de alta frequência em linha de visada, sem reflexões no solo. É uma das principais formas de análise usada junto do RSSI [9].

$$L = 106.9 - 20 \log(d) \quad (3)$$

Onde:

- $L$ : Largura de Banda (dB);
- $f$ : Frequência (MHz);
- $d$ : Distância (Km).

## III. PROTÓTIPO

Foi planejado um protótipo de um pasteurizador com sistema de controle e monitoramento Wi-Fi com configurações próprias para o leite de búfala. Nas subseções seguintes serão descritas as características do aparelho e seu funcionamento.

### A. Materiais e sensores

Como mostra a figura 1, para a construção do protótipo é necessário o uso de dois copos de aço inoxidável, um para o processo de aquecimento e outro para a refrigeração. O copo aquecedor conta com a presença de um sensor de nível de líquidos infravermelho para verificar se a quantidade ideal de leite foi atingida para o início da pasteurização e dois sensores DS18B20 submersíveis responsáveis pela avaliação da temperatura, um posicionado na parte superior e outro na parte inferior do copo para verificar a uniformidade do calor.

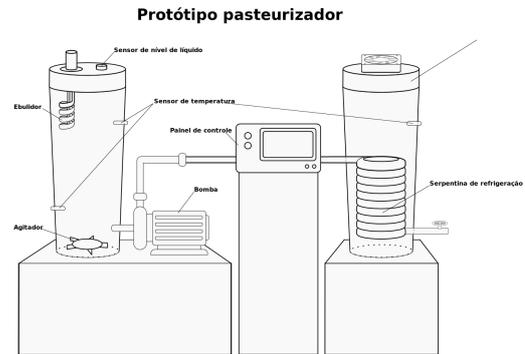


Fig. 1. Proposta de arquitetura do pasteurizador

Para aquecer o leite foi utilizado um ebulidor localizado na tampa do copo ligado a um relé que fará sua ativação e desativação conforme necessário. Na parte inferior do copo foi implementado um agitador motorizado que irá misturar o leite e garantir a homogeneidade do aquecimento.

O sistema também conta com uma bomba que ao final do aquecimento levará o leite para concluir a pasteurização na etapa de resfriamento. O segundo copo tem a função de resfriar bruscamente o leite que passará por dentro uma serpentina de alumínio própria para refrigeração de bebidas artesanais que está submersa em água gelada presente no copo. Para o resfriamento desta água foi instalada na tampa figura 2 uma pastilha termoelétrica e um par de coolers que garantirão a refrigeração adequada. Neste copo também é encontrado um sensor DS18B20 para fiscalizar a temperatura da água.

No painel de controle está localizado o microcontrolador ESP-WROOM-32 que fará todo o controle dos sensores, ebulidor, motor, bomba e buzzer para alertas sonoros. As

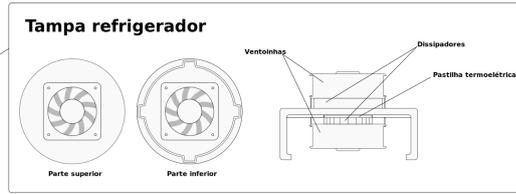


Fig. 2. Modelo da tampa do recipiente de refrigeração

informações coletadas destes componentes serão enviadas para uma Raspberry Pi 3 que ficará encarregada de armazenar e organizar essas informações em uma página hospedada localmente com um *dashboard* interativo (Figura 3) para que o usuário possa acessar a página de maneira remota com seus dispositivos conectados a rede compartilhada entre os aparelhos. Estas conexões serão descritas com mais detalhes na subseção C.



Fig. 3. Proposta de interface

### B. Ciclo de operação

Para o início do processo de pasteurização é necessário preencher o copo do aquecedor com o leite de búfala in natura até o marcador visual de quantidade adequada (8 litros). Com a tampa fechada o sensor de nível de líquido faz a verificação e se essa quantidade necessária não for suficiente, o sistema irá alertar o usuário pelo painel de controle e com um aviso sonoro, impedindo a continuação do processo. Com a quantidade apropriada atingida e a tampa fechada, o ebulidor e motor do agitador são ativados.

O relé do ebulidor é controlado pelo ESP32 de acordo com as temperaturas registradas pelo DS18B20, o leite de búfala deve permanecer entre 72 °C e 74 °C durante 30 minutos para que os micróbios nocivos sejam erradicados. Após esta etapa, a bomba é ativada enviando o leite para a etapa da refrigeração. A água presente no segundo copo deve estar entre 1 °C e 5 °C

[6] para que o leite seja resfriado bruscamente ao passar pela serpentina de alumínio. Ao final deste processo, o usuário deve colocar um recipiente apropriado para que o leite pasteurizado seja despejado, e assim ser levado para o empacotamento e armazenamento em refrigeradores próprios.

### C. Arquitetura do software e conexões

O MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de comunicação M2M (*Machine to Machine*) que utiliza o paradigma *publish/subscribe*. Essa estrutura faz dele uma escolha ideal para a comunicação entre hardwares simples, especialmente em conexões menos confiáveis. Destaca-se no uso em IoT por essas características, além de ser eficiente em dispositivos com baixo consumo energético. O modelo adotado pelo MQTT possui dois tipos de dispositivos: o *broker* e os clientes. O *broker* recebe e direciona os dados para os clientes, que se dividem em dois tipos: assinantes e publicadores. Os publicadores enviam mensagens com um tópico específico, e os assinantes desse tópico podem acessá-las [10].

No projeto, o protocolo MQTT é utilizado para estabelecer conexões dentro de uma rede privada entre o ESP32 e os dispositivos dos usuários conectados a ela, que serão os clientes. O ESP32 atua como um publicador-assinante, publicando dados dos sensores, motores e aquecedores/resfriadores a ele conectados e assinando os dados dos usuários. O Raspberry Pi atua como o *broker* no MQTT e *host* do *dashboard* interativo que pode ser acessado por qualquer dispositivo do usuário que esteja conectado a mesma rede e entre no endereço de IP relacionado a essa página. Os dispositivos dos usuários que fizerem esse acesso, podem interagir ativamente com essa página, realizando comandos e visualizando dados. A esquematização da rede pode ser melhor vista na figura 4

Além do acesso remoto realizado pelo usuário em seus dispositivos móveis, é possível acessar o *dashboard* no *host* local da Raspberry por meio de um *display touch* localizado no painel de controle do equipamento, como já havia sido observado na figura 1.

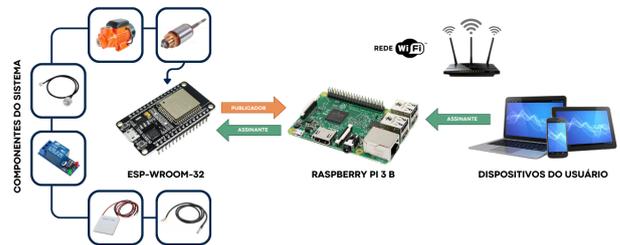


Fig. 4. Esquema da rede

## IV. PROTÓTIPO

Nesta seção serão descritos os materiais e métodos para realizar as verificações de RSSI, com o intuito de avaliar a qualidade do sinal da antena Wi-Fi do microcontrolador ESP-WROOM-32. A campanha de medições foi realizada em ambientes reais que o equipamento poderia ser utilizado. Foram escolhidos dois cenários, sendo um prédio com maquinários,

visto que em fazendas podem haver outros tipos de aparelhos para produções paralelas e uma área com vegetação densa para representar espaços florestais que são comuns nessas regiões.

Para os testes foi criada uma rede com um roteador TP-LINK AC1200 do modelo C5 na qual o ESP32 foi conectado. Tanto o roteador quanto o microcontrolador possuem a frequência da banda de 2.4 GHz. Foi utilizado um código simples com as bibliotecas Wi-Fi e Wi-Fi Manager, usando a função WiFi.RSSI para coletar os dados do indicador de força do sinal da rede. E para analisar a perda de pacotes foi utilizado a função Ping.ping da biblioteca ESP32Ping.

Primeiramente foi realizada uma calibração a fim de verificar a confiabilidade dos equipamentos e evitar o uso de aparelhos danificados nos testes. Os equipamentos foram posicionados frente a frente, ambos a 70 cm de altura do chão, como mostra a Fig. 5. O ideal seria que as medições fossem feitas em uma câmara de vácuo, porém como não foi possível ter acesso a este recurso, os materiais de estudo foram posicionados em um espaço sem obstáculos para que o sinal pudesse propagar sem interferências em sua trajetória.

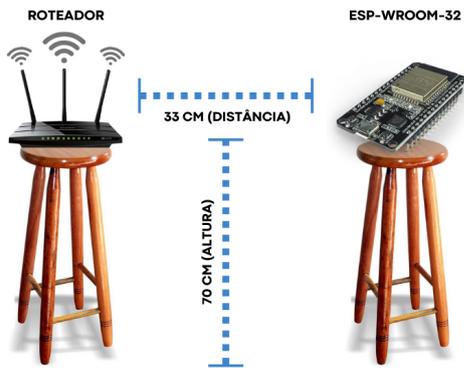


Fig. 5. Esquema de calibração

O roteador ficou fixo em sua posição e o ESP32 foi colocado a 33 centímetros de distância e obteve um RSSI médio de -12 dBm. O valor obtido nos cálculos de perda em espaço livre com as medições da calibração foi 34,15 dB, sendo muito aproximado ao valor teórico 30,67 dB, com isso chegamos à conclusão que os equipamentos utilizados são confiáveis e as medições obtiveram valores verídicos.

## V. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos e observações sobre os testes da metodologia abordada, realizados em dois cenários diferentes.

### A. Ambiente com vegetação

Esse cenário representa uma floresta sem vegetação rasteira e com árvores de porte médio e grande, visto na figura 6. A escolha deste ambiente se deve que muitas fazendas possuem essas características, uma vez que facilita a locomoção. Nesse cenário a amostragem foi de um metro para garantir a qualidade dos dados em um ambiente atenuante.

Os dados obtidos, mostrados na figura 7 são parecidos com o modelo da recomendação ITU-R P.1546-6 junto da



Fig. 6. Floresta utilizada para medição com atenuação de vegetação

recomendação ITU-R P.833-10. Isso demonstra sua validade como dados reais. A diferença entre o valor teórico e o real é multifatorial, mas os principais são: presença de outra rede Wi-Fi próximo ao local de medida e a queda de folhas secas das árvores. O modelo de atenuação considera uma vegetação encontrada no Rio de Janeiro, que possui um bioma distinto do encontrado no Marajó e em todo o Pará, sendo outra razão para os dados diferentes.

O erro quadrático médio (ERM) da relação entre o modelo atenuado do ITU é de 14.9679. O erro alto se dá devido aos parâmetros que não são alinhados com a realidade observada. O ERM entre o espaço livre e os valores medidos é de 29.905.

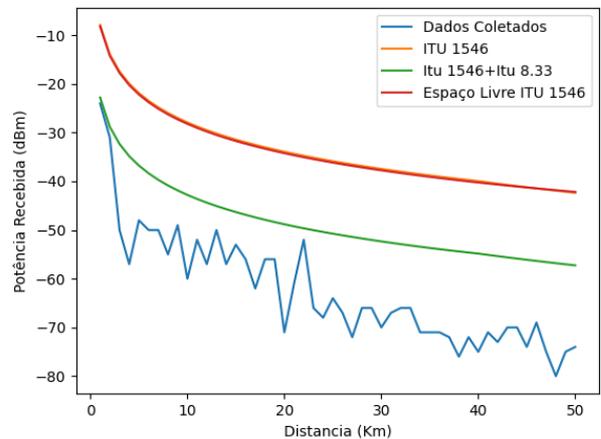


Fig. 7. Gráfico com o RSSI obtido a cada 1 metro em uma floresta

### B. Área com vegetação densa

Este cenário representa um ambiente com uma vegetação densa, comum nas fazendas. Foram feitas medições em três pontos específicos observados na figura 8. O roteador foi posicionado do lado de fora de uma casa dentro da área arborizada. Conforme os equipamentos eram afastados, notou-se o decaimento no sinal, devido aos obstáculos como árvores e casas próximas que afetaram a qualidade da comunicação, como pode ser visto na tabela 2.

### C. Testes com a construção parcial do protótipo

Os testes do sistema parcial de monitoramento foram realizados em parceria com um projeto da Faculdade de Engenharia

TABELA I  
MEDIÇÕES NA ÁREA DE VEGETAÇÃO.

Distância (m)	RSSI (dBm)	Pacotes perdidos (%)
40	-71	0.00
60	-76	53.33
75	-82	80.00

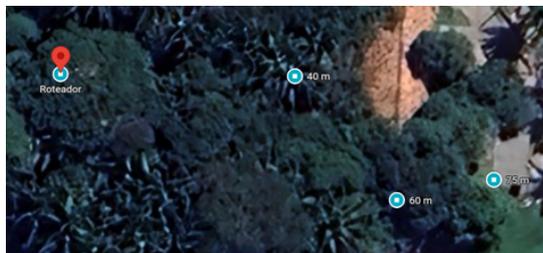


Fig. 8. Cenário de vegetação densa

Química da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, com a estrutura de aquecimento muito similar ao protótipo proposto na seção III deste artigo como pode ser visto na figura 9 a esquerda. Até o presente momento, foi adicionado na água um sensor de temperatura controlado pelo ESP32. Através do protocolo MQTT, os dados de temperatura registrados no teste foram publicados pelo ESP32 e a página hospedada na Raspberry Pi, como uma assinante desse tópico, pode recebê-los e, consequentemente, o usuário em um dispositivo móvel conectado a mesma rede Wi-Fi conseguiu acessar o endereço da página com êxito para a visualização dos dados obtidos, como podem ser observados na figura 9 a direita.

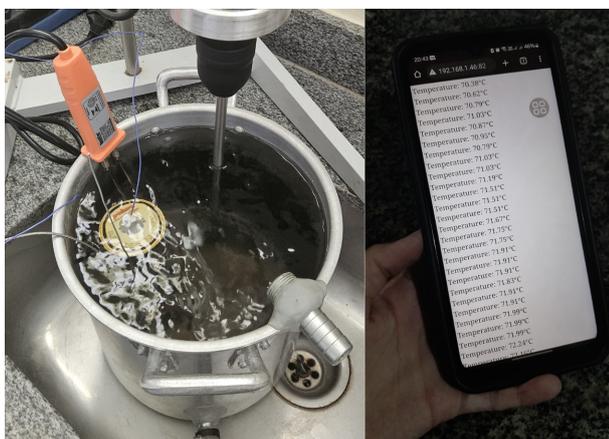


Fig. 9. Sistema de aquecimento usado para testes e registro de exibição de dados em smartphone via rede

## VI. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Com este estudo é possível verificar a viabilidade da construção deste sistema de pasteurização de leite de búfala controlado e monitorado via Wi-Fi. Visto a importância desse nicho leiteiro para a região amazônica e no capital brasileiro, uma melhoria tecnológica suscita em avanços na economia e colaboração com a renda das famílias das regiões rurais, além de assegurar para os consumidores finais uma garantia

maior de que o leite passou pelo devido processo para evitar possíveis contaminações.

Para trabalhos futuros, o pasteurizador continuará sendo construído, com a implementação de mais funcionalidades para que o sistema possa abranger a pasteurização para cada um dos produtos lácteos que a fazem necessária. Embora o protótipo utilizado nos testes em seu funcionamento não estar atingindo todas as condições requeridas, ele será aperfeiçoado a cada dia para que exerça todas as funções fundamentais para a pasteurização e se torne um equipamento viável para o uso em produções reais.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Dr<sup>a</sup> Luciane Batistella pela prontidão em nos ajudar, tendo paciência em nos explicar o processo de pasteurização e como poderíamos realizá-lo; ao Dr. Jhony Teleken por colaborar como a esquematização do equipamento e disponibilização de um pasteurizador de operação manual para testes; ao Maurício Fraga por ceder leite de búfala e o espaço da fazenda para testes; ao Larvin Sá por nos ceder a Raspberry Pi 3 B; ao Diogo dos Reis pela doação dos copos de aço inoxidável e ao Kaian por nos dar suporte no campus.

## REFERÊNCIAS

- [1] IBGE, "Pesquisa produção da pecuária municipal", IBGE, 2022 [Online]. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=resultados>
- [2] O. J. A. Gerude Neto, L. S. Pontes, D. R. Pereira, e J. A. Costa, "Aspectos da cadeia produtiva de búfalos no Brasil Uma revisão", RECIMA21, vol. 4, n° 10, p. e4104188, 2023 [Online]. Disponível: <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i10.4188>.
- [3] J. A. S. Morosini, D. Giacobbo, e O. M. Souza. "Grex-Bov: Aplicativo open source para o controle do gado leiteiro e monitoramento remoto da temperatura dos resfriadores de leite", Anais do XIX Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas, Evento Híbrido, 2022, pp. 165-168, doi: <https://doi.org/10.5753/latinoware.2022.228066>.
- [4] CETIC, "Executive Summary - ICT Households 2021" CGI.br, 2022 [Online]. Disponível: [https://www.cgi.br/media/docs/publicacoes/2/20221121130127/executive\\_summary\\_ict\\_households\\_2021.pdf](https://www.cgi.br/media/docs/publicacoes/2/20221121130127/executive_summary_ict_households_2021.pdf)
- [5] C. S. Araújo et al., "Processamento térmico do leite: Termização, pasteurização e UHT", Ciência e Tecnologia dos Alimentos, v. 12, Ed. Poisson, 2021. <https://doi.org/10.36229/978-65-5866-118-4.cap.05>.
- [6] S. Hühn, et al., "Características, peculiaridades e tecnologia do leite de búfala". EMBRAPA-CPATU, 1991. [Online]. Disponível: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/387806>
- [7] R. A. Cabral. "Um Estudo sobre a eficiência energética em sistemas IoT com diversidades de duplicação de pacotes". UFC, 2019 [Online]. Disponível: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/497371/1/2019\\_tcc\\_rde-acabral.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/497371/1/2019_tcc_rde-acabral.pdf)
- [8] Y. Bellecieri, F. C. Jabour e E. G. Jabour. "Localização Indoor Baseada na Leitura Bidirecional do RSSI", IFMG-Ifsudestemg. Disponível: <http://periodicos.jf.ifsudestemg.edu.br/revistabsi/article/view/25>
- [9] R. A. C. Poeyes. "Efeitos de multipercursos atmosféricos em enlaces de microondas em visibilidade". PUC - Rio 2004 [Online]. Disponível: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5788/5788\\_1.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5788/5788_1.PDF)
- [10] F. C. Sousa, R. D. Soares e R. J. Campos. "IIoT utilizando protocolo MQTT", Repositório Universitário da nima [Online]. Disponível: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/18962>.
- [11] ITU, "Attenuation in vegetation", International Telecommunication Union, 2021 [Online]. Disponível: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-10-202109-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-10-202109-I!!PDF-E.pdf)
- [12] ITU, "Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz", International Telecommunication Union, 2019 [Online]. Disponível: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-6-201908-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-6-201908-I!!PDF-E.pdf)