

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA -  
CCET  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEE**

**ANELISE GOMES LÚCIO MARCELINO**

**OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE BATERIA EM  
HARDWARE DE INTERNET DAS COISAS INDUSTRIAL**

**São Carlos - SP  
2021**

ANELISE GOMES LÚCIO MARCELINO

OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE BATERIA EM  
HARDWARE DE INTERNET DAS COISAS INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de São Carlos, para obtenção  
do título de bacharel em Engenharia  
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Celso Ap.  
de França

São Carlos - SP  
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - CCET  
Programa de Graduação em Engenharia Elétrica

**Comissão avaliadora**

Membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso da candidata Anelise Gomes Lúcio Marcelino, realizado em 01/07/2021:

---

Orientador: Prof. Dr. Celso Aparecido de  
França  
Instituição: Universidade Federal de São  
Carlos

---

Prof. Dr. Robson Barcellos  
Instituição: Universidade Federal de São  
Carlos

---

Prof. Dr. Helder Vinícius Avanço Galeti  
Instituição: Universidade Federal de São  
Carlos

*Dedico aos meus pais, irmã e avós  
que investiram em mim todo tempo e amor do mundo.*

*"He who stops being better, stops being good."  
(Aquele que deixa de melhorar, deixa de ser bom)  
(Oliver Cromwell)*

# Resumo

A Engenharia Elétrica oferece uma ampla área de atuação, no que diz respeito não somente à resolução de problemas no âmbito de eletricidade, eletrônica, controle e automação, mas também relaciona-se com tudo aquilo que está sendo migrado para a "nuvem", com a tecnologia inovadora da digitalização. No Século XXI, a Internet das Coisas teve seu desempenho aprimorado e com isso, mais equipamentos de monitoramento vêm sendo utilizados em aplicações tanto para uso pessoal em residência como para ambiente industrial. A *startup* industrial TRACTIAN, fundada em 2019, desenvolve e comercializa dispositivos de sensoriamento remoto, que operam conectados à rede elétrica de energia ou à bateria, e oferece também a plataforma de *software* que processará e apresentará as informações coletadas. Este sensor coleta dados de vibração e temperatura de máquinas operando em ambientes industriais e encaminha-os para a plataforma digital da empresa, onde é aplicado o uso de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para identificar possíveis falhas nos maquinários, antes que estes sejam completamente acometidos e quebrados. O objetivo primordial deste trabalho é identificar uma possível diminuição no consumo de energia do dispositivo à bateria, e para tanto foram aplicadas duas otimizações principais: uma na quantidade de informação enviada do sensor para a rede de transmissão sem fio, resultado de uma alteração em seu processamento interno no *hardware*, e a outra no tempo de acesso à memória do microprocessador para obter os dados a serem enviados. Destas duas mudanças, foi possível identificar diminuições no tempo de duração de cada ciclo de operação do sensor e também na quantidade de corrente consumida por ciclo. Sendo assim, sua bateria terá mais tempo de duração e este produto apresentará um potencial maior de inserção e competitividade no mercado.

**Palavras-chave:**Internet das Coisas, Monitoramento, Bateria, Microprocessador.

# Abstract

Electrical Engineering offers a wide area of expertise, regarding not only to solving problems in the field of electricity, electronics, control and automation, but also relates to everything that is being currently migrated to the "cloud", with an innovative digitalization technology. In the 21st century, the Internet of Things has improved its performance and thus, the usage of monitoring equipment has improved in applications for both personal use and industrial solutions. The industrial startup TRACTIAN, created in 2019, develops and markets remote sensing devices, which operate connected to the power grid or battery, and also offers a software platform that shall process and present the information. This sensor collects vibration and temperature data from machines operating in industrial environments and forwards them to TRACTIAN's digital platform, where the use of artificial intelligence and machine learning techniques are applied to identify possible failures in machinery, before they are completely damaged or broken. The primary goal of this work is to identify a possibility of decrease in the device's battery consumption, and for that two main optimizations were applied: decrease in the amount of information sent from the sensor to a wireless network, as a result of a change in its internal processing still in the hardware, and another decrease in the access time to the microprocessor's memory to obtain the data to be sent. From these two changes, it was possible to identify decreases not only in the duration of each operation cycle of the sensor, but also in the amount of current consumed per cycle. Therefore, its battery will last longer and the product will have a greater potential in the market.

**Keywords:**Internet of Things, Monitoring, Battery, Microprocessor.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Sensor SMART TRAC . . . . .	21
Figura 2 – Análise de Assinatura Espectral da Máquina . . . . .	22
Figura 3 – Diagrama de coleta de dados até interpretação de falhas . . . . .	23
Figura 4 – Sensor SMART TRAC em Operação . . . . .	28
Figura 5 – Consumo de carga durante envio de dados - SMART TRAC . . . . .	30
Figura 6 – Sinal Gerado com 6144 Pontos de Amostra . . . . .	32
Figura 7 – Sinal Gerado com 300 Pontos de Amostra . . . . .	33
Figura 8 – Consumo de carga durante processamento - SMART TRAC . . . . .	34

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Características Construtivas e Técnicas - SMART TRAC . . . . .	25
Tabela 2 – Consumo de Corrente do Modem SIM800L GSM/GPRS . . . . .	29
Tabela 3 – Configurações do Sensor SMART TRAC . . . . .	36
Tabela 4 – Resultados Obtidos com Alterações no SMART TRAC . . . . .	37
Tabela 5 – Tempo e Demanda por Ciclo de Operação no SMART TRAC . . . . .	37

# Lista de abreviaturas e siglas

FFT - Fast Fourier Transformer ("Transformada Rápida de Fourier", em tradução direta);

GPRS - General Packet Radio Service ("Serviço de Rádio de Pacote Geral", em tradução direta);

IIoT - Industrial Internet of Things ("Internet Industrial das Coisas", em tradução direta);

IoT - Internet of Things ("Internet das Coisas", em tradução direta);

LoRa WAN - Low Power Wide Area Network ("Rede de Baixa Potência e Longa Distância", em tradução direta);

LPWAN - Low Power Wide Area Network ("Rede de Baixa Potência e Área Ampla", em tradução direta);

LTE - Long-Term Evolution ("Evolução a Longo Prazo", em tradução direta);

NB-IoT - Narrow Band - Internet of Things (Faixa Estreita - Internet das Coisas)

SPIFFS - SPI Flash File System

Wi-Fi - Wireless Fidelity ("Fidelidade sem Fio", em tradução direta);

WSN - Wireless Sensor Network ("Rede sem fio de sensores", em tradução direta);

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo</b>	<b>13</b>
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b>	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b><i>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA</i></b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Internet das Coisas (IoT)</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Baterias</b>	<b>19</b>
2.2.1	Bateria Primária	19
2.2.2	Bateria Secundária	20
<b>2.3</b>	<b>Sensor SMART TRAC</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Bateria</b>	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Conectividade</b>	<b>28</b>
<b>3.4</b>	<b>Tratamento de Dados</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusão</b>	<b>39</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>41</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

A ocorrência de falhas em equipamentos industriais é uma preocupação relevante para uma organização visto que os gastos com o reparo do equipamento se somam aos gastos de paralisação da fábrica, acarretando ainda em atrasos significativos na produção que influem diretamente em todo o fluxo de trabalho proposto pela Companhia.

Em 2019, a TRACTIAN foi fundada com um objetivo certo: oferecer às equipes de manutenção industrial o monitoramento online de equipamentos, junto a uma plataforma eficiente para interpretação dos dados coletados. Os fundadores, que se conheceram em São Carlos enquanto cursavam engenharia de computação, compartilhavam não apenas da vontade de empreender, mas também a vontade de melhorar a rotina de um gestor de manutenção, uma vez que seus respectivos pais trabalharam a vida toda enfrentando as consequências de quebras inesperadas ou problemas em máquinas de indústrias (INGIZZA, 2021).

Foi desenvolvido então pela *startup* um dispositivo de tecnologia própria chamado BAND TRAC, que consiste em um sensor inteligente com sistema IoT que consegue medir com precisão a temperatura e vibração dos ativos industriais aos quais forem conectados (STACHEWSKI, 2021). Este dispositivo possui alimentação cabeada e é diretamente conectado à rede elétrica, contudo seu sucessor logo surgiu, o SMART TRAC, que é por sua vez alimentado à bateria e está em fase de desenvolvimento para ser otimizado quando implementado.

Uma vez realizada a coleta de dados da máquina, todas as informações são enviadas em tempo real para a plataforma computacional desenvolvida pela TRACTIAN, onde as informações são interpretadas por meio de inteligência artificial para serem exibidas online. Estas etapas de coleta e transmissão, além de serem instantâneas, são realizadas através de rede 2G/3G própria do sensor BAND TRAC, sendo portanto independente de qualquer WiFi industrial ou infraestrutura própria do cliente.

A partir destas medições e análises, é possível acompanhar na plataforma o estado do maquinário e, em casos de falhas ou possível risco de quebra, o software se encarrega de disparar alarmes e enviar mensagens de alerta via Whatsapp ou Email para a equipe de manutenção, para que ações possam ser tomadas promovendo um reparo com planejamento e antecedência.

O sensor pode ser conectado em mais de 100 tipos de máquinas, como motores de baixa, média e alta tensão, ventiladores, turbinas, compressores e até ativos móveis. Além

do acompanhamento do *Status* do equipamento em tempo real, a solução apresentada ainda provê horímetro e o consumo de energia estimado do ativo. Assim, a gestão de manutenção e estoque, ordens de serviços e laudos técnicos podem ser providenciados de forma automatizada (TRACTIAN, 2021).

O modelo de negócios da *startup* é baseado no aluguel mensal da solução composta pelos sensores e acesso ilimitado à plataforma, com cobrança feita por ponto monitorado e foco em pequenas e médias indústrias (STACHEWSKI, 2021). Com apenas dois anos de empresa, já são mais de 500 máquinas monitoradas e 40 parques industriais que contratam seu serviço.

Segundo a TRACTIAN, com base nos pontos de monitoramento já existentes pode-se observar assertividade em 90% dos *insights* fornecidos pela plataforma, o que promoveu a redução em 30% das ocorrências de falhas de última hora na manutenção juntamente com um aumento de 45% de confiabilidade das máquinas que utilizam seu sistema de predição.

Dos clientes atuais, 90% optaram pela solução com o sensor ligado diretamente em uma fonte de energia cabeada, em oposição à versão à bateria. Contudo, recentemente essa porcentagem vem enfrentando alterações conforme a demanda por sensores à bateria aumenta. Sendo assim, a TRACTIAN pretende expandir as vendas dos sensores à bateria e uma melhora no consumo de energia do dispositivo seria crucial para satisfação do usuário.

## 1.2 Objetivo

### 1.2.1 Objetivo Geral

Identificar possíveis pontos de otimização no consumo de bateria do sensor inteligente da empresa TRACTIAN, tendo em consideração o objetivo final da Empresa que é de comercialização dos serviços.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisa sobre características de baterias disponíveis no mercado aplicáveis para a solução do sensor SMART TRAC, com a seleção daquela que aprimorou o quesito de segurança;
- Identificação de possíveis pontos de otimização da duração da bateria do sensor SMART TRAC;

- Realização de testes de consumo da bateria no sensor;
- Análise dos resultados obtidos com os testes;
- Intervenções propostas para melhoria no consumo da bateria do SMART TRAC;
- Publicação dos resultados finais.

### 1.3 Justificativa

O interesse nos temas de IoT e otimização nos processos de manutenção surgiu especialmente durante o período de trabalho como estagiária superior na empresa Siemens Energy, atuando na área de criação de soluções de digitalização e automação de processos para indústrias do setor de papel e celulose.

Nesse cenário, assim como nos demais setores industriais no Brasil, há ainda uma lacuna a ser preenchida quando se trata de melhorar os processos operacionais, juntamente com a qualidade de vida do funcionário, utilizando as novas tecnologias de inteligência artificial conhecidas e aplicadas em outras áreas.

É importante ter a urgência de trazer uma inovação capaz de romper a rotina de atualizações manuais de planilhas, com processos intermináveis para manter em dia as informações referentes à manutenção, além de evitar falhas inesperadas em equipamentos críticos para o funcionamento de uma fábrica de qualquer setor industrial.

O dispositivo que opera à bateria ainda traz vantagens significativas em oposição a aquele que tem a limitação física de estar conectado à rede de energia. Com a liberdade de ser conectado a um ativo industrial que opera em qualquer ponto remoto da planta fabril, ou até em motores de equipamentos em movimento, o sensor à bateria pode vir a ser uma revolução nas vendas da empresa, caso supere a adversidade de tempo de duração em operação.

### 1.4 Organização

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. Este primeiro capítulo contextualiza o assunto tratado com uma introdução ao mesmo, seguido de um esclarecimento sobre o objetivo da pesquisa, com aquilo que se espera obter como resultado final da investigação. Seguidamente, encontram-se a justificativa para a escolha do tema e os materiais e métodos utilizados ao longo de seu desenvolvimento, respectivamente.

Em sua continuação, o trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2: A fundamentação teórica sobre o assunto obtida através da revisão bibliográfica, abordando conceitos relacionados aos sistemas IoT, caracterização de baterias e o funcionamento do sensor SMART TRAC.

Capítulo 3: Desenvolvimento e a implementação do trabalho.

Capítulo 4: Apresentação e discussão dos resultados obtidos.

Capítulo 5: Fechamento do tema com a conclusão final extraída após a investigação e proposta de estudos para trabalhos futuros no tema.

## 2 *Fundamentação Teórica e Revisão de Literatura*

### 2.1 Internet das Coisas (IoT)

Em 1999, o termo *Internet of Things* (na tradução direta ao português, Internet das Coisas), foi utilizado pela primeira vez por Kevin Ashton para descrever a capacidade de interação entre dispositivos físicos com a utilização de sensores, o que teria como finalidade a concepção de coleta de dados, comunicação e sensoriamento (ASHTON, 2010). A IoT é então reconhecida como uma das áreas mais importantes da tecnologia, sendo um elemento chave na quarta revolução industrial atualmente em andamento, e tem ganhado profunda atenção de uma vasta variedade de indústrias.

Uma tecnologia de IoT amplamente utilizada é a rede sem fio de sensores (WSN), que consiste em equipamentos conectados a sensores autônomos que monitoram condições físicas como localização, temperatura e vibração. Aplicado no cenário industrial, com relação à automação e controle de processo, as métricas primordiais para determinar uma tecnologia de comunicação de rede são: custo, período de latência e confiabilidade (MONTORI et al., 2018). Atendendo satisfatoriamente aos requisitos, a WNS permite diferentes benefícios para a indústria que optar por esta tecnologia, como sistemas de monitoramento para previsão de falhas e manutenção preventiva ((LEE, 2015) *citação*).

Muitas aplicações IoT utilizam de tecnologias de rede celular para transferência de dados (do inglês, *cellular network*), como a rede 2G (GSM), 2.5G (tecnologia GPRS), 3G ou 4G (LTE, LTE-A, por exemplo).

A rede GPRS é uma tecnologia amplamente utilizada para comunicação *M2M* ("entre máquinas") no Brasil, sua sigla significa *General Packet Radio Service* (ou Serviços Gerais de Pacotes por Rádio, em português), e trata-se de uma evolução da tecnologia GSM. A rede 2,5G usa a mesma estrutura de comunicação do sistema 2G e para aplicações que transmitem apenas códigos binários é uma forte aliada, levando em conta a grande cobertura de área nacional (3GPP, 2021a).

A LTE (*Long-Term Evolution*, ou na tradução direta, Evolução a Longo Prazo) oferece suporte a serviços em tempo real sensíveis a atrasos, bem como a serviços de comunicação de dados que exigem altas taxas de pico de transmissão de dados. Os principais requisitos para o surgimento dessa rede de acesso foram alta eficiência espectral (mais dispositivos conectados sem prejudicar a rede), altas taxas de pico de dados, tempo curto de latência, bem como flexibilidade na frequência e largura de banda. (3GPP, 2021b)

Uma ampla cobertura de área é fornecida por tecnologias celulares de redes, razão de uma grande adoção de tecnologias de segunda geração (2G) e terceira geração (3G) para comunicação entre dispositivos. Entretanto, as tecnologias celulares tradicionais geralmente não alcançam eficiência energética suficiente para oferecer muitos anos de vida útil à bateria do dispositivo, e seu custo e complexidade são altos devido à sua capacidade de lidar com formas de onda complexas, otimização para voz, texto e serviços de dados de alta velocidade. Para comunicação entre dispositivos com baixo consumo de energia, há uma necessidade de eliminar complexidade para reduzir custos. (RAZA; KULKARNI, 2017)

Existem aplicações práticas de projetos de tecnologia IoT que requerem redes dedicadas de grande cobertura de área, baixa largura de banda e uma solução com o uso de dispositivos de baixo custo e alta durabilidade de bateria. Uma tecnologia que atende à demanda é a LPWAN (*Low Power Wide Area Network* ou, na tradução direta ao português, Rede de Baixa Potência e Área Ampla), que oferece vida útil de vários anos para a bateria do dispositivo e é projetada para sensores e aplicações que precisam enviar pequenas quantidades de dados por longas distâncias, apenas algumas vezes por hora. Alguns exemplos de rede de comunicação LPWAN são NB-IoT e LoRa WAN. (COLAKOVI, 2018)

A especificação LoRaWAN é um protocolo de rede LPWAN projetado para conectar dispositivos operados por bateria sem fio à internet em redes regionais, nacionais ou até mesmo globais. A tecnologia opera visando os requisitos de Internet das Coisas, como comunicação bi-direcional, segurança ponta a ponta e serviços de mobilidade e localização. (LORA-ALLIANCE, )

Enquanto LoRaWAN define o protocolo de comunicação e arquitetura do sistema para a rede, a camada física LoRa permite o link de comunicação de longo alcance através de uma torre dedicada de comunicação instalada. Atualmente, não existem empresas que disponibilizem de forma pública a rede LoRa, portanto, a opção por esta tecnologia em um projeto a ser implementado implicará inevitavelmente também na gestão da estrutura da rede, além da responsabilidade de garantir disponibilidade e cobertura necessárias para o projeto em questão. (GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017).

NB-IoT é uma tecnologia que oferece dispositivos de baixo custo, alta cobertura de sinal (especialmente com relação às redes GPRS e LTE), longa vida útil da bateria do dispositivo embarcado com a rede, que pode chegar à dez anos, e grande capacidade com relação à quantidade de dispositivos conectados à rede. No entanto, o período de latência dessa rede não é rigoroso, ou seja, o tempo que leva para um pacote de dados percorrer a rede de um ponto designado para outro (MANGALVEDHE; RATASUK, 2016).

Geralmente a NB-IoT é utilizada para aplicações que se encontram em ambientes fechados de difícil acesso ou em zona rural, ou seja, espaços em que o recebimento de sinal

via GPRS, 3G/4G e WiFi pode não ocorrer de forma satisfatória. Uma vez que a rede foi projetada com base em funcionalidades existentes da LTE, é possível utilizar o mesmo hardware e compartilhar do mesmo espectro sem qualquer problema de coexistência. Isso possibilita o desenvolvimento rápido e de baixo custo da rede NB-IoT utilizando dos mesmos recursos e infraestrutura pré-existentes da LTE.

No Brasil, a NB-IoT tem sido notada pelo ambiente empresarial pois pode contar com os maiores fabricantes de equipamento, processadores e módulos dos hardwares de rede de comunicação, além da infraestrutura já instalada e distribuída em território nacional para transporte dos dados. Este aproveitamento de sistema existente traz benefícios importantes com relação à segurança e privacidade, como confidencialidade e integridade dos dados transmitidos.

A comunicação de rede em Wi-Fi é um padrão amplamente adotado e atende muito bem às aplicações relacionadas à comunicação entre dispositivos pessoais. No entanto, a capacidade da tecnologia vai além, sendo amplamente utilizada para funcionalidades industriais e propósitos de IoT. A rede Wi-Fi funciona por meio de ondas de rádio transmitidas por meio de um roteador que recebe os sinais, decodifica e então os emite a partir de uma antena. Para que um dispositivo tenha acesso a esses sinais emitidos, é preciso que ele esteja dentro de um *hotspot*, ou seja, um determinado raio de ação, que pode variar em até 100m dentro de ambientes internos.

Soluções Wi-Fi de baixa potência são desenvolvidas para aplicações IoT em que algumas das necessidades indispensáveis são longa vida útil da bateria do dispositivo, alta performance de transmissão e recebimento de dados, segurança robusta na transação de informações e facilidade de desenvolvimento e implementação das aplicações.

Outra tecnologia relacionada ao sucesso de serviços e produtos baseados em IoT é a chamada computação em nuvem que, segundo LEE; LEE é um modelo para acesso sob-demanda a uma fonte compartilhada de recursos configuráveis, como por exemplo computadores, redes, servidores, armazenamento, aplicativos, serviços e softwares. Essa infraestrutura e software, vendidos como um serviço, fornecem uma solução para armazenar e processar uma alta quantidade de dados.

Uma das características mais significativas da tecnologia IoT é a enorme quantidade de dados gerados por aqueles dispositivos que estão conectados à rede Internet, fazendo surgir a demanda por uma capacidade considerável de armazenamento destes dados, alta velocidade de banda larga para sua transmissão, assim como uma grande velocidade de processamento dos mesmos. Apenas com estas premissas, torna-se possível a tomada de decisões em tempo real provenientes da inteligência artificial.

Em ambientes empresariais, os sistemas de monitoramento e controle baseados em IoT coletam dados que refletem o desempenho do equipamento, o uso de energia do

mesmo e até mesmo condições ambientais ao seu redor, permitindo que os coordenadores responsáveis pelas máquinas monitorem seu desempenho real a qualquer momento e de qualquer lugar.

Um monitoramento avançado em conjunto com as atuais tecnologias de inteligência artificial podem revelar os padrões operacionais dos equipamentos, identificar possíveis pontos de melhoria, otimizar operações e até prever resultados futuros como uma falha iminente.

Esta funcionalidade das tecnologias de Internet das Coisas e Inteligência Artificial leva imprescindivelmente a custos mais baixos nos gastos com operação e manutenção, além de maior produtividade por evitar qualquer paragem no processo produtivo decorrente de equipamentos inutilizáveis após quebra.

## 2.2 Baterias

A fonte de alimentação que fornece a energia para o sistema pode ser de diferentes origens, como baterias, alimentação em CA (corrente alternada) da rede elétrica ou célula de coleta de energia, por exemplo. O tipo de fonte tem impacto na energia total que pode ser consumida pelo dispositivo e na potência de pico atingida pelo mesmo. Por exemplo, cada tipo de bateria suporta valores diferentes de capacidade de autonomia e corrente de pico máxima, enquanto aplicações com alimentação da rede AC não possuem uma limitação real no consumo médio de energia da carga.

As baterias são divididas em duas classes principais, sendo a classe primária composta por baterias descartáveis após a carga se esgotar em sua primeira utilização, enquanto a classe secundária inclui as baterias que podem ser recarregadas.

### 2.2.1 Bateria Primária

As baterias da classe primária, ou seja, não recarregáveis, geralmente são construídas com elementos químicos alcalinos, zinco ou lítio. Quando em comparação com as baterias recarregáveis, apresentam menores preços comerciais, porém com um limite de uso unitário. Devido à esta restrição, que leva inevitavelmente à sua substituição após sua primeira e única descarga no dispositivo ao qual alimenta, estas baterias não são consideradas ecologicamente corretas se não receberem o devido tratamento para descarte.

A bateria não recarregável mais comum no mercado é a alcalina que utiliza zinco em sua composição. Apesar disso, as baterias de lítio dessa classe primária oferecem maior vida operacional do que as alcalinas quando utilizadas em dispositivos de alta descarga. Isto ocorre porquê estas baterias possuem alta capacidade (mAh) e baixa auto descarga, com pequena resistência interna.

## 2.2.2 Bateria Secundária

Dentre os tipos de bateria recarregável com maior utilização na alimentação de equipamentos eletrônicos portáteis está a de Níquel Cádmio (NiCd), que apresenta vantagens como baixo custo, robustez, durabilidade, boa performance sob condições rigorosas de trabalho e ainda um bom desempenho na recarga rápida.

Todavia, desde a década de 1990 que a bateria de NiCd vem perdendo espaço no mercado, uma vez que é fabricada a partir de materiais tóxicos e, sendo assim, é agressiva ao meio ambiente ao ser descartada quando no fim de sua vida útil. Além disso, a célula de NiCd pode perder gradualmente sua capacidade se for utilizada em aplicações que não proporcionam ciclos completos de carga e descarga de bateria, ou seja, possuir eventuais períodos de curta utilização.

A bateria de Níquel Hidreto Metálico (NiMh) ganhou espaço para aplicações nos equipamentos que a bateria de NiCd ocupou anteriormente, uma vez que não é tão agressiva ao meio ambiente quanto a antecessora. Suas características técnicas podem variar de acordo com o fabricante, porém ainda são bem próximas das baterias de NiCd, como por exemplo a tensão característica de ambas é de 1,2V (MICHELINI, 2017).

Por sua vez, a bateria de íons de lítio (Li-Ion) é uma das mais recentes tecnologias e traz consigo diversos benefícios, por exemplo, requer pouca manutenção, possui alta densidade de energia, é fácil de ser recarregada e causa menores danos ao meio ambiente. Outros pontos importantes de comparação com as demais baterias citadas acima é que apresenta tensão característica maior que 3V (entre 3,2V, 3,6V e 3,7V), densidade de carga de duas a três vezes maior do que a NiCd e ainda possui menor auto descarga.

Algumas das limitações que comprometem as baterias de Li-Ion são que estas requerem circuitos de proteção, uma vez que são compostas por eletrólito altamente inflamável. Além disso, estão sujeitas a envelhecimento, custo elevado e alta temperatura por efeito de uso abusivo das células (MICHELINI, 2017).

## 2.3 Sensor SMART TRAC

O principal intuito do Sensor SMART TRAC (Figura 1) é facilitar a vida dos profissionais da manutenção que precisam lidar com quebras inesperadas de equipamentos críticos no processo produtivo. O dispositivo permite a manutenção preditiva por meio do monitoramento online de máquinas rotativas, coletando espectro de vibração e também a temperatura da carcaça do maquinário.

Figura 1 – Sensor SMART TRAC



Fonte: TRACTIAN

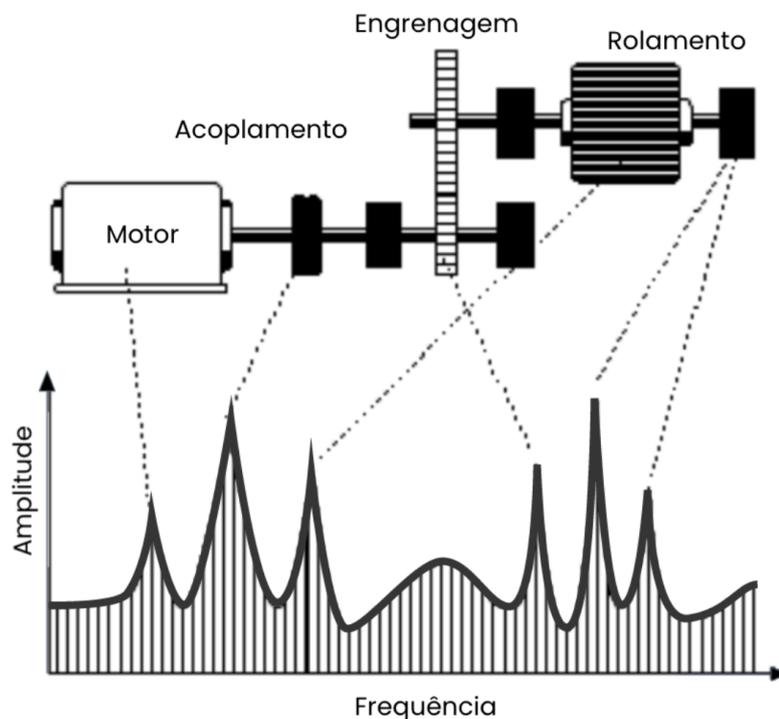
O sensor coleta a aceleração da máquina nos eixos x, y e z e a primeira informação obtida baseada nesses dados é a forma de onda da aceleração em g ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) em função do tempo. Com intervalo de amostra programado para coletar 2048 pontos de dados por eixo, a uma frequência de 6600Hz (limitação física do dispositivo), a coleta totaliza uma duração de aproximados 0.3 segundos e é realizada a cada 10 minutos.

Assim que esta amostra é enviada para a nuvem e se torna disponível para processamento na plataforma computacional, é feita a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform) para obter os dados de aceleração em função da frequência, seguida da normalização dos dados, resultando no espectro de vibração dos 3 eixos.

Na Figura 2, observa-se uma ilustração de espectro de vibração de uma máquina com indicações dos respectivos picos para cada parte girante de um conjunto. De acordo com a relação entre as unidades de medida em que 60rpm (rotações por minuto) é o equivalente a 1Hz de frequência de amostragem, é possível discernir cada giro de engrenagem na qual o sensor está acoplado. Supondo por exemplo que o motor gire a 1800rpm, identifica-se um pico em 30Hz relacionado ao giro do motor. Ou até, com o rolamento girando a 3000rpm,

haverá outro pico em 50 Hz relacionado ao giro desse rolamento.

Figura 2 – Análise de Assinatura Espectral da Máquina



Fonte: TRACTIAN

Quando há alguma adversidade no equipamento, novos picos múltiplos (harmônicos) dos giros de cada componente rotativo da máquina aparecem provocando um aumento de amplitude em seu espectro de vibração. O reconhecimento desta anomalia gráfica permite que o responsável pela máquina interfira e corrija o defeito antes que uma falha grave ocorra, caracterizando assim uma intervenção preditiva. É possível detectar diferentes falhas através dessa análise da assinatura espectral de equipamentos, sendo algumas das mais clássicas:

- Desbalanceamento;
- Folga Mecânica;
- Desalinhamento;
- Desgaste de Rolamento;
- Falta de Lubrificação;
- Anomalias gerais.

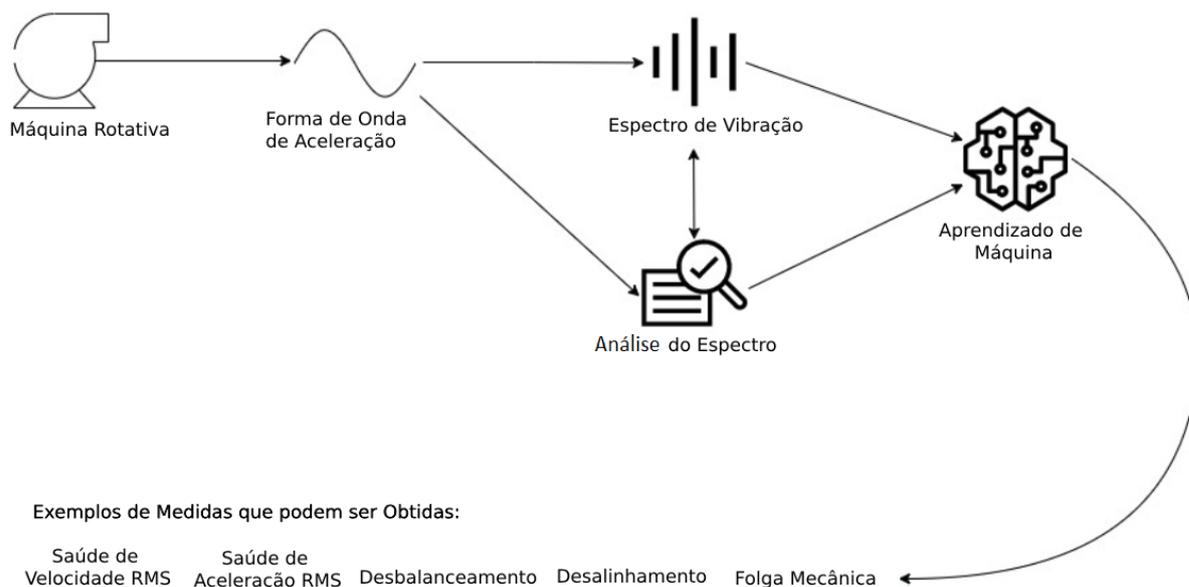
A partir do momento que uma amostra da vibração da máquina já foi coletada pelo sensor, ela é transmitida para armazenamento no banco de dados em nuvem, para

então ser solicitada e enviada até a plataforma computacional da Tractian, onde receberá o tratamento inicial com a FFT. Com aplicação de técnicas de inteligência artificial sobre esta amostra, a plataforma utiliza ferramentas para analisar o comportamento da assinatura espectral e gerar um padrão único referente ao espectro de cada motor, a partir das informações coletadas durante o funcionamento regular do equipamento.

Com a tecnologia digital *Machine Learning* (na tradução direta ao português, "aprendizado de máquina"), o software desenvolvido pela empresa tem a capacidade de detectar evidências que forneçam um diagnóstico de falha existente no maquinário, como determinadas irregularidades que fogem do padrão da assinatura espectral ou anomalias no valor da temperatura da carcaça da máquina.

As mensagens com notificações de alertas são geradas automaticamente pelo software assim que o diagnóstico é concluído, possibilitando uma ação preventiva imediata do responsável pela manutenção do equipamento. O diagrama envolvendo todas as etapas do processo, desde a coleta de dados até o reconhecimento de falhas pelo software, pode ser visto na esquematização sintetizada na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de coleta de dados até interpretação de falhas



Fonte: TRACTIAN

A empresa TRACTIAN utiliza de impressoras 3D para fabricação própria dos invólucros dos sensores. O material adotado é o plástico ABS, resina termoplástica derivada do petróleo amplamente utilizada na indústria devido à sua viabilidade econômica, leveza e facilidade em ser moldada. Apresenta ainda uma certa resistência ao calor e às baixas temperaturas, tornando mais seguro seu uso em ambientes hostis de fábricas.

A conectividade utilizada inicialmente no sensor à bateria é igual aquela já adotada

no BAND TRAC, a tecnologia de rede 2,5G que conecta o dispositivo à uma torre de comunicação de infraestrutura pré existente na dependência industrial. Caso a conexão à internet da fábrica seja feita através de um roteador, há a opção de transição automática da comunicação do sensor de 2,5G para Wi-Fi, com o *Fallback Wi-Fi*.

Originalmente, utilizando bateria de Li-Ion recarregável, a autonomia do SMART TRAC é de aproximadamente um mês de operação ininterrupta. Sua operação conta com coletas de amostra cuja duração é de aproximadamente 0.3 segundos, realizadas com intervalos de 10 minutos entre coleta. Uma característica do dispositivo é que não há botão de liga/desliga no mesmo, ou seja, uma vez que o sensor está devidamente montado sua operação se inicia automaticamente e é cessada apenas com o esgotamento de fonte de energia.

O SMART TRAC possui em sua placa de *hardware* o processador de dados ESP32, que dentre as suas configurações já inclui o modo *Deep Sleep*, na tradução direta do inglês "sono profundo", o que significa que quando o sensor não está em seu modo ativo, coletando amostra, processando e então enviando os dados, o dispositivo entra em modo profundo de economia de energia, consumindo apenas o suficiente para que seja reativado automaticamente na devida hora de entrar em modo ativo novamente.

Inicialmente, antes de serem enviados para a rede de transmissão, os dados coletados no período de amostra são armazenados localmente na placa de processamento ESP32. O sistema de arquivamento adotado no SMART TRAC também segue o padrão de seu predecessor BAND TRAC, chamado SPIFFS (SPI Flash File System), que consiste em um sistema de arquivos com processos relativamente longos de armazenamento e busca de dados, porém com os benefícios de ser uma aplicação com registros fixos e grande espaço de memória.

Sobre as características construtivas iniciais do *hardware* e algumas especificações técnicas do SMART TRAC, a Tabela 1 apresenta de forma sucinta os principais tópicos que refletem a construção e operação do sensor até o momento em que este trabalho fora iniciado.

Tabela 1 – Características Construtivas e Técnicas - SMART TRAC

Especificações Gerais	
Dimensão	62 mm x 42 mm x 29 mm
Peso	107g
Material	ABS
Fixação	Imã ou Epóxi ou Parafuso
Modelo do Processador da Placa	ESP32
Modelo da Memória da Placa	SPIFFS
Temperatura	-10 °C < T < +80°C
Alimentação	Bateria Recarregável
Grandezas	Vibração Triaxial, Temperatura
Acelerômetro	3 eixos 1Hz - 6.6Hz
Autonomia do Sensor	1 mês
Conectividade	2,5G
Fallback Wi-Fi	Sim
Gateway	Não
Fabricação	US/China

## 3 Desenvolvimento

O consumo de energia de aplicações que operam com tecnologia IoT pode ser analisado através de três parâmetros chaves: o modelo de tráfego das informações, as propriedades da rede de transmissão e as limitações físicas da plataforma.

Estes três parâmetros podem fazer variar o consumo total de energia de um produto, o qual pode ser calculado através da relação de corrente consumida (em unidades de Ampère) ao longo do tempo de fornecimento de energia.

As seções seguintes descrevem considerações e alterações implementadas em cada um dos três parâmetros, levando em conta o modelo da bateria para ponderar a limitação física do sistema, o tratamento dos dados a serem transmitidos e seu impacto no encaminhamento dessas informações, e também qual modelo de conectividade de rede deve ser adotado com o intuito de apresentar mais vantagens para a aplicação.

### 3.1 Materiais e Métodos

A metodologia utilizada para realização do presente trabalho foi:

- Levantamento bibliográfico de tópicos de sensores à bateria, com consultas em artigos, livros, dissertações, trabalhos de conclusão de curso e monografias;
- Desenvolvimento da proposta de redução de consumo da bateria segundo melhorias físicas e computacionais;
- Testes de validação e caracterização do sensor com estudos comparativos entre a solução apresentada neste trabalho e a utilizada anteriormente;

Foram utilizados os seguintes materiais no trabalho:

- Software Visual Studio Code (ambiente de desenvolvimento de C++);
- Software Platform IO (compilador e interface com o microprocessador ESP32);
- Acelerômetro Adafruit LSM6DS33 6-DOF Breakout board;
- Microprocessador ESP32;
- Multímetro 34465A (MOD. 34465A Digital Multimeter, 6 1/2 Digit, Truevolt DMM NCM 90303200);
- Motor DC de 24V-3A;

- Bateria classe primária Li-SOCl<sub>2</sub>;
- Sensor SMART TRAC;

## 3.2 Bateria

A solução inicialmente adotada, utilizando bateria de classe secundária de Li-Ion, apesar de vantagens com relação à reutilização e danos reduzidos ao meio ambiente, apresenta uma certa inconveniência devido ao tempo de recarga exigido para o SMART TRAC, que no caso pode durar cerca de 24 horas. Isso ocorre pois o caminho da corrente proveniente do carregador para alimentar a bateria está intermediado pela placa de circuito eletrônico, que por sua vez limita a passagem de corrente em um valor de pico relativamente baixo, de 500mA.

Essa demora na recarga da bateria faz com que a utilização de um carregador portátil para o sensor seja inviável. Posto isto, considerando a realidade empresarial na qual o sensor está sendo implementado, não é comercialmente atrativo a venda de um produto de instalação remota que deve ser desconectado a cada 30 dias, deixando de coletar dados temporariamente enquanto tem sua bateria recarregada pelo próprio cliente.

Além disso, quando ainda em nível de teste para validação do funcionamento correto do dispositivo SMART TRAC, houve um acidente pontual em que um curto circuito resultou na explosão da bateria secundária de Li-Ion, altamente inflamável. Deste incidente, intensificou-se a busca por uma solução mais segura e estável, que possa ser aplicada com confiança em um ambiente fabril com condições adversas, cercado de trabalhadores e maquinários que precisam ser mantidos em segurança.

Figura 4 – Sensor SMART TRAC em Operação



Fonte: TRACTIAN

A Figura 4 mostra o sensor SMART TRAC original, com bateria recarregável, acoplado à uma máquina em campo industrial para testes iniciais, reforçando a importância no conceito de segurança. Dessa forma, optou-se pela solução que utiliza bateria de lítio classe primária, com tensão característica de 3.6V, temperatura máxima suportada de até 100°C, capacidade de 5,8Ah e composição  $Li-SOCl_2$ .

Ao adotar o recurso com bateria não recarregável, torna-se desnecessário criar uma abertura no invólucro do sensor para acesso de entrada do carregador da bateria. Sendo assim, o grau de proteção do dispositivo pode ser elevado para IP-65. O grau de proteção avalia e classifica a proteção de produtos eletrônicos contra a entrada de poeira e água, e o IP-65 especificamente garante que o dispositivo está totalmente protegido contra poeira e também contra jatos de água.

Apesar do quesito segurança ter sido melhorado, a funcionalidade de um sensor que requer a troca de bateria a cada mês ainda abre espaço para aperfeiçoamento do dispositivo. Para isso, é preciso investigar melhorias no processo interno que consome bateria processando e transmitindo os dados coletados.

### 3.3 Conectividade

Apesar da tecnologia de rede 2,5G atender satisfatoriamente aos requisitos de alta cobertura de sinal, velocidade de transmissão e facilidade de implementação nos dispositivos de sensoriamento da TRACTIAN, a solução para o SMART TRAC, diferentemente do

BAND TRAC, deve se atentar à limitação de disponibilidade de energia, uma vez que não está ligado diretamente à rede elétrica de fornecimento.

Para estes dispositivos que requerem baixo custo e alta durabilidade da bateria, levando em conta o objetivo deste trabalho, não basta focar em tecnologias de comunicação que atendam aos requisitos de IoT mas sem considerar os requisitos importantes para a empresa contratante do serviço, como disponibilidade de sinal em território regional e facilidade de desenvolvimento e instalação da rede.

A tecnologia LoRaWAN, por exemplo, implica que a responsabilidade recai sobre a empresa TRACTIAN de fornecer também a estrutura da rede e garantir sua disponibilidade e a cobertura necessária para cada um dos clientes que adquirirem ao menos um sensor, fazendo desta uma solução inviável comercialmente.

Sendo assim, e buscando manter similaridades entre os dois tipos de sensores da empresa, a solução adotada para otimizar o consumo de bateria do dispositivo é a adoção de um Gateway em fábrica que receberá os sinais dos sensores instalados, para então encaminhá-los à torre de transmissão GPRS ou roteador de sinal, dependendo do recurso pré existente utilizado na indústria.

O modo de transmissão dos sinais do sensor SMART TRAC ao Gateway será utilizando a tecnologia Wi-Fi de baixa potência, o que deverá consumir menos carga da bateria quando em comparação com um chip de rede 2,5G instalado no circuito. A capacidade de conexão por Gateway é de 20 sensores, todos dispostos em um raio de aproximadamente 80m de distância.

O modem que é adicionado ao sensor quando este envia dados via GPRS é do modelo SIM800L GSM/GPRS. De acordo com sua folha de dados, a corrente demandada pelo dispositivo ao encaminhar um pacote de dados em rede GPRS é de 453,57mA (SIMCOM, 2013) . A Tabela 2 resume alguns dados de consumo de corrente fornecidos pela Folha de Dados do SIM800L.

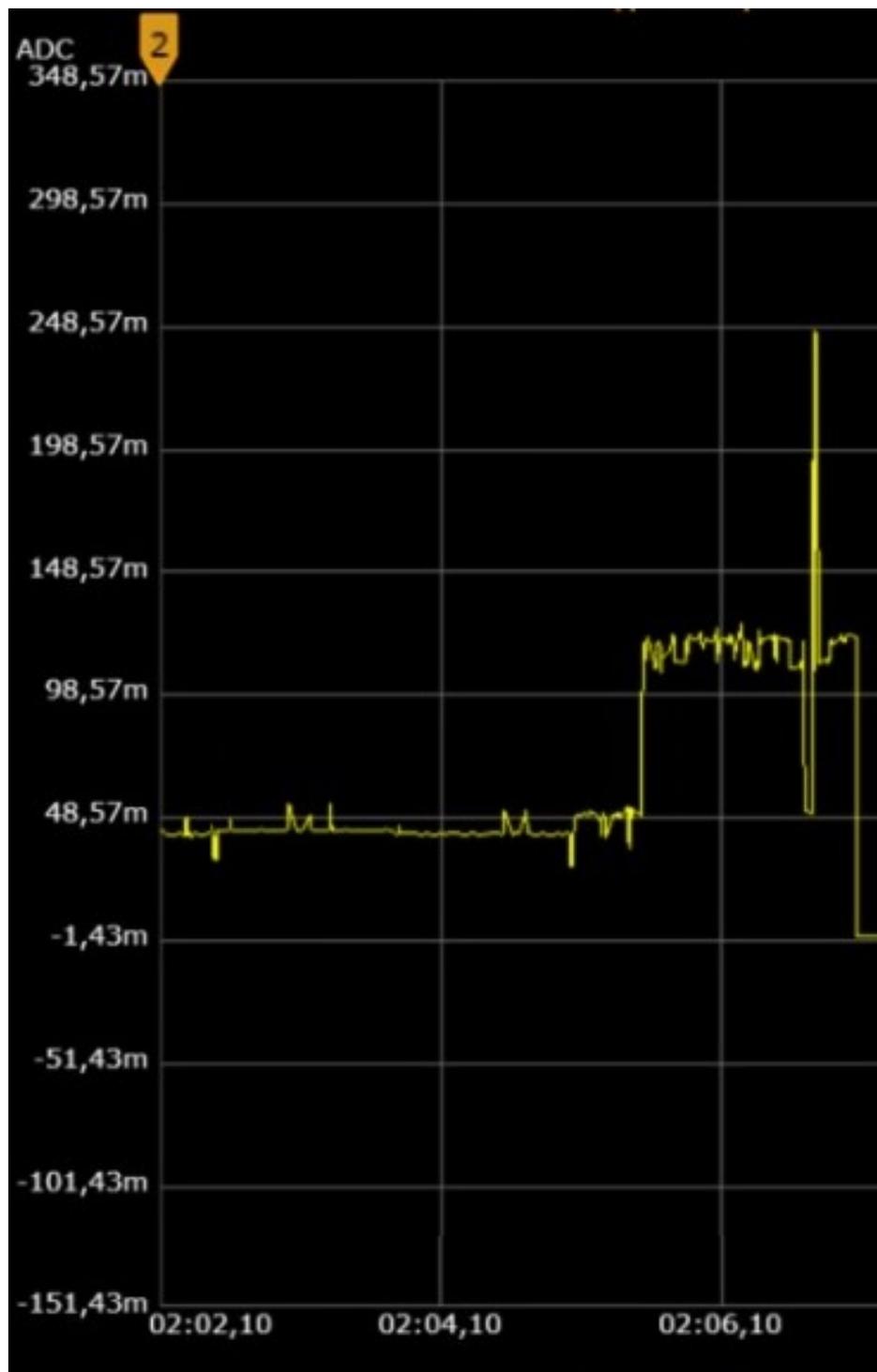
Tabela 2 – Consumo de Corrente do Modem SIM800L GSM/GPRS

Modo de Operação	Consumo de Corrente
Desligado	60 $\mu$ A
"Sleep"	1 mA
Stand by	18,7 mA
Ligação de Voz	199,48 mA
GPRS (Dados)	453,57 mA

A seguir, na Figura 5, é apresentada uma captura de imagem realizada por multímetro conectado ao sensor SMART TRAC durante o processo de envio de pacote de dados à rede de comunicação. Neste caso, o sensor envia os dados via comunicação Wi-Fi

de baixa potência do próprio microprocessador EPS32, ao invés de recorrer a um modem SIM800L.

Figura 5 – Consumo de carga durante envio de dados - SMART TRAC



Fonte: do Autor. 2021

Com a Figura 5, obtém-se a informação de que o pico de corrente consumida no envio de dados através de rede Wi-Fi de baixa potência é de 248,57mA. Fica evidente que esta corrente de pico é consideravelmente menor do que aquela de 453,57mA demandada

pelo sensor operando com transmissão de dados em rede 2,5G.

## 3.4 Tratamento de Dados

A quantidade de informação enviada por pacote de dados em uma rede de transmissão sem fio influencia diretamente no consumo de bateria do dispositivo que realiza o envio. Quanto maior for o pacote de dados, maior será também a energia demandada para executar o encaminhamento e o tempo necessário para a entrega no destino.

É prudente estabelecer que a otimização em números não deve ser feita na quantidade de amostras de dados que serão coletadas do motor pelo sensor de vibração, pelo bem da criação de um padrão correto e confiável da assinatura espectral da máquina. Dessa forma, busca-se uma otimização na quantidade de dados que serão transmitidos do sensor até o banco de dados em nuvem.

O obstáculo enfrentado então, está na obtenção da assinatura espectral da máquina baseando-se em uma quantidade reduzida de dados recebidos em nuvem, o que pode causar diminuição da sua fidedignidade. A solução será então fazer o processamento inicial dos dados, ou seja, aplicar a FFT para obter os dados da amostra no domínio da frequência, enquanto estes ainda estão na memória do processador físico, antes de enviá-los na rede de transmissão até o banco de dados em nuvem.

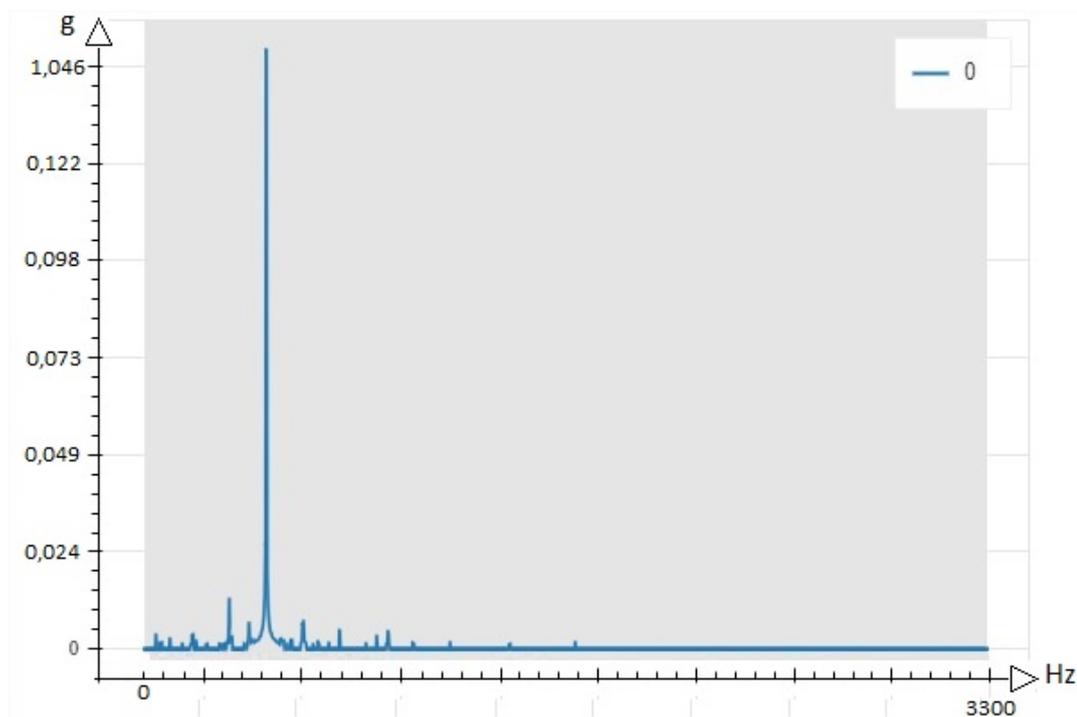
Durante um período de amostragem de aproximadamente 0.3 segundos, tem-se um total de 6144 dados coletados somando-se os três eixos de medição (2048 pontos por eixo). Com programação em C++ direcionada no processador ESP32 do dispositivo SMART TRAC, é possível acessar os dados e submetê-los à Transformada Rápida de Fourier ainda no *hardware*, adiantando o processo que seria executado eventualmente com a informação em nuvem.

O Teorema de Nyquist afirma que a taxa de amostragem, em Hz, deve ser maior do que pelo menos o dobro da componente de maior frequência no sinal medido e analisado no domínio da frequência. Desse modo, sendo a taxa de amostragem do sensor igual a 6,6kHz, tem-se no domínio da frequência uma faixa de 0 até 3,3kHz em que as amplitudes dos sinais coletados são analisadas. Neste intervalo, os sinais com menores amplitudes são, em geral, ruídos captados pelo sensor, enquanto aqueles sinais com as maiores amplitudes representam realmente a vibração dos componentes rotativos da máquina.

Com a informação pré-processada, é possível selecionar para envio apenas os 100 maiores valores de amplitude de cada eixo, medidos em função da frequência, sem que haja perda de qualidade e característica da onda criada com estas informações. O encaminhamento então será de um pacote de dados consideravelmente mais enxuto do que o anterior com 6144 elementos.

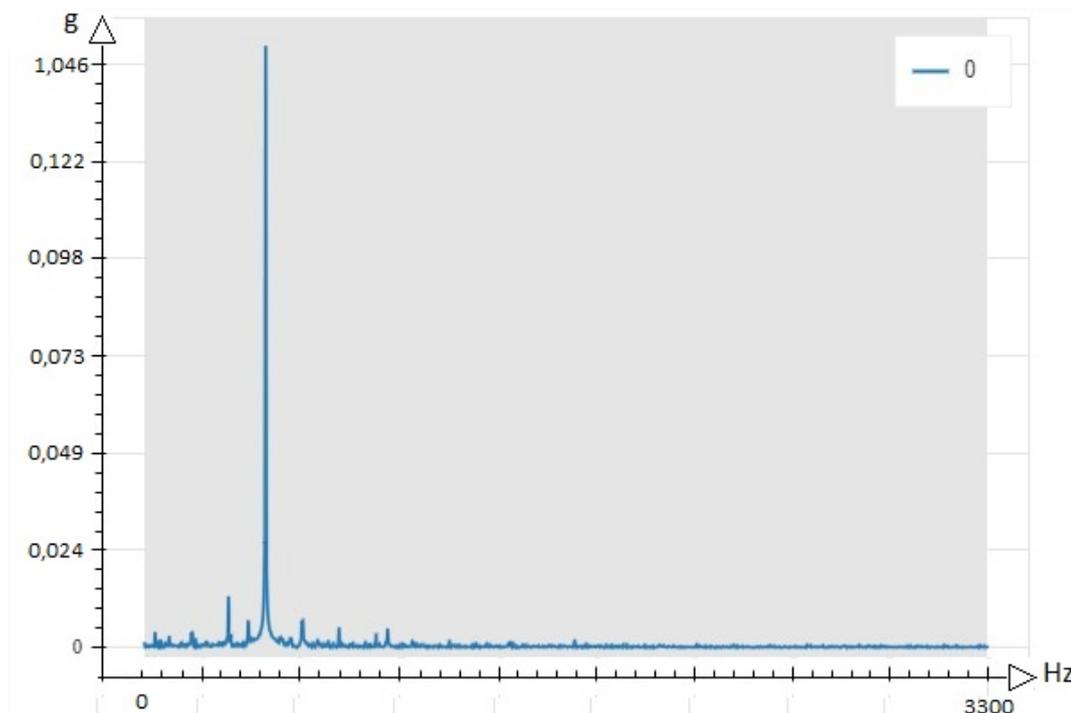
Nas Figuras 6 e 7, uma comparação entres dois sinais gerados a partir da mesma amostragem de dados. Na Figura 6, os 6144 dados amostrados foram submetidos à Transformada Rápida de Fourier e todos são utilizados para formar o sinal. Já na Figura 7, os mesmos 6144 dados amostrados foram submetidos à FFT, porém, apenas os 300 dados de maior amplitude foram selecionados para gerar o sinal apresentado.

Figura 6 – Sinal Gerado com 6144 Pontos de Amostra



Fonte: do Autor. 2021

Figura 7 – Sinal Gerado com 300 Pontos de Amostra



Fonte: do Autor. 2021

Em ambas as imagens acima, o eixo  $x$  representa o domínio da frequência, em Hz, enquanto o eixo  $y$  representa a amplitude do sinal da vibração coletada. Desta comparação, é possível afirmar que o sinal obtido com a utilização de 300 dados (Figura 7) é satisfatoriamente próximo ao sinal formado através de 6144 dados da mesma amostragem (Figura 6).

As informações coletadas são interpretadas pelo código de programação do sensor como variáveis do tipo *float*, que ocupam um espaço de 4 bytes na memória. A partir deste ponto de análise, ao considerar 6144 pontos de interesse que ocupam 4 bytes cada, tem-se o envio de um pacote com 24.576 bytes de dados sendo enviado em rede de comunicação sem fio. Na mesma linha de raciocínio, a transmissão de 300 dados de interesse em variável do tipo *float* acarreta em um pacote de dados de 1200 bytes na rede.

Além da redução na energia consumida por ciclo de operação do dispositivo à bateria, identifica-se também uma possível redução na tarifa cobrada pela operadora de rede de transmissão de dados, que por sua vez analisa a quantidade de dados transmitidos em rede para estabelecer o valor de cobrança do cliente.

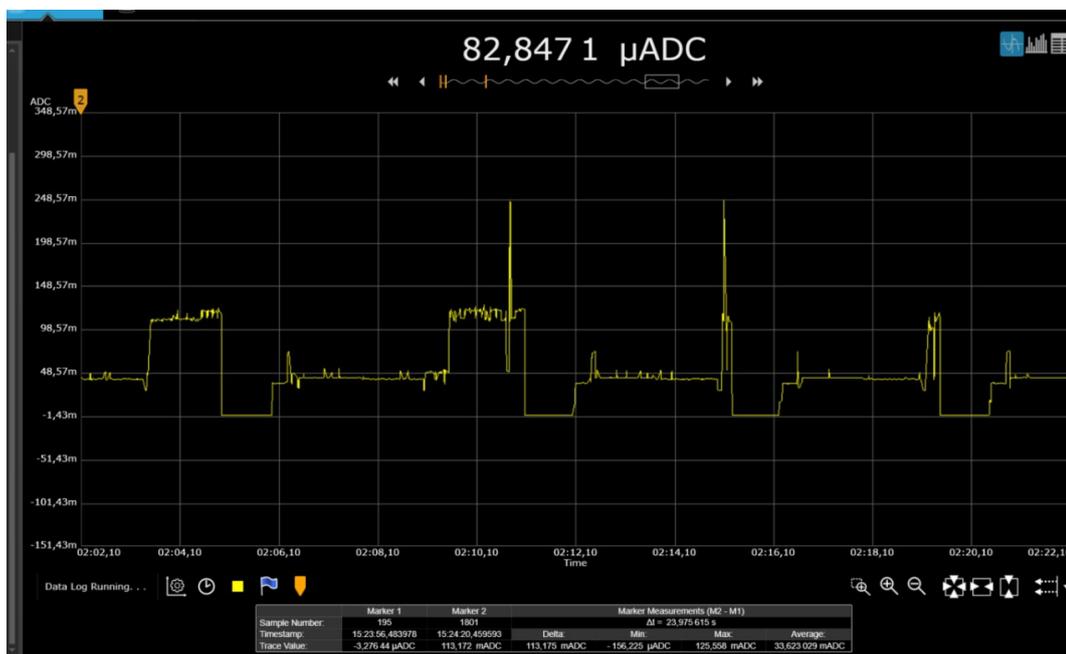
Enquanto a otimização do consumo de energia através do tratamento inicial dos dados no processador do SMART TRAC ainda estava sob análise, tornou-se clara a necessidade emergente de diminuir o gasto de energia interno do sensor. Este novo gasto energético surgiu devido às recentes instruções implementadas no ESP32, para realizar o processamento das informações no domínio da frequência, uma vez que esta etapa antes

pertencia à programação em nuvem.

Para tanto, foi estudada a possibilidade de acessar a memória RAM do ESP32, uma memória que funciona para acessar rapidamente os arquivos armazenados dentro do microprocessador e que trabalha com os dados de forma temporária, sendo ideal para acessar e tratar as informações ao invés de armazená-las. Mais especificamente, os 520kB de memória interna SRAM disponíveis no ESP32 fazem a memória ser mais rápida e econômica em relação à SPIFFS (ESPRESSIF-SYSTEMS, 2021).

A seguir, a Figura 8 apresenta a imagem capturada pelo multímetro de alta precisão conectado ao sensor SMART TRAC durante todo o processo de coleta de dados, tratamento das informações realizando a FFT sobre os pontos coletados, seguido do acesso à memória do microprocessador e envio do pacote de dados para a rede de transmissão.

Figura 8 – Consumo de carga durante processamento - SMART TRAC



Fonte: do Autor. 2021

Esta imagem da Figura 8 relaciona a corrente consumida pelo dispositivo em mili Ampère (ADC) com o tempo gasto em segundos. O sensor foi programado para realizar três envios em configurações diferentes, conforme descrito a seguir, e estas configurações são vistas respectivamente no segundo, terceiro e quarto ciclos de operação. A experimentação foi realizada inicialmente com acesso à memória SPIFFS do sensor (primeira configuração) e em seguida à memória RAM do mesmo.

Nas duas primeiras configurações de sensor, o tratamento inicial de dados com FFT foi realizado, porém, não foram selecionados apenas os dados com as 300 maiores amplitudes para serem enviados. O envio foi então de 3072 pontos de dados, uma vez que devido ao Teorema de Nyquist, não são mais os 6144 dados da amostragem e sim metade

desta quantidade.

No primeiro ciclo de operação do sensor, finalizado entre 02:04s e 02:06s, a captura de tela mostra uma operação em que o SMART TRAC não conseguiu localizar e se conectar com a rede Wi-Fi para enviar o pacote de dados à nuvem, portanto não há o pico de consumo de corrente demandada para realizar o envio.

Quando o dispositivo não consegue conectar-se à rede, ou quando enfim é finalizado o envio do pacote de dados para a nuvem, o sensor foi programado para entrar em modo *Deep Sleep*, com consumo mínimo de corrente até a próxima operação. Essa programação está presente entre cada um dos ciclos.

Durante o segundo ciclo capturado, com início imediatamente antes de 02:06s, é possível identificar o momento que o sensor começa a coletar e então tratar os dados com a FFT, que é quando seu consumo de corrente se eleva em um degrau significativo até quase 48,57mA. Em seguida, o dispositivo passa a acessar a memória SPIFFS, o que ocasiona outro degrau positivo no consumo de corrente que permanece até que o sensor atinge seu pico de consumo (em 248,57mA) para transmitir na rede o pacote de dados contendo todos os 3072 pontos tratados e recuperados da memória.

Já no terceiro ciclo de operação visível na imagem com início em 02:12s, é possível acompanhar novamente o andamento da coleta e processamento de dados com a FFT, com o mesmo consumo médio de corrente beirando 48,57mA. Neste caso, porém, o dispositivo acessa sua memória RAM para então enviar o pacote com 3072 dados na rede de transmissão.

A diferença de duração entre operações de acesso à memória interna do microprocessador é considerável, quando comparados o segundo e terceiro ciclos, resultando em uma diferença de aproximadamente 2 segundos no tempo total de cada processo. Além disso, estes segundos a menos que a operação no terceiro ciclo gasta refletem em menor tempo de consumo da corrente no degrau acima de 100mA.

Por fim, no quarto ciclo de operação, que também acessa a memória RAM do dispositivo após seu processamento inicial, nota-se que é imperceptível pelo multímetro o mesmo pico máximo de corrente em 248,57mA que é detectado nos dois ciclos anteriores durante o envio dos dados da coleta. Isso se deve à redução do pacote total de 3072 pontos de dados para apenas os 300 maiores valores do espectro de vibração, o que faz reduzir consideravelmente o tempo de envio deste pacote à rede.

Sendo assim, ficam evidentes duas otimizações realizadas no sensor SMART TRAC visando a melhoria na autonomia da bateria do dispositivo: redução de tempo de processamento de coleta usando memória de rápido acesso e redução na quantidade de dados enviados.

## 4 Resultados

Para realizar um estudo comparativo que indique as vantagens obtidas a partir de cada uma das alterações feitas no sensor SMART TRAC, cada mudança deu início à uma nova categorização do dispositivo. É válido frisar, porém, que a comparação a seguir já considera como ponto de partida que todas as configurações possuem bateria não recarregável de Li-Ion e transmissão de dados através de rede Wi-Fi de baixa potência.

Na Configuração 1 do sensor, o mesmo transmite os dados através da rede Wi-Fi de baixa potência e opera acessando a memória SPIFFS no microprocessador ESP32. O envio é de 3072 dados para a rede.

Durante a Revisão 2 do dispositivo, este também transmite os 3072 dados em rede utilizando a função Wi-Fi de baixa potência do microprocessador. Nesta revisão, porém, o sensor opera acessando a memória RAM do ESP32.

Enfim, na Revisão 3 do SMART TRAC, o dispositivo atua utilizando a função Wi-Fi de baixa potência para envio de pacote de 300 dados à rede, e opera acessando a memória RAM do microprocessador.

As características de cada Revisão do sensor SMART TRAC foram resumidas na Tabela 3 abaixo, para facilitar a compreensão e associação de cada revisão com o resultado obtido.

Tabela 3 – Configurações do Sensor SMART TRAC

Configuração	Quantidade de Dados Enviados	Memória de Processamento
1	3072	SPIFFS
2	3072	RAM
3	300	RAM

A partir das alterações propriamente estudadas e propostas no Capítulo 3, e baseando-se nos resultados medidos e apresentados então, montou-se uma tabela que relaciona a evolução de cada revisão do SMART TRAC com relação ao tempo de acesso à memória do microprocessador ESP32 e à corrente demandada para enviar o pacote de dados do sensor à rede de comunicação. O resultado desta análise pode ser observado na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Resultados Obtidos com Alterações no SMART TRAC

Configuração	Coleta e Processamento		Acesso à Memória		Envio de Dados à Rede	
	Duração	Demanda	Duração	Demanda	Duração	Demanda
1	3,7s	0,0499mAh	1,5s	0,0513mAh	0,1s	0,0069mAh
2	2,9s	0,0391mAh	0,2s	0,0068mAh	0,1s	0,0069mAh
3	2,9s	0,0391mAh	0,3s	0,0102mAh	-	-

Na Configuração 1, de acordo com o resultado do gráfico na Figura 8, o SMART TRAC opera por cerca de 3,7 segundos com consumo de 48,57mA de corrente, que representa sua etapa de coleta e tratamento dos dados. Transformando estes dados em demanda de energia (mAh), tem-se uma demanda de 0,0499 mAh. Neste mesmo ciclo de operação, ocorre então o consumo de 123,2mA durante 1,5s de acesso à memória SPIFFS, o que reflete em uma demanda de 0,0513 mAh. No momento do envio dos 3072 dados, com duração de 0,1 segundos aproximadamente, a corrente atinge 248,57mA e portanto o consumo é de 0,0069 mAh. A demanda total de energia neste ciclo com Configuração 1 no sensor é de 0,1081 mAh.

Com o sensor operando em sua Configuração 2, também de acordo com a Figura 8, há o mesmo consumo de 48,57mA de corrente durante 2,9s, resultando na demanda de 0,0391 mAh de energia durante coleta e processamento de dados. Em seguida, 122,2mA de corrente é consumida ao longo de 0,2s de acesso À memória RAM, proporcionando a demanda de 0,0068 mAh de energia e, por fim, o pico de corrente em 248,57mA durante 0,1s no envio dos 3072 dados, consumindo 0,0069 mAh de energia. Para este ciclo de Configuração 2, a demanda total de energia já foi otimizada para 0,0528 mAh.

Finalmente, no ciclo de operação com a Configuração 3, observa-se na Figura 8 que o sensor consome 48,57mA de corrente durante os 2,9s de coleta e processamento, resultando em 0,0391 mAh de demanda. Logo após, durante o acesso à RAM, o sensor consome durante 0,3s a corrente de 122,2mA (ou seja, 0,0102 mAh de energia). Neste caso, o tempo de duração para o envio de 300 é imperceptível até pelo multímetro, portanto nenhuma energia considerável é demandada. O consumo total de energia neste ciclo é de apenas 0,0493 mAh.

A Tabela 5 resume os dados de conclusão da análise dos resultados, explicitando o tempo de operação e o total de demanda em mAh por ciclo de operação em cada uma das configurações do SMART TRAC.

Tabela 5 – Tempo e Demanda por Ciclo de Operação no SMART TRAC

Configuração	Duração do Ciclo	Demanda por Ciclo
1	5,3s	0,1081mAh
2	3,2s	0,0528mAh
3	3,2s	0,0493mAh

A questão abordada sobre a troca de bateria da classe secundária para primária foi com finalidade de prover segurança para os usuários e os arredores do dispositivo, logo não implica em alterações diretas no tempo e corrente consumida durante os ciclos de processamento e envio. Por este motivo, a alteração do tipo de bateria implementada neste trabalho não foi abordada na Tabela 4 acima.

É evidente que a cada revisão do sensor SMART TRAC sua operabilidade é otimizada, uma vez que os processos passam a demandar cada vez menos tempo de duração e menor consumo de energia. Economizando nestas duas variáveis, o sensor consome menos carga durante um ciclo de operação, partindo de 0,1081 mAh para 0,0493 mAh na configuração final, e a bateria responsável por alimentar o dispositivo certamente apresentará maior tempo de vida útil.

Considerando a bateria de  $Li-SOCl_2$  adotada, que possui capacidade de 5,8 Ah, estima-se com os resultados acima que esta bateria suporta 117647 coletas do sensor em sua Configuração 3, que gasta 0,0493 mAh de energia por ciclo. Uma vez que em um dia de operação o SMART TRAC coleta 144 amostras, a bateria do sensor deverá operar de maneira ininterrupta por 816 dias, ou seja, aproximadamente 27 meses de operação.

# 5 Considerações Finais

## 5.1 Conclusão

Este trabalho foi desenvolvido de modo a encontrar soluções para resolver um problema real, ou seja, a necessidade de otimização no consumo de carga de um sensor à bateria. O objetivo final desta pesquisa é auxiliar na superação da dificuldade enfrentada pela empresa TRACTIAN de lançar no mercado um dispositivo de sensoriamento remoto que seja confiável, robusto e que possa operar de forma ininterrupta por mais tempo.

A pesquisa teve enfoque em solução que contempla dois pontos principais de otimização: redução na quantidade de dados enviados do sensor à rede de comunicação, e diminuição também no tempo de acesso à memória interna do dispositivo, durante seu processamento.

No que diz respeito à quantidade de informações transmitidas do sensor à rede, o tamanho do pacote de dados pôde ser reduzido consideravelmente quando selecionados apenas o pontos de maior amplitude da amostra, após esta ser processada em *hardware*. Esta alteração no tamanho do pacote fez com que o tempo de duração da corrente de pico consumida pelo sensor no momento do envio se tornasse imperceptível até para o multímetro em sua configuração de escala, e o resultado final do sinal gerado foi satisfatoriamente semelhante com aquele que seria formado com todos os pontos de dados.

Além desta melhoria, também foi possível atingir uma diminuição significativa de quase 2 segundos por ciclo no tempo de acesso à memória do microprocessador do dispositivo, quando foi implementado no código de programação para que fosse acessada a memória RAM, ao invés da SPIFFS, antes de enviar os dados em rede. Esta otimização, presente em cada ciclo de operação, implica em um consumo de carga total consideravelmente reduzido a longo prazo, devido à menor duração de consumo de corrente por operação.

Em geral, para além das otimizações obtidas com relação ao consumo de carga do SMART TRAC, este trabalho também alcançou resultados vantajosos no quesito de robustez e segurança de operação, com a alteração para bateria não recarregável e consequente aprimoramento do grau de proteção do sensor. É mais atrativo comercialmente para o cliente adquirir um dispositivo com vida útil prolongada que será substituído por sua nova versão eventualmente, ao invés de trazer consigo a responsabilidade de desconectar o sensor mensalmente e carregá-lo durante 24h antes de recolocá-lo em operação.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Para trabalho futuro, fica em aberto o estudo de viabilidade de processamento do sinal aplicando a FFT quando este já foi transmitido e encontra-se no *Gateway*. A vantagem estaria em evitar que o processamento da amostra consuma energia da bateria do dispositivo.

Os benefícios obtidos deverão ser ponderados levando em consideração que cada *Gateway* pode receber sinal de até 20 sensores, o que poderia ocasionar em uma fila de espera para processamento de todos os dados de amostras recebidas. Além disso, com relação ao próprio dispositivo SMART TRAC, apesar do consumo de carga ser diminuído ao longo do processo de tratamento dos dados, a corrente de pico demandada para envio dos mesmos voltaria a ter uma duração considerável.

Eventualmente, também haverá espaço para aprofundamento no estudo de outras tecnologias de transmissão de dados em rede sem fio que estão em ascensão no mercado nacional, focadas em soluções para aplicações de IoT, uma vez que até então estas tecnologias de conectividade (como por exemplo LoRaWAN e NB-IoT) ainda não apresentam vantagens comerciais e práticas de aplicação.

# Referências

- 3GPP. *GPRS & EDGE*. 2021. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/102-gprs-edge>>.
- 3GPP. *LTE*. 2021. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>>.
- ASHTON, K. That "internet of things" thing. **RFiD Journal**, 2010.
- COLAKOVI, A. Internet of things (iot): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues. 2018.
- ESPRESSIF-SYSTEMS. **ESP32 DataSheet Version 3.6**. 2021. Disponível em: <[www.espressif.com](http://www.espressif.com)>.
- GARCIA, P. S. R.; KLEINSCHMIDT, J. H. Tecnologias emergentes de conectividade na iot: Estudo de redes lpwan. 2017.
- INGIZZA, C. "shazam da indústria": brasileira tractian conquista um aporte da y combinator. 2021. Disponível em: <<https://exame.com/pme/shazam-da-industria-brasileira-tractian-conquista-um-aporte-da-y-combinator/>>.
- LEE, I.; LEE, K. The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises. **Business Horizons**, v. 58, n. 4, p. 431–440, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681315000373>>.
- LEE, K. L. I. The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises. 2015.
- LORA-ALLIANCE. **What is LoRaWAN® Specification**. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lorawan>>.
- MANGALVEDHE, N.; RATASUK, R. Nb-iot deployment study for low power wide area cellular iot. 2016.
- MICHELINI, A. **Baterias Recarregáveis Para Equipamentos Portáteis**. 2017. Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/>>.
- MONTORI, F. et al. Machine-to-machine wireless communication technologies for the internet of things: Taxonomy, comparison and open issues. 2018.
- RAZA, U.; KULKARNI, P. Low power wide area networks: An overview. 2017.
- SIMCOM. **SIM800L Hardware Design V1.00**. 2013. Disponível em: <[www.sim.com/wm](http://www.sim.com/wm)>.
- STACHEWSKI, A. L. Startup cria “band-aid inteligente” que prevê falhas em equipamentos. 2021. Disponível em: <<https://revistapegn.globo.com/Startups/noticia/2020/06/startup-cria-band-aid-inteligente-que-preve-falhas-em-equipamentos.html>>.
- TRACTIAN. **Monitoramento de Máquinas TRACTIAN**. 2021. Disponível em: <<https://tractian.com/>>.