



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MAURI SARAIVA DOS SANTOS

**PLATAFORMA IIOT BASEADA EM MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO
DO CARREGAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS**

FORTALEZA

2023

MAURI SARAIVA DOS SANTOS

PLATAFORMA IIOT BASEADA EM MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO
DO CARREGAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S236p Santos, Mauri Saraiva dos.
Plataforma IIoT baseada em métodos computacionais para determinação do carregamento de motores elétricos / Mauri Saraiva dos Santos. – 2023.
117 f. : il.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.
1. Motores de indução trifásicos. 2. Análise não invasiva. 3. Eficiência energética. 4. Métodos numéricos. I. Título.

CDD 621.3

MAURI SARAIVA DOS SANTOS

PLATAFORMA IIOT BASEADA EM MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO
DO CARREGAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em: //

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes
(Examinados interno ao PPGEE)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar
(Examinados externo ao PPGEE)
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
(UFERSA)

Dedico este trabalho aos alunos e pesquisadores das mais diversas esferas do ensino.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus e Pai, que me concede misericórdia e graça por meio do meu Senhor Jesus Cristo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes, que, notoriamente, leva consigo o amor pela engenharia. Agradeço pela confiança, paciência e ensinamentos, durante o desenvolvimento da presente dissertação e outros trabalhos ao longo do curso de mestrado.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes e Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À minha mãe, Francisca Saraiva dos Santos e ao meu pai, Francisco dos Santos que me criaram com todo o cuidado e amor.

Agradeço ao meu irmão, Mauro Saraiva dos Santos. Devo a ele tudo que conquistei profissionalmente e academicamente.

Agradeço aos colegas do Departamento de Engenharia de Elétrica (DEE - UFC), Sérgio Júnior, Luana Albuquerque, Gabriel Fonseca e em especial aos meus amigos Raimundo Oliveira, Aparecida Falcão, Rafael Jucá, Rafael Sousa e Ailton Júnior por todas as vezes que me ajudaram durante o mestrado.

Ao Eduardo Henrique Sousa Paz, pelas contribuições e ajuda necessária para que este trabalho se tornasse uma realidade.

Ao meu amigo José Gleyson Costa de Oliveira por ter me dado conselhos que edificaram minha vida extraordinariamente nesse tempo.

Aos meus amigos e companheiros de graduação Vitor Dutra, Paulo Cirillo, Rubem Pacelli, Felipe Dadalto e Erinaldo Estefferson.

À Débora Ribeiro, por chegar e trazer um flúor especial para a minha vida.

Agradeço ao engenheiro David Mota, amigo e profissional exemplar.

A indústria TBM Têxtil, onde encontrei pessoas que me ajudaram a construir uma carreira profissional. Agradeço ao gerente de manutenção elétrica Jorge Manuel e aos técnicos de manutenção. Agradeço de forma especial aos meus supervisores e amigos, Alex Magalhães da Costa e Antônio Ronaldo Pereira, e ao meu amigo de trabalho, Antônio Leandro Barreto Gurgel, pessoas que tenho profunda admiração e respeito.

Ao Departamento de Engenharia de Teleinformática (DETI - UFC) e aos meus colegas de trabalho Renato Vasconcelos, Edson Bezerra, Philippe de Sousa e Daniel Marques. No DETI me foram proporcionadas as condições favoráveis ao término do meu mestrado.

Ao Departamento de Engenharia de Elétrica (DEE - UFC) e ao professores do programa de graduação e pós graduação.

Agradeço ao professor Wilkley Bezerra Correia chefe do Laboratório de Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ - UFC), que forneceu todo o suporte tecnológico que possibilitou a realização dos ensaios da presente dissertação.

Ao Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC), em especial aos pesquisadores Prof. Dr. José Tarcísio Costa, Dr. Manfredo Luiz Lins, Francisco Renan de Moura, Antônio Fernandes da Silva, Victor Hugo Silva, Jonatas Manoel Assunção.

"O dom do poder mental vem de Deus, o ser divino e se concentrarmos nossas mentes na verdade, ficamos em sintonia com este grande poder." (Nikola Tesla)

RESUMO

A busca por soluções sustentáveis e eficientes tem se destacado em diversos setores do cenário industrial, devido ao crescente interesse por práticas ambientalmente responsáveis. Nesse contexto, a eficiência energética surgiu como um fator fundamental na formação de uma indústria mais sustentável ambientalmente. Por outro lado, a abordagem da *Industrial Internet of Things* (IIoT) rendeu avanços substanciais no monitoramento e controle de processos industriais, incluindo análise do carregamento de motores elétricos trifásicos, que constituem uma parcela significativa do consumo de energia. No entanto, a implementação de sistemas de monitoramento em larga escala ainda encontra desafios relacionados aos custos associados aos dispositivos de medição convencionais. Nesta dissertação, é apresentada uma plataforma IIoT que oferece uma alternativa prática no levantamento de informações importantes no campo da eficiência energética de Motor de Indução Trifásico (MIT) em operação. A plataforma permite a análise contínua e não invasiva do carregamento de processos motrizes industriais, reduzindo a necessidade de paradas por intervenções não programadas. Os resultados demonstraram que a plataforma atingiu com sucesso os objetivos propostos, integrando os dispositivos de *hardware*, a *Application Programming Interface* (API) de acesso livre desenvolvida no *Node-Red* e o *script* executável MATLAB[®] usando o *message broker Cloud MQTT*. A plataforma foi utilizada para comparar as curvas de carregamento estratificadas por meio de ensaios de bancada com os carregamentos estimados pelos métodos da linearização e pelos métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson, aplicados a dois motores com potência de 1,5 cv e 10 cv, mostrando que os métodos numéricos iterativos produziram resultados com erros percentuais abaixo de 10% para os valores de carregamento compreendidos entre 75% e 150% nos dois MITs, destacando-se em relação ao método de linearização da corrente. Conclui-se que a plataforma IIoT desenvolvida alcançou os objetivos desta dissertação, apresentando uma solução para análise do carregamento do MIT em tempo real, com baixo custo e não invasiva.

Palavras-chave: Motores de indução trifásicos; Análise não invasiva; Eficiência energética; Métodos numéricos; IIoT.

ABSTRACT

The quest for sustainable and efficient solutions has taken precedence across various sectors within the industrial landscape, owing to the burgeoning interest in environmentally responsible practices. Within this context, energy efficiency has emerged as a pivotal factor in shaping of a more environmentally sustainable industry. On the other hand, the Industrial Internet of Things (IIoT) approach has yielded substantial strides in monitoring and controlling industrial processes, including load analysis on three-phase electric motors, which constitute a significant portion of energy consumption. Nonetheless, implementing large-scale monitoring systems still encounters challenges linked to the costs associated with conventional measuring devices. In this dissertation, an IIoT platform is presented that offers a practical alternative in gathering important information in the field of energy efficiency of Three-Phase Induction Motor (3-phase IM) in operation. The platform allows continuous and non-invasive analysis of the loading of industrial driving processes, reducing the need for stops due to unscheduled interventions. The results demonstrated that the platform successfully achieved the proposed objectives, integrating hardware devices, the freely accessible Application Programming Interface (API) developed in Node-Red and the MATLAB[®] executable script using the Cloud MQTT message broker. The platform was used to compare the load curves stratified through bench tests with the loads estimated by the linearization methods and by the Gauss-Seidel and Newton-Raphson methods, applied to two engines with a power of 1.5 hp and 10 hp, showing that the iterative numerical methods produced results with percentage errors below 10% for loading values between 75% and 150% in the two 3-phase IMs, standing out in relation to the current linearization method. It is concluded that the IIoT platform developed achieved the objectives of this dissertation, presenting a solution for analyzing 3-phase IM load in real time, with low cost and non-invasive.

Keywords: Three-phase induction motors; Non-invasive analysis; Energy efficiency; Numerical methods; IIoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução dos motores elétricos	23
Figura 2 – Vista explodida de um motor de indução trifásico	24
Figura 3 – Curva típica do conjugado em relação a rotação/escorregamento de um MIT	27
Figura 4 – Placa de identificação	28
Figura 5 – Circuito equivalente monofásico do MIT	37
Figura 6 – Diagrama de fluxo de potência do MIT	37
Figura 7 – Motor de 1,5 cv	49
Figura 8 – Motor de 10 cv	50
Figura 9 – Fluxograma do algoritmo de Gauss-Seidel utilizado	53
Figura 10 – Fluxograma do algoritmo de Newton-Raphson utilizado	58
Figura 11 – Interação dos recursos tecnológicos que compõem plataforma IIoT	67
Figura 12 – Modelo de publicação e assinatura do MQTT para dispositivos de IIoT	68
Figura 13 – Dispositivos roteador e analisador	69
Figura 14 – Ambiente de desenvolvimento da aplicação	72
Figura 15 – Tela de início (inserção de dados)	73
Figura 16 – Tela do carregamento segundo o método de linearização da corrente	73
Figura 17 – Tela do carregamento segundo os métodos numéricos	74
Figura 18 – Tela de leitura das correntes	75
Figura 19 – Tela de leitura da intensidade do sinal RSSI	75
Figura 20 – Tela de percentagem de carga da bateria	76
Figura 21 – Grupo de cardas	76
Figura 22 – Painel elétrico da carda onde foi instalado o dispositivo analisador	77
Figura 23 – Indicação de intensidade do sinal recebido em um dado ponto	78
Figura 24 – Gráfico de contorno RSSI da planta baixa (em dBm) com o maquinário têxtil em funcionamento	79
Figura 25 – Plotagem da superfície RSSI da planta baixa (em dBm) com indicação do ponto de emissão do sinal LoRa	79
Figura 26 – Comparação das curvas de Carregamento <i>versus</i> Corrente entre os métodos aplicados ao motor de 1,5 cv	80

Figura 27 – Comparação das curvas de Carregamento <i>versus</i> Corrente entre os métodos aplicados ao motor de 10 cv	81
Figura 28 – Comparação do erro percentual entre os métodos aplicados ao motor de 1,5 cv	82
Figura 29 – Comparação do erro percentual entre os métodos aplicados ao motor de 10 cv	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Menores valores de rendimento nominal a plena carga para motores da classe IR2.	33
Tabela 2 – Menores valores de rendimento nominal a plena carga para motores da classe IR3.	34
Tabela 3 – Dados do motor de 1,5 cv	49
Tabela 4 – Dados do motor de 10 cv	50
Tabela 5 – Relação entre as reatâncias de dispersão X_1 e X_2 segundo a classe de projeto do MIT	52
Tabela 6 – Resultados com Gauss-Seidel para os parâmetros nos MITs	60
Tabela 7 – Erro percentual pelo método de Gauss-Seidel nos MITs	61
Tabela 8 – Resultados com o Newton-Raphson para os parâmetros nos MITs	61
Tabela 9 – Erro percentual pelo método de Newton-Raphson nos MITs	61
Tabela 10 – Análise de custo do protótipo	80
Tabela 11 – Erro percentual para os carregamentos observados segundo cada método aplicado ao MIT de 1,5 cv	83
Tabela 12 – Erro percentual para os carregamentos observados segundo cada método aplicado ao MIT de 10 cv	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEG	<i>Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft</i>
AIEE	<i>American Institute of Electrical Engineers</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
CE	Circuito Equivalente
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
CNI	Confederação Nacional da Indústria
cv	cavalo-vapor
fmm	força magnetomotriz
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT	<i>Internet of Things</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LoRaWAN [®]	<i>Long Range Wide Area Network</i>
MCT	Ministérios da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC	Ministérios da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MIT	Motor de Indução Trifásico
MME	Ministérios de Minas e Energia
MQTT	<i>MQ Telemetry Transport</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
TC	Transformador de Corrente
WCNPS	<i>Workshop on Communication Networks and Power Systems</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Frequência da fonte de tensão trifásica, em Hz
f_p	Fator de potência
I_n	Corrente nominal, em A
$M1$	Máquina 1 do método C de determinação de eficiência da IEEE Std 112-2017 (2017)
$M2$	Máquina 2 do método C de determinação de eficiência da IEEE Std 112-2017 (2017)
n_r	Velocidade do rotor, em rpm
n_s	Velocidade síncrona, em rpm
p	Número de polos do MIT
P_{mec}	Potência mecânica de saída, em W
P_n	Potência nominal, em cv
s	Escorregamento percentual
T_{mec}	Conjugado, em Nm
ω_{mec}	Velocidade mecânica angular, em rad/s

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	20
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	20
1.3	Organização da Dissertação	20
1.4	Produção Científica	21
2	O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	22
2.1	Evolução do motor de indução	22
2.2	Aspectos construtivos	23
2.2.1	<i>O estator do MIT</i>	24
2.2.2	<i>O rotor do MIT</i>	25
2.2.3	<i>As demais partes construtivas</i>	25
2.3	Princípio de funcionamento	26
2.4	Dados nominais	28
2.4.1	<i>Potência nominal de saída</i>	29
2.4.2	<i>Tensão nominal</i>	29
2.4.3	<i>Corrente nominal</i>	29
2.4.4	<i>Fator de potência</i>	30
2.4.5	<i>Velocidade</i>	30
2.4.6	<i>Rendimento nominal</i>	31
2.4.7	<i>Classe de projeto</i>	31
2.4.8	<i>Código de partida</i>	31
2.4.9	<i>Carregamento</i>	32
2.5	Índices mínimos de rendimento (MEPS)	32
2.5.1	<i>Classe de rendimento IR2</i>	32
2.5.2	<i>Classes de rendimento IR3 ou rendimento Premium</i>	33
2.5.3	<i>Programa de metas para motores elétricos trifásicos</i>	33
2.6	Circuito equivalente e seus parâmetros	35
2.6.1	<i>Perdas no MIT</i>	37

2.6.2	<i>Métodos normativos para determinação dos parâmetros do MIT</i>	39
2.6.2.1	<i>Método A</i>	39
2.6.2.2	<i>Método B</i>	40
2.6.2.3	<i>Método B1</i>	40
2.6.2.4	<i>Método C</i>	40
2.6.2.5	<i>Método E ou E1</i>	41
2.6.2.6	<i>Método F ou F1</i>	41
2.7	Considerações finais	41
3	MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	43
3.1	Métodos numéricos iterativos	44
3.2	Modelagem matemática dos métodos	45
3.2.1	<i>Gauss-Seidel</i>	45
3.2.2	<i>Newton-Raphson</i>	46
3.3	Aplicação dos métodos numéricos para obtenção dos parâmetros do MIT 47	
3.3.1	<i>Os MITs analisados</i>	48
3.3.2	<i>Aplicação de Gauss-Seidel para obtenção dos parâmetros do MIT</i>	50
3.3.3	<i>Aplicação de Newton-Raphson para obtenção dos parâmetros do MIT</i>	55
3.4	Esforço computacional	59
3.5	Resultados e discussões	60
4	PLATAFORMA IIOT NÃO INVASIVA PARA MONITORAMENTO DE MIT	63
4.1	IIoT	63
4.1.1	<i>Aplicações de IIoT</i>	63
4.1.2	<i>IIoT e recursos de Cloud</i>	64
4.1.3	<i>IIoT e sistemas não invasivos</i>	65
4.1.4	<i>Desafios para a implementação de IIoT</i>	65
4.2	Descrições da plataforma IIoT proposta	66
4.2.1	<i>O Cloud MQTT</i>	68
4.2.2	<i>Os dispositivos de hardware</i>	69
4.2.3	<i>O script MATLAB</i>	70
4.2.4	<i>A API no Node-Red</i>	71
4.2.4.1	<i>O Node-Red</i>	71

4.2.4.2	<i>Telas da API</i>	72
4.2.5	<i>Teste de comunicação e funcionalidade em ambiente industrial</i>	76
4.2.6	<i>Análise de custo simplificado</i>	79
4.3	Resultados experimentais	80
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	85
5.1	Trabalhos futuros	86
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A –SCRIPT EXECUTÁVEL MATLAB	92
	APÊNDICE B –PLANTA BAIXA DA ÁREA ONDE FOI REALIZADO O TESTE DE ENLACE DE COMUNICAÇÃO	99
	APÊNDICE C –SCRIPT DA COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE CAR- REGAMENTO ENTRE OS MÉTODOS PARA O MOTOR DE 1,5 CV	101
	APÊNDICE D –SCRIPT DA COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE CAR- REGAMENTO ENTRE OS MÉTODOS PARA O MOTOR DE 10 CV	105
	APÊNDICE E –DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DISPOSITIVO ANALISA- DOR	109
	APÊNDICE F –DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DISPOSITIVO ROTEADOR 111	
	ANEXO A –DATASHEET WIFI LORA 32	113

1 INTRODUÇÃO

Motores elétricos desempenham um papel fundamental nos processos produtivos de diversas indústrias como: alimentícia, automobilística, química, farmacêutica, têxtil, de mineração, entre outras. Sua versatilidade se deve à capacidade de acionar cargas mecânicas importantes, tais como ventiladores, bombas hidráulicas, compressores de ar e outros equipamentos industriais. Em outras palavras, eles são responsáveis por movimentar a indústria (WEG, 2019c).

A máquina de indução, em suas diversas aplicações, experimenta uma pequena variação na velocidade do rotor com a variação da carga, de maneira que "as perdas rotacionais (que são função da velocidade e da frequência) são praticamente constantes, já as perdas elétricas na resistência ôhmica dos enrolamentos do rotor e do estator, são função da carga e variam com o quadrado da corrente" (BIM, 2018).

No Motor de Indução Trifásico (MIT), assim como em qualquer conversor eletromecânico de energia, a potência elétrica de entrada, solicitada da rede de alimentação, é igual à potência mecânica de saída, entregue à carga, mais as perdas inerentes ao processo. E apesar de serem dispositivos intrinsecamente eficientes, os motores de indução trifásicos apresentam um grande potencial para a conservação de energia, quando ações de eficiência energética são realizadas na indústria (BORTONI; SANTOS, 2006).

O potencial de conservação de energia nos MITs é evidenciado no Brasil, pois as indústrias demandam 37,3% da oferta interna de energia elétrica (EPE, 2023) e os motores elétricos consomem 68% da energia do setor industrial (WEG, 2019a). Considerando o percentual de consumo de energia elétrica pelos sistemas motrizes industriais, assim como os efeitos causados pela potência convertida em calor, é fundamental que haja um monitoramento para análise de parâmetros os quais sejam indicadores do rendimento das máquinas. Dessa forma, poderão ser tomadas decisões a respeito da ótima operação do conjunto motor-carga (BHAVSAR; PATEL, 2013).

Os instrumentos que monitoram as principais grandezas elétricas do MIT servem para a obtenção de indicadores de qualidade e rendimento dos motores elétricos em operação na indústria. As análises de tais indicadores subsidiam importantes intervenções em problemas de especificações técnicas e/ou econômicas. Equipamentos que se alinhem aos conceitos de Indústria 4.0 e não invasivos simplificam a obtenção dos dados e reduzem os custos inerentes ao monitoramentos das máquinas (SANTOS *et al.*, 2022).

1.1 Justificativa

A potência elétrica solicitada pelo MIT é igual à potência mecânica de saída entregue à carga, somando-se as perdas inerentes ao processo. E mesmo sendo dispositivos intrinsecamente eficientes, os MITs constituem um grande potencial de conservação de energia quando ações de eficiência energética são implementadas em uma indústria. Esse fenômeno pode ser explicado por duas razões principais: a grande quantidade de unidades instaladas e as aplicações que exigem uma análise cuidadosa para a especificação adequada do motor em relação à sua carga (BORTONI; SANTOS, 2006).

Também, assim como qualquer outro equipamento industrial, o MIT requer manutenção periódica para garantir o bom funcionamento evitando falhas que provoquem interrupções não programadas e, por consequência, parada total ou parcial do processo no qual a máquina estiver sendo empregada, o que pode acarretar em perda de produção e de dinheiro (LU *et al.*, 2006). Acompanhar a situação dos parâmetros do MIT torna-se uma estratégia de manutenção, uma vez que estes parâmetros estão diretamente relacionados às características de funcionamento da máquina (SABHARWAL, 2006).

No 8º Congresso Brasileiro de Inovação da Indústria, realizado em junho de 2019 pelo Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) e pela Confederação Nacional da Indústria (CNI), os expositores e participantes foram unânimes em reconhecer a influência da Indústria 4.0 como forma de tornar o setor industrial mais eficiente. Nesse contexto, os sistemas de aquisição e geração de dados em tempo real proporcionam o aumento da eficiência, reduzindo paradas indesejadas e melhorando o controle sobre os recursos, como energia elétrica (WEG, 2019a).

Com base nas informações apresentadas, a avaliação das reais condições de carregamento deve ser feita a partir da obtenção das características de operação dos motores elétricos. Tais características são representadas por um conjunto de grandezas elétricas, mecânicas e térmicas (BORTONI; SANTOS, 2006), e pelos parâmetros do Circuito Equivalente (CE) do MIT usados para determinar uma variedade de características em regime permanente que apresentam o comportamento do motor sob as condições de operação (UMANS, 2014).

IEEE Std 112-2017 (2017) estabelece métodos para os testes amplamente aplicáveis e aceitos para determinar o desempenho e as características dos parâmetros do CE, abrangendo uma ampla gama de tamanhos de motores e geradores. Esta norma define

as técnicas e os instrumentos necessários para realizar os testes com objetivo de determinar o rendimento, além de apresentar os procedimentos para coleta de dados e cálculos subsequentes incluindo informações sobre os requisitos de precisão dos instrumentos de medição, a calibração necessária e a incerteza associada aos resultados dos ensaios apresentados. Os instrumentos usados nos métodos estabelecidos interrompem os processos produtivos da máquina em análise para fazer conexões elétricas e/ou mecânicas.

Com o objetivo de tornar a análise de sistemas motrizes acessível para os vários seguimentos industriais, justifica-se o desenvolvimento de uma plataforma *Industrial Internet of Things* (IIoT) para o monitoramento de motores elétricos.

Uma plataforma que utilize tecnologias de baixo custo, não invasiva, em nuvem, robusta e que permita visualização dos dados de maneira simples e remota, possibilita a análise de máquinas em larga escala, isto é, na grande quantidade de motores instalados na indústria, viabilizando o diagnóstico de possíveis aplicações que mereçam adequações dos acionamentos (SANTOS *et al.*, 2022).

A transformação digital da Indústria 4.0 resulta em uma sistemática de máquinas e sensores inteligentes, computadores, métodos de comunicação e processamento de dados; essa integração permite que algoritmos e seus equacionamentos sejam resolvidos em tempo real com recursos computacionais sob demanda, geralmente, de forma remota, e também confirma a tendência emergente que visam a consolidação de plataformas IIoT (ALABADI *et al.*, 2022).

Alinhando-se aos conceitos de conectividade, disponibilidade, computação em nuvem, aquisição e processamento de dados, comunicação sem fio entre dispositivos móveis, manufatura e gerenciamento de energia a proposta de elaboração da plataforma para determinação do carregamento dos motores elétricos por meio de métodos numéricos segue os princípios de IIoT (MADAKAM *et al.*, 2015).

1.2 Objetivos

Com a descrição do problema e motivação já definidas, nesta seção faz-se a exposição dos objetivos a serem atingidos na presente dissertação.

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma plataforma IIoT para determinação do carregamento dos motores elétricos trifásicos, de forma não invasiva e com baixo custo, segundo os parâmetros do CE calculados por meio dos métodos numéricos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson, integrando os algoritmos destes métodos em uma *Application Programming Interface* (API), de modo que os operadores desta plataforma possam realizar análises pertinentes ao desempenho da máquina com visualização online por meio de dispositivos móveis.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos da presente dissertação estão listados a seguir:

- a) Instanciar uma API usando o *Node-Red* hospedado em um servidor de aplicação;
- b) Instanciar um *script* que compile os algoritmos dos métodos numéricos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson para determinação dos parâmetros do CE e carregamento de motores elétricos usando o MATLAB[®] em um servidor de aplicação;
- c) Utilizar os dispositivos analisador e roteador para a aquisição de dados junto ao MIT em análise;
- d) Implementar a comunicação entre os dispositivos analisador e roteador usando protocolo *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN[®]);
- e) Implementar a comunicação entre o dispositivo roteador, a API desenvolvida no *Node-Red* e o *script* MATLAB[®] usando um *message broker MQ Telemetry Transport* (MQTT);
- f) Comparar os dados de carregamento segundo o método da linearização da corrente e métodos iterativos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson por meio dos valores estimados dos parâmetros do CE mostrados na API.

1.3 *Organização da Dissertação*

A organização do restante desta dissertação é realizada como descrito a seguir: No Capítulo 2, apresenta-se o histórico de evolução, os aspectos construtivos,

o funcionamento, o CE do MIT de rotor gaiola de esquilo abordando a distribuição das perdas em operação à luz do fluxo de potência no MIT. Este capítulo também faz uma breve descrição sobre os índices mínimos de rendimento e os métodos normativos para determinação dos parâmetros do CE.

No Capítulo 3, é destinado aos fundamentos relacionados aos métodos numéricos, expõe-se um histórico de métodos para determinação dos parâmetros do MIT, e também apresenta uma metodologia própria que utiliza das equações do CE do MIT e dos métodos de Gauss-Seidel e de Newton-Raphson para determinar os parâmetros do CE. São apresentados os algoritmos propostos, na forma de fluxogramas e os resultados gerais destes algoritmos implementados no MATLAB[®] utilizando dois MITs reais, de 1,5 cv e 10 cv assim como uma análise dos resultados obtidos.

No Capítulo 4, apresenta-se o conceito de IIoT, suas aplicações e desafios inerentes que a acompanham. Apresenta-se cada um dos recursos tecnológicos usados na plataforma IIoT desenvolvida, suas características e suas funcionalidades, bem como as ferramentas de *software* para análise e visualização do carregamento dos MITs. É apresentado um teste de comunicação e funcionalidade em ambiente industrial. E são expostos os resultados obtidos por meio da comparação das curvas de carregamento pelos três métodos abordados.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas com o presente trabalho, bem como um direcionamento para possíveis trabalhos futuros.

1.4 Produção Científica

Durante o curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, o autor desta dissertação participou como autor do seguinte artigo científico:

1. M. S. Santos, E. H. Paz, V. B. Aguiar and R. T. Pontes, Non-invasive monitoring system for analysis of energy efficiency of three-phase induction motors. Trabalho publicado/aceito em anais do 2022 *Workshop on Communication Networks and Power Systems* (WCNPS). Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9969741>>.

2 O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os motores de indução são compostos, basicamente, pelo estator, parte estacionária que aloja o grupo de enrolamentos que recebem a alimentação; e o rotor (em sua maioria, do tipo gaiola de esquilo), parte rotativa onde serão induzidas as correntes a partir do campo girante do estator. Esse tipo de construção resulta em motores que são relativamente baratos, com alta confiabilidade e baixo custo de manutenção, fatores esses que contribuem à sua popularidade e ampla aplicação (UMANS, 2014).

Em virtude da indução no rotor de uma tensão alternada, a máquina de indução é classificada como de dupla excitação, capaz de produzir conjugado para qualquer velocidade diferente da velocidade síncrona (BIM, 2018).

2.1 Evolução do motor de indução

Durante o final da década de 1880, o engenheiro iugoslavo, Nikola Tesla, desenvolveu os conceitos elementares do motor de indução; em 1888, apresentou um artigo para o *American Institute of Electrical Engineers* (AIEE) – antecessor do atual *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) –, no qual descreve os princípios básicos do motor de indução de rotor bobinado, juntamente com ideias para outros dois importantes motores de Corrente Alternada (CA) – o motor síncrono e o motor de relutância –, recebendo uma patente por suas ideias (CHAPMAN, 2013).

Apesar das ideias básicas terem sido descritas em 1888, o motor de indução tomou uma forma reconhecida e moderna entre 1888 e 1895, quando, em 1889, o engenheiro eletricitista russo, Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky, da empresa *Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft* (AEG), insistindo no estudo de motores CA, entrou com pedido de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola. Esse motor era simples, silencioso, de alta segurança na operação e necessitava de menos manutenção comparados aos motores de Corrente Contínua (CC) já existentes. Em 1891, Dolivo-Dobrovolsky deu início a fabricação em série de motores de indução, nas potências de 0,4 a 7,5 kW (SENS, 2001).

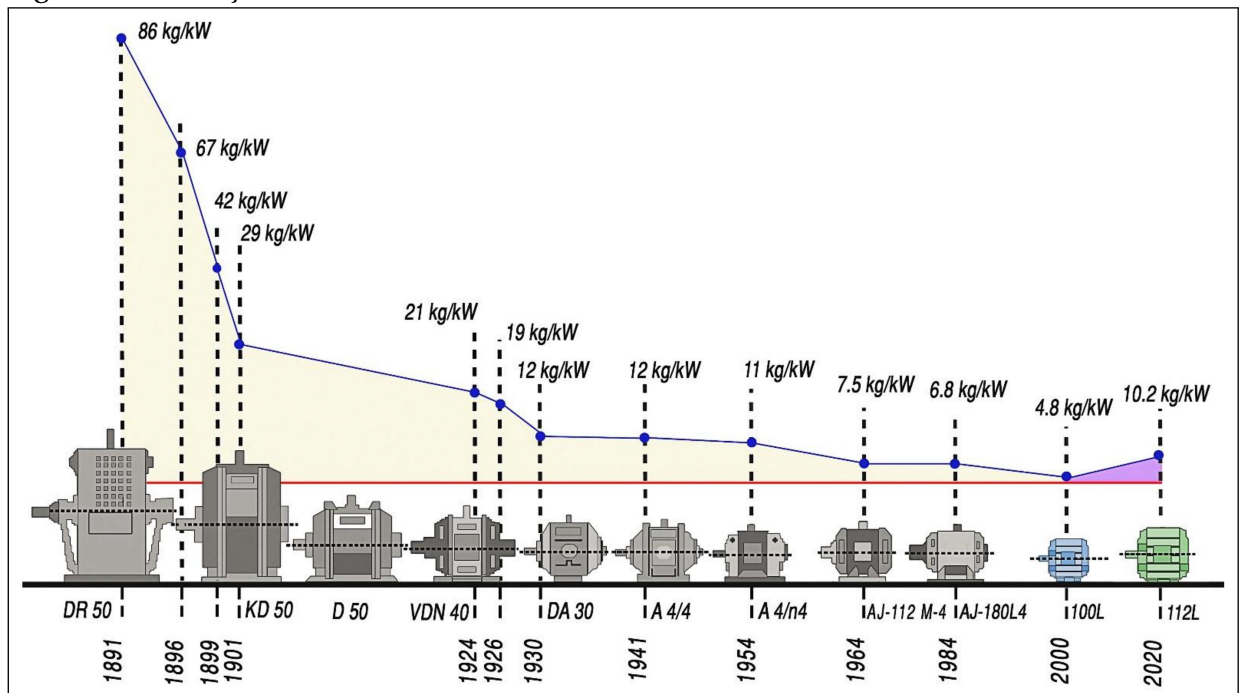
Por volta de 1896, o MIT já estava disponível comercialmente. Entre 1896 e o início da década de 1970, houve constantes melhoras na qualidade dos aços; quantidade de cobre usada nos enrolamentos de estator; nas técnicas de fundição e laminação; na isolamento e nas características construtivas usadas nos motores de indução, resultando em

um motor menor para uma dada potência de saída, possibilitando uma economia relevante nos custos de fabricação. Porém, o esforço de projeto foi orientado apenas na redução do custo material das máquinas, visto que a eletricidade era de custo tão baixo que o critério principal de seleção adotado pelos compradores se tornou o custo do motor. No entanto, desde que o custo do petróleo iniciou sua ascensão em 1973, os custos operacionais das máquinas, durante a sua vida útil, tornaram-se mais significativos que o custo inicial de instalação; como resultado dessa nova tendência, a ênfase se voltou para a eficiência do motor (CHAPMAN, 2013).

Atualmente, os fabricantes mais importantes de motores elétricos já produzem novas linhas de MITs de alto rendimento, recorrendo ao aumento do preenchimento das ranhuras no estator.

Os desenvolvimentos e melhorias nos motores elétricos são notórios, principalmente, na relação peso-potência ao longo do tempo, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Evolução dos motores elétricos



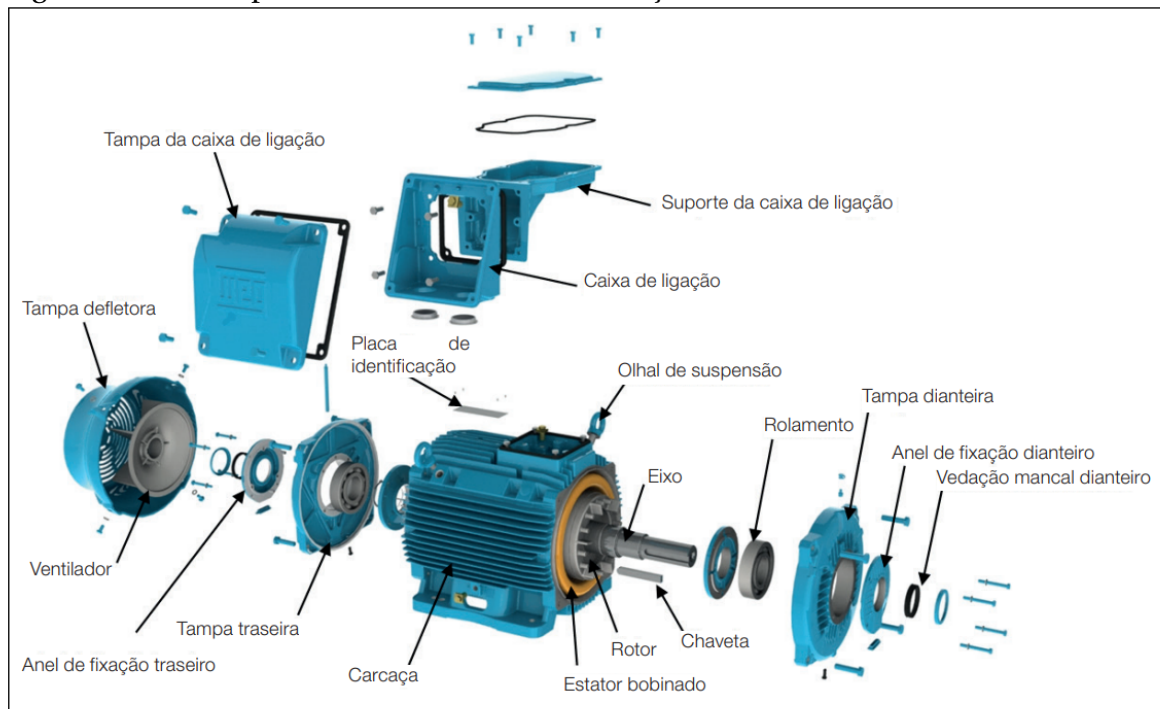
Fonte: Souza *et al.* (2022).

2.2 Aspectos construtivos

De acordo com Umans (2014), por ser composto basicamente por uma parte estacionária (estator) e uma parte girante (rotor), o MIT tem vantagem no aspecto constru-

tivo quando comparado com os motores elétricos CC e síncronos, visto que não faz uso de comutador e escovas; além disso, no caso do MIT de rotor gaiola de esquilo, não faz uso de anéis coletores e escovas no rotor e o estator respectivamente. A Figura 2 mostra uma vista explodida de um MIT.

Figura 2 – Vista explodida de um motor de indução trifásico



Fonte: WEG (2019b).

A seguir serão abordadas as partes principais, com ênfase nos detalhes construtivos do MIT de rotor gaiola de esquilo.

2.2.1 O estator do MIT

É formado fundamentalmente por enrolamentos trifásicos alojados em ranhuras na periferia interna próximo ao entreferro e protegidos por uma carcaça metálica (OLIVEIRA, 2009).

O enrolamento trifásico consiste de três conjuntos de bobinas idênticas, de material condutor isolado ligado à rede trifásica de alimentação (ANDRADE, 2009). A disposição dos três conjuntos de bobinas, cujos eixos estão espaçados de 120° no núcleo, define o número pares de polos do motor (UMANS, 2014).

A carcaça é a estrutura que dá suporte e proteção às partes fixas e móveis do motor; tem construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado; resistente à

corrosão e, normalmente, com aletas na parte externa para facilitar a troca de calor entre o motor e o meio externo (ANDRADE, 2009).

2.2.2 O rotor do MIT

É formado pelo eixo fixo ao núcleo laminado onde estão as barras condutoras curto-circuitadas por anéis terminais (UMANS, 2014).

O eixo, normalmente, é feito de aço-carbono, tratado termicamente para suportar os esforços da transferência de potência mecânica desenvolvida pelo motor para a carga a ser acionada; está localizado no centro do núcleo do rotor. Em uma de suas extremidades pode ser acoplado o ventilador, enquanto a outra extremidade é destinada à transferência de potência mecânica para a carga (OLIVEIRA, 2009).

Assim como o núcleo do estator, o núcleo do rotor é formado por um agrupamento de chapas de aço magnético e suas ranhuras alojam as barras condutoras (UMANS, 2014). As barras condutoras têm seção reta larga; geralmente de alumínio injetado nas ranhuras do núcleo do rotor; são unidas pelos anéis de curto-circuito que são feitos do mesmo material (OLIVEIRA, 2009).

2.2.3 As demais partes construtivas

Além do estator e do rotor, o MIT apresenta componentes importantes na proteção térmica; contra a penetração de objetos estranhos e contra o acesso às partes perigosas, como partes energizadas. Esses componentes são: caixa de ligação, tampas e ventilador.

A caixa de ligação é o local por onde o motor recebe alimentação da rede elétrica; é feita do mesmo material da carcaça e precisa ser protegida de agentes externos, principalmente, por questões de segurança e umidade (OLIVEIRA, 2009).

As tampas presentes no motor são: dianteira, traseira e defletora. A tampa defletora permite a passagem do ar para o ventilador, possibilitando melhor ventilação sobre as aletas da carcaça; as duas tampas, dianteira e traseira, dão suporte para os rolamentos que sustentarão o eixo do rotor. As tampas dianteira e traseira são, geralmente, feitas do mesmo material da carcaça, enquanto a defletora é normalmente de alumínio (OLIVEIRA, 2009).

O ventilador é responsável por resfriar as aletas da carcaça do motor; é protegido pela tampa defletora e precisa dela para seu correto funcionamento; o material mais usado

para sua confecção é o plástico (OLIVEIRA, 2009).

2.3 Princípio de funcionamento

Se dois campos magnéticos estiverem presentes em uma máquina, um conjugado será criado que tenderá a alinhar os dois campos magnéticos. Se um campo magnético for produzido pelo estator de uma máquina CA e o outro for produzido pelo rotor da máquina, então um conjugado será induzido no rotor que fará o rotor girar e se alinhar com o campo magnético do estator. Se houvesse um modo de fazer o campo magnético do estator girar, o conjugado induzido no rotor faria com que ele “perseguisse” constantemente o campo magnético do estator em um círculo. Esse é, em poucas palavras, o princípio básico do funcionamento de todos os motores CA (CHAPMAN, 2013).

Entre os conceitos fundamentais a se entender sobre o funcionamento do MIT estão: o fenômeno do campo eletromagnético girante; as correntes induzidas no rotor a partir do campo girante do estator e o conjugado eletromecânico produzido no rotor (UMANS, 2014).

O sistema de geração, transmissão e utilização de energia elétrica emprega fontes de tensão que consistem, geralmente, em três tensões senoidais basicamente iguais em módulo e deslocadas entre si por ângulos de fase de 120° (UMANS, 2014); assim, possibilita-se o surgimento de três correntes trifásicas, todas de mesma intensidade e defasadas de 120° entre si no tempo; estas circulam no enrolamento trifásico do estator, cujos eixos estão espaçados entre si de 120° no espaço, produzindo um campo magnético girante de intensidade constante (CHAPMAN, 2013).

A circulação de correntes induzidas no rotor reage com o campo girante do estator, produzindo conjugado eletromagnético (UMANS, 2014); o conjugado é produzido pela interação dos campos magnéticos dos enrolamentos do estator e do rotor, podendo ser explicado como a tendência que esses campos têm de se alinhar, do mesmo modo que ímãs permanentes tendem a se alinhar.

A velocidade de rotação do rotor, e conseqüentemente do seu eixo, depende da velocidade de rotação do campo girante do estator e do conceito de escorregamento do motor; a velocidade de rotação do campo girante do estator, chamada de velocidade síncrona do motor, depende do número de polos do motor e da frequência da fonte de tensão trifásica que o alimenta (WEG, 2020), conforme apresenta a Equação 2.1,

$$n_s = \frac{120f}{p}, \quad (2.1)$$

em que, n_s é a velocidade síncrona, em rpm; f é a frequência da fonte de tensão trifásica, em Hz; p é o número de polos do MIT.

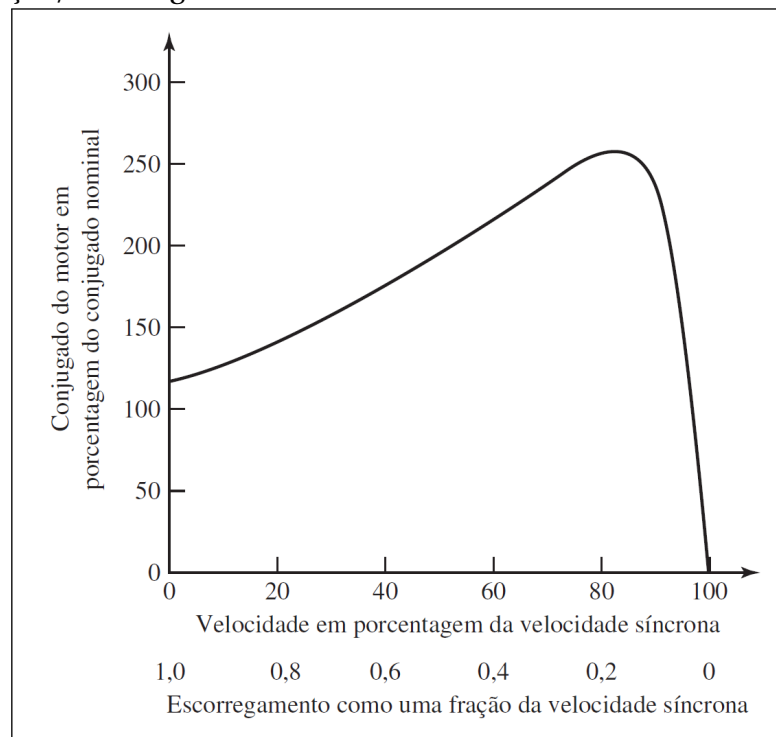
O escorregamento normalmente é expresso como uma porcentagem da velocidade síncrona; é a diferença entre a velocidade síncrona do campo girante do estator e a velocidade real na qual o rotor gira (BIM, 2018), sendo determinado pela Equação 2.2,

$$s = 100\% \frac{n_s - n_r}{n_s}, \quad (2.2)$$

em que, s é o escorregamento percentual e n_r é a velocidade do rotor, em rpm.

O conjugado do MIT aumenta com o incremento do escorregamento até um valor máximo e então diminui, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Curva típica do conjugado em relação a rotação/escorregamento de um MIT



Fonte: Umans (2014).

Do ponto de vista matemático, o escorregamento é uma variável importante na modelagem do CE do MIT; do ponto de vista funcional, é um fenômeno necessário para que seja produzido conjugado no MIT (BIM, 2018).

2.4 Dados nominais







Ao conhecer as informações do sistema de alimentação e da carga a ser acionada, é possível dimensionar uma máquina para dada aplicação; após o dimensionamento, é necessário especificar o MIT, relacionando as características da máquina dimensionada com as características nominais dos motores fabricados comercialmente.

As características nominais são os valores das grandezas elétricas, mecânicas e térmicas que, em regime permanente de funcionamento e/ou na partida, o MIT experimenta o aquecimento máximo aceitável nos seus enrolamentos, haja vista que a temperatura, em produtos eletromecânicos, é frequentemente o fator predominante para o envelhecimento do material isolante e do sistema de isolamento.

Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil da isolamento do enrolamento. Esta é afetada por muitos fatores, como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é, sem dúvida, a temperatura suportada pelos materiais isolantes empregados. (WEG, 2020).

A placa de identificação, como ilustra a Figura 4, contém as informações que descrevem as características construtivas, bem como os valores nominais das grandezas elétricas e mecânicas para o desempenho ótimo do MIT; esses dados são obtidos a partir de ensaios de carregamento nominal realizados pelo fabricante do motor.

Figura 4 – Placa de identificação

W22 Premium		CE EAC		UL Energy Efficient		IEC 60034-1			
3 ~ 315S/M-04		IP55	INS	CL. F	ΔT 80 K	S1	SF 1.00	AMB 40°C	
V	Hz	kW	RPM	A		PF	IE code	100% 75% 50%	
380 Δ / 660 Υ	50	185	1490	340 / 196	0.86	IE3	96.0	96.0	95.8
400 Δ / 690 Υ	60	185	1490	327 / 190	0.85		96.0	96.1	95.5
415 Δ / -			1490	323 / -	0.83		96.2	95.8	94.8
460 Δ / -			1790	287 / -	0.84				
 6319-C3(45g)  6316-C3(34g) MOBIL POLYREX EM 11000 h	 		 		NEMA Eff 96.2% 250HP 460 V 60Hz 1790 RPM 287 A PF 0.84 Des A Code J SF 1.15 CC029A		Alt 1000 m.a.s.l. 1193kg		

Fonte: WEG (2019b).

Para Chapman (2013), as características nominais mais importantes presentes na placa são: potência de saída; tensão nominal; corrente nominal; fator de potência; velocidade; rendimento nominal; classe de projeto *National Electrical Manufacturers Association*

(NEMA) ou categoria de conjugado da IEC 60034-1 (2022) e da ABNT NBR 17094 (2018) e o código de partida. A seguir é explicado cada item mencionado.

2.4.1 Potência nominal de saída

Umans (2014) descreve a potência mecânica de saída como o produto da força e da velocidade; o conceito permanece em sistemas girantes, sendo a potência mecânica o produto do conjugado pela velocidade mecânica angular, como mostra a Equação 2.3,

$$P_{mec} = T_{mec} \omega_{mec}, \quad (2.3)$$

em que, P_{mec} é a potência mecânica de saída, em W; T_{mec} é o conjugado, em Nm; ω_{mec} é a velocidade mecânica angular, em rad/s .

A potência nominal é a força que o motor pode fornecer no eixo, em regime contínuo, sem que os limites de temperatura dos enrolamentos sejam excedidos aos valores máximos permitidos, dentro de sua classe de isolamento (MAMEDE, 2017).

2.4.2 Tensão nominal

Conforme WEG (2020), tensão nominal é a tensão para a qual o MIT foi projetado, sendo que, na maioria dos projetos, os motores fornecem diferentes tipos de ligação, podendo funcionar em redes de pelo menos duas tensões diferentes.

Dependendo da maneira como são conectados os terminais dos enrolamentos do estator, MIT pode ser ligado aos níveis de tensão mais utilizados nas instalações elétricas industriais, isto é: 220, 380 e 440 V. Quando o motor é especificado para operar em tensões múltiplas (por exemplo, 220/380/440 V), a menor tensão (no caso, 220 V) é a tensão nominal de fase em cada enrolamento do motor (MAMEDE, 2017).

2.4.3 Corrente nominal

É aquela demandada da rede elétrica de alimentação pelo MIT, trabalhando à potência nominal, com frequência e tensões nominais (CHAPMAN, 2013). A Equação 2.4 demonstra o cálculo da corrente nominal,

$$I_n = \frac{736P_n}{\sqrt{3}V_n\eta\cos\theta}, \quad (2.4)$$

em que, I_n é a corrente nominal, em A; P_n é a potência nominal, em cavalo-vapor (cv); V_n é a tensão nominal, em V; η é o rendimento do MIT; $\cos \theta$ é o fator de potência sob carga nominal.

2.4.4 Fator de potência

Mamede (2017) define como a razão entre o componente ativo da potência e o valor total, ou valor aparente, desta mesma potência, sendo um coeficiente que indica a eficiência com a qual a energia está sendo usada; ou seja, indica o percentual da energia elétrica que está sendo transformada em trabalho útil. A Equação 2.5 demonstra esta razão,

$$f_p = \frac{P}{S}, \quad (2.5)$$

em que, f_p é o fator de potência; P é a potência ativa, em W; S é a potência aparente, em VA.

De acordo com Umans (2014) e Chapman (2013), o ângulo de defasagem θ entre as tensões e as correntes senoidais equilibradas é conhecido, usualmente, como ângulo de fator de potência de carga; como mencionado na Equação 2.4, o cosseno deste ângulo é o próprio fator de potência, como segue na Equação 2.6,

$$f_p = \cos(\theta_V - \theta_I) = \cos \theta, \quad (2.6)$$

em que, f_p é o fator de potência; θ_V é o ângulo de defasagem da tensão, em grau ou radiano; θ_I é o ângulo de defasagem da corrente, em grau ou radiano; θ é o ângulo de fator de potência de carga, em grau ou radiano.

2.4.5 Velocidade

A velocidade de rotação, em rpm, do eixo do MIT, é em função do escorregamento e da velocidade de rotação do campo girante do estator; por sua vez, esta depende do número de polos do motor e da frequência da fonte de tensão trifásica que o alimenta (WEG, 2020). A Equação 2.7 mostra o cálculo da velocidade de rotação,

$$n_r = n_s(1-s) = \left(\frac{120f}{p}\right)(1-s), \quad (2.7)$$

em que, n_r é a velocidade do rotor, em rpm; n_s é a velocidade síncrona, em rpm; s é o escorregamento percentual; f é a frequência da fonte de tensão trifásica, em Hz; p é o número de polos do MIT.

2.4.6 *Rendimento nominal*

Também conhecido como desempenho ou eficiência, o rendimento nominal de um motor é a razão entre a potência mecânica de saída no eixo e a potência elétrica ativa de entrada no estator; assim como o fator de potência, o rendimento muda de acordo com o carregamento (UMANS, 2014). A Equação 2.8 expressa o cálculo do rendimento,

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{ele}}, \quad (2.8)$$

em que, η é o rendimento do MIT; P_{mec} é a potência mecânica de saída, em W; P_{ele} é a potência elétrica ativa, em W. A potência mecânica (P_{mec}) é definida na Equação 2.3; a potência elétrica (P_{ele}), descrita na Equação 2.9,

$$P_{ele} = \sqrt{3}V_l I_l f_p, \quad (2.9)$$

em que, P_{ele} é a potência elétrica ativa, em W; V_l é a tensão de linha, em V; I_l é a corrente de linha, em A; f_p é o fator de potência.

2.4.7 *Classe de projeto*

A classe de projeto, ou categoria de conjugado, são variações no comportamento do conjugado em relação a velocidade do MIT, cada variação adequada a um tipo de carga. O desenvolvimento do rotor de barras profundas e de dupla gaiola de esquilo criou uma versatilidade nos projetos dos motores de indução, que conduziu a uma variedade de características de conjugado de acordo com o escorregamento. Ajustando convenientemente o enrolamento de dupla gaiola, os fabricantes desenvolvem variantes do projeto do rotor fundido único ou normal; essas variantes resultam em conjugados de partida maiores ou menores que os do desempenho normal, bem como correntes de partida reduzidas (BIM, 2018).

2.4.8 *Código de partida*

O código de partida quantifica o valor da corrente de partida ou corrente de rotor bloqueado de um MIT, em relação a sua corrente nominal, como mostra a Equação 2.10,

$$I_p = \frac{I_{part}}{I_n}, \quad (2.10)$$

em que, I_p é o coeficiente de partida; I_{part} é a corrente de partida ou corrente de rotor bloqueado, em A; I_n é a corrente nominal, em A.

2.4.9 Carregamento

O carregamento resulta da razão entre a potência de trabalho e a potência nominal, como mostra a Equação 2.11,

$$C = \frac{P_t}{P_n}, \quad (2.11)$$

em que, C é o Carregamento do motor; P_t é a potência de trabalho, em W; P_n é a potência nominal, em W.

Bortoni e Santos (2006) ressaltam que, um MIT bem dimensionado à sua aplicação, deve ter o carregamento superior a 75%; porém, existem algumas situações impostas pelo ciclo de operação, como acionamentos que envolvem partida de cargas com inércia elevada, onde é aconselhável o uso de motores com potências superiores à da carga, para que esses não se danifiquem.

Nestas situações, recomenda-se a realização de uma análise térmica a fim de avaliar o perfil de elevação de temperatura do MIT durante o ciclo de operação; bem como uma análise da partida, identificando a curva de conjugado resistente da carga, com o intuito de comparar o tempo de partida com o tempo de rotor bloqueado do motor (BORTONI; SANTOS, 2006). Estas análises são procedimentos de metodologias que não são objetivo desta dissertação.

2.5 Índices mínimos de rendimento (MEPS)

Esta seção aborda as classes de MEPS, segundo ABNT NBR 17094-1 (2002), que aborda qual o índice adotado atualmente com o novo programa de metas para motores elétricos trifásicos de indução da Portaria Interministerial Nº 1, de 29 de junho de 2017 (BRASIL, 2017). No que se refere ao rendimento de plena carga, ABNT NBR 17094 (2018) estabelece duas linhas padronizadas: as classes de rendimento IR2 e IR3.

2.5.1 Classe de rendimento IR2

Os motores desta classe possuem rendimento nominal igual ou superior ao normatizado para cada combinação de potência de acordo com o número de polos da

Tabela 1.

Tabela 1 – Menores valores de rendimento nominal a plena carga para motores da classe IR2.

Potência nominal kW (cv)	Número de polos			
	2	4	6	8
0,18 (1/4)	64,0	68,0	55,0	46,0
0,37 (1/2)	72,0	72,0	64,0	58,0
1,1 (1,5)	82,5	81,5	77,0	77,0
2,2 (3)	85,0	85,0	83,0	84,0
5,5 (7,5)	88,5	89,5	88,0	85,5
7,5 (10)	89,5	89,5	88,5	88,5
11,00 (15)	90,2	91,0	90,2	88,5
15 (20)	90,2	91,0	90,2	89,5
18,5 (25)	91,0	92,4	91,7	89,5
30 (40)	91,7	93,0	93,0	91,0
37 (50)	92,4	93,0	93,0	91,7
45 (60)	93,0	93,6	93,6	91,7
75 (100)	93,6	94,5	94,1	93,0
132 (175)	94,7	95,0	95,0	94,5
185 (250)	95,4	95,0	95,0	95,0

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 17094 (2018).

Os motores da categoria IR2 compõem maioria dos motores em operação nas indústrias brasileiras.

2.5.2 Classes de rendimento IR3 ou rendimento Premium

Os motores desta classe possuem rendimento nominal igual ou superior ao normatizado para cada combinação de potência de acordo com o número de polos da Tabela 2.

Os MEPS (IR2 ou IR3) e as perdas (especificadas pelos fabricantes) devem ser determinados de acordo com o método de ensaio da ABNT NBR 17094-1 (2018) denominado “ensaio dinamométrico com medição indireta das perdas suplementares e medição direta das perdas no estator (I^2R), no rotor (I^2R), no núcleo e por atrito e ventilação”.

2.5.3 Programa de metas para motores elétricos trifásicos

Tendo em vista que compete ao poder executivo estabelecer os níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia, os Ministérios de Minas e Energia (MME), da Ministérios da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCT) e da Ministérios da Indústria,

Tabela 2 – Menores valores de rendimento nominal a plena carga para motores da classe IR3.

Potência nominal kW (cv)	Número de polos			
	2	4	6	8
	Rendimento nominal			
0,18 (1/4)	64,0	68,0	55,0	46,0
0,37 (1/2)	72,0	72,0	64,0	58,0
1,1 (1,5)	82,5	81,5	77,0	77,0
2,2 (3)	85,0	85,0	83,0	84,0
5,5 (7,5)	88,5	89,5	88,0	85,5
7,5 (10)	89,5	89,5	88,5	88,5
11,00 (15)	90,2	91,0	90,2	88,5
15 (20)	90,2	91,0	90,2	89,5
18,5 (25)	91,0	92,4	91,7	89,5
30 (40)	91,7	93,0	93,0	91,0
37 (50)	92,4	93,0	93,0	91,7
45 (60)	93,0	93,6	93,6	91,7
75 (100)	93,6	94,5	94,1	93,0
132 (175)	94,7	95,0	95,0	94,5
185 (250)	95,4	95,0	95,0	95,0

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 17094 (2018).

Comércio Exterior e Serviços (MDIC) – aprovaram o Programa de Metas para Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo, como consta o Anexo de BRASIL (2017), este composto por 10 artigos, os quais serão resumidos, a seguir:

- O artigo 1º cita a conformidade com a lei nº 10295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia e dá outras providências;
- O artigo 2º caracteriza os motores que estão sujeitos aos níveis mínimos de eficiência energética estabelecidos no artigo 3º;
- O artigo 3º estabelece que os níveis mínimos de eficiência energética a serem atendidos pelos Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo. Os níveis mínimos apresentados por esse portaria são os mesmos normatizados pela classe IR3, apresentados na Tabela 2.
- O artigo 4º estabelece data limite para fabricação ou importação de motores que não atendam os níveis mínimos estabelecidos no artigo 3º, com data limite de dois anos a contar da data da publicação desta portaria, ou seja, até 30 de agosto de 2019;
- O artigo 5º estabelece data limite para a comercialização dos motores referidos no artigo 4º, com data limite de dois anos e seis meses a contar da data da publicação desta portaria, ou seja, até 30 de janeiro de 2020;
- O artigo 6º estabelece data limite para fabricação ou importação de máquinas cujos

motores não atendam os níveis mínimos estabelecidos no artigo 3º, com data limite de três anos a contar da data da publicação desta portaria, ou seja, até 30 de agosto de 2020;

- O artigo 7º estabelece data limite para a comercialização das máquinas referidas no artigo 6º, com data limite de três anos e seis meses a contar da data da publicação desta portaria, ou seja, até 30 de janeiro de 2021;
- O artigo 8º atribui ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) a responsabilidade na fiscalização, acompanhamento e avaliação do cumprimento disposto nesta Portaria;
- O artigo 9º atribui ao Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE) a responsabilidade pelo acompanhamento e a avaliação das ações governamentais de suporte à implantação deste Programa de Metas;
- O artigo 10º garante que, até as datas estabelecidas nos artigos 4º a 7º, os motores caracterizados no art. 2º ficam sujeitos aos valores de rendimentos nominais mínimos estabelecidos pela Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC nº 553, de 8 de dezembro de 2005.

Sendo assim, nota-se que os critérios estabelecidos por lei em BRASIL (2017) para os índices mínimos de rendimento são os de classe IR3 (ABNT NBR 17094-1, 2002), de acordo com a Tabela 2, para MITs.

2.6 Circuito equivalente e seus parâmetros

Do ponto de vista elétrico, é possível analisar máquinas com enrolamentos polifásicos simétricos excitados por tensões polifásicas também simétricas, por meio do seu CE por fase (UMANS, 2014). Dessa forma, a máquina passa então a ser avaliada por técnicas de análise de circuitos aplicadas ao caso monofásico, evitando a necessidade de uma análise mais complexa do circuito ou do circuito trifásico completo (WENGERKIEVICZ, 2016).

O CE pode ser usado para determinar uma variedade de características em regime permanente, de modo que as correntes e tensões sejam sempre expressas em valores por fase, independentemente do tipo de ligação (estrela ou triângulo). Deduzindo o CE para uma fase, subtende-se que as tensões e correntes nas demais fases podem ser obtidas por meio do deslocamento adequado da fase que está sendo estudada em $\pm 120^\circ$ elétricos

(UMANS, 2014).

O CE do MIT é semelhante ao CE do transformador de potência, com modificações que explicam os fenômenos ocorridos no motor. Dentre essas modificações destacam-se: a variação no modelo matemático do rotor equivalente em função do escorregamento e, portanto, da carga mecânica, e a presença de um entreferro de ar entre o estator e o rotor. Este entreferro causa uma relutância maior, ou seja, uma corrente de magnetização maior (30 a 50% da corrente a plena carga) é necessária para obter um dado nível de fluxo (CHAPMAN, 2013).

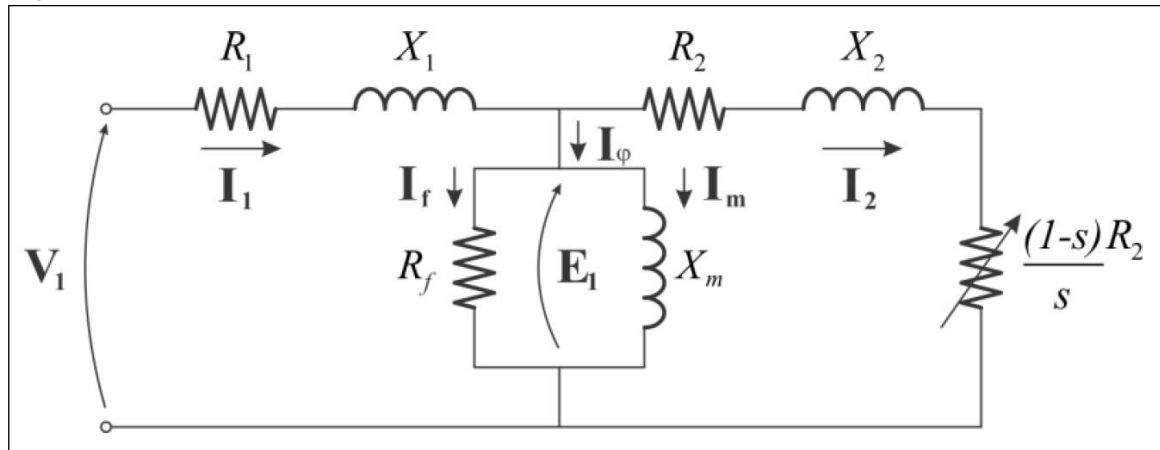
Os parâmetros dos motores de indução são divididos em parâmetros elétricos e mecânicos. Os parâmetros elétricos representam as grandezas elétricas que compõem o CE e regem características como torque, fator de potência, rendimento e eficiência energética. Os elementos R_1 e X_1 são a resistência e a reatância de dispersão do estator, respectivamente. Já os elementos R_2 e X_2 são as componentes da impedância do rotor referidas ao estator. Por fim, os elementos R_c e X_m representam, respectivamente, a resistência de perdas no núcleo e a reatância de magnetização.

Os parâmetros mecânicos estão relacionados às grandezas mecânicas, sendo J o momento de inércia, em $kg \cdot m^2$, e B o coeficiente de fricção. O conhecimento dos parâmetros mecânicos faz-se necessário para o aperfeiçoamento e implementações de estratégias de controle de velocidade e torque (MELO, 2004).

No CE do MIT a corrente do estator pode ser decomposta em uma componente de carga e uma componente de excitação. A componente de carga leva em conta o efeito da força magnetomotriz (fmm) da corrente do rotor, enquanto a corrente de excitação representa a corrente adicional para produzir o fluxo no entreferro. A última pode ser decomposta em uma componente de perdas no ferro e uma componente magnetizante (WENGERKIEVICZ, 2016). A influência do rotor sobre o estator se dá pelas ondas de fluxo no entreferro e de fmm produzida pelo rotor e é modelada como uma impedância equivalente vista pelo estator, que produza a mesma componente de carga na corrente (UMANS, 2014). A influência da carga mecânica sobre a corrente é modelada por uma resistência variável, dependente do escorregamento, o qual depende, por sua vez, do torque exigido pela carga. Com esse circuito, definem-se as impedâncias do estator, do ramo de excitação e do rotor.

O CE mostrado na Figura 5 enfatiza a relação entre as perdas no rotor e a potência eletromecânica. A dissipação de potência no estator, no rotor e no ramo de magnetização por fase corresponde à potência dissipada nas resistências elétricas R_1 , R_2 e R_c , respectivamente; ao passo que a potência eletromecânica por fase é igual à potência entregue à resistência $(R_2 \frac{1-s}{s})$ (UMANS, 2014).

Figura 5 – Circuito equivalente monofásico do MIT

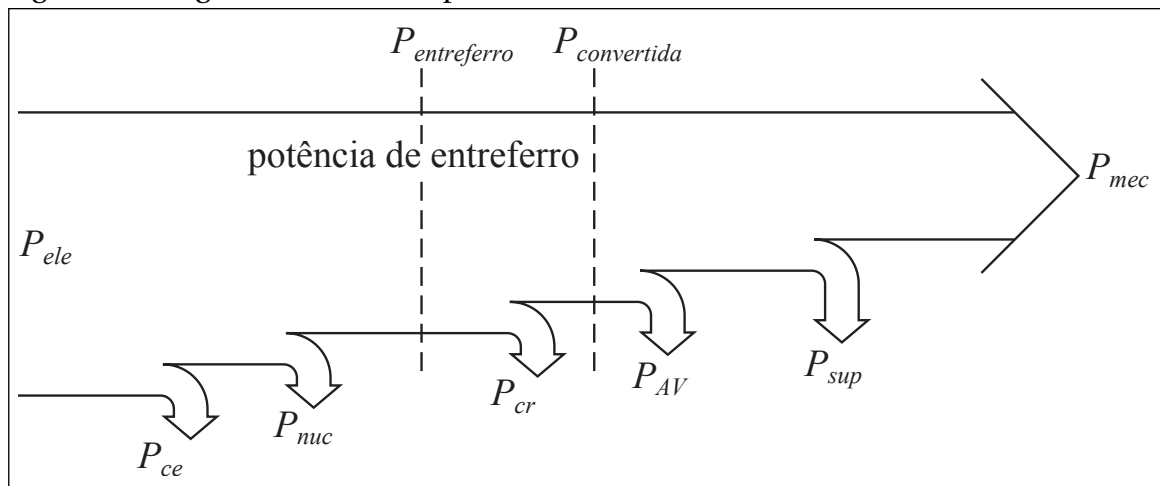


Fonte: IEEE Std 112-2017 (2017).

2.6.1 Perdas no MIT

O termo “perdas totais”, especifica a potência que está deixando de ser disponibilizada para a conversão em trabalho útil (ANDRADE, 2009). A Figura 6 mostra o diagrama de fluxo de potência do MIT.

Figura 6 – Diagrama de fluxo de potência do MIT



Fonte: Chapman (2013).

Chapman (2013) ressalta que o diagrama da Figura 6 expressa a relação entre a potência elétrica de entreferro e a potência mecânica de saída de um MIT; Bortoni e Santos (2006) falam da relação percentual de distribuição média das perdas de um motor em operação e deixam evidente que esta distribuição varia de acordo com a potência nominal, o carregamento, com o design e com o material utilizado; por sua vez, Andrade (2009) complementa destacando que, no diagrama de fluxo de potência do MIT, as áreas das setas verticais são um indicativo de cada uma das perdas da máquina e que se pode visualizar quatro tipos de perdas existentes:

- Perdas resistivas (P_c): associadas aos enrolamentos condutores da máquina, estas perdas resultam da passagem da corrente elétrica pelos enrolamentos do estator (P_{ce}) e do rotor (P_{cr}), representando 40% e 20% das perdas no MIT, respectivamente. As perdas resistivas também são denominadas perdas por efeito Joule;
- Perdas no núcleo (P_{nuc}): associadas ao núcleo ferromagnético da máquina, também estão presentes tanto no estator (maior parcela) como no rotor. Estas perdas representam 20% das perdas no MIT e resultam da variação de densidade de fluxo magnético e são de dois tipos: perdas por histerese e por correntes suplementares, sendo esta dividida em duas componentes denominadas perdas clássicas e perdas por excesso;
- Perdas mecânicas (P_{AV}): associadas ao movimento de rotação do rotor, são as perdas causadas pelos atritos existentes entre as partes fixas e móveis da máquina e pela potência utilizada na ventilação. Estas representam, em média, 10% das perdas variando com a potência do MIT;
- Perdas suplementares (P_{sup}): associadas às imperfeições construtivas da máquina, são as mais complexas e as mais difíceis de determinar. Possuem componentes de alta frequência e de frequência fundamental e, por estarem distribuídas pela máquina, são definidas por exclusão, como aquelas que não estão contempladas nas definições anteriores. São também chamadas de perdas adicionais e representam, em média, cerca de 10% das perdas variando com a potência do MIT.

Ainda sobre o diagrama de fluxo de potência da Figura 6, observa-se que a potência elétrica absorvida da rede menos as perdas do MIT, resulta na potência mecânica disponível no eixo do motor, como mostra a Equação 2.12,

$$P_{mec} = P_{ele} - P_p, \quad (2.12)$$

em que, P_{mec} é a potência mecânica de saída, em W; P_{ele} é a potência elétrica ativa, em W;

P_p são as perdas totais no MIT, em W. Substituindo a Equação 2.12 na Equação 2.8, temos o que mostra na Equação 2.13,

$$\eta = \frac{P_{ele} - P_p}{P_{ele}}. \quad (2.13)$$

A Equação 2.13, para determinação do rendimento, tem maior usabilidade devido à facilidade de se medir a potência elétrica em relação a potência mecânica (BORTONI; SANTOS, 2006).

2.6.2 Métodos normativos para determinação dos parâmetros do MIT

Para determinação dos parâmetros do CE do MIT e seu rendimento normalmente são realizados os ensaios clássicos de rotor bloqueado, operação em vazio e, eventualmente, testes de corrente contínua e, no Brasil, os ensaios em laboratório com motores de indução trifásicos são definidos pela norma ABNT NBR 5383-1 (2002). A referência principal desta norma é a norma internacional IEEE Std 112-2017 (2017) que:

- Estabelece condições mínimas da qualidade de energia e medições de grandezas elétricas, mecânicas e térmicas;
- Elenca procedimentos, testes, cálculos e relações fundamentais, para identificação de parâmetros e perdas, bem como correção destes parâmetros em função da temperatura em máquinas de indução, vistos também nas literaturas clássicas como Umans (2014), Bim (2018) e Chapman (2013);
- Descreve os vários métodos de determinação de eficiência e perdas, e outros testes de performance;
- Apresenta formulários de testes para cada método proposto, com as devidas informações para suporte.

A seguir serão abordados os vários métodos para determinação da eficiência apresentados em IEEE Std 112-2017 (2017).

2.6.2.1 Método A

Este método atende a máquinas com classificações inferiores a 1 cv, tendo o rendimento calculado por meio da relação entre a potência de saída medida e a potência de entrada medida, após correções de temperatura e potência de saída. O desenvolvimento

dos cálculos deste método devem ser executados conforme mostrado no formulário A da IEEE Std 112-2017 (2017).

2.6.2.2 *Método B*

Neste método os dados são obtidos com a máquina em operação com segregação de perdas e medição indireta de perdas suplementares dependendo da região de operação para a qual os dados de rendimento são necessários. As perdas totais aparente (potência de entrada menos potência de saída) são distribuídas entre vários componentes como perdas no cobre do estator e no rotor, perdas no núcleo, perdas por atrito e ventilação. Desta forma, as perdas suplementares são definidas a partir da diferença entre a perda total aparente e o somatório das perdas convencionais.

Cada teste em carga pode ser realizado individualmente se a temperatura de operação da máquina for estabelecida próxima à sua temperatura normal de operação para o tipo de teste antes de obter os dados do teste.

2.6.2.3 *Método B1*

Neste método, como no descrito anteriormente, os dados são obtidos com a máquina em operação com segregação de perdas e medição indireta de perdas suplementares, porém com temperaturas de operação assumidas.

2.6.2.4 *Método C*

Para a determinação da eficiência segundo este método, devem ser usados dois motores de mesma especificação. Os motores devem ser acoplados mecanicamente e conectados eletricamente a duas fontes de energia, sendo o primeiro *M1* conectado à fonte com tensão e frequência nominal e fixa e o outro motor *M2* conectado à outra fonte que permita ajustes nos valores de tensão e frequência.

Leituras de corrente, tensão, frequência e temperatura do enrolamento do estator ou resistência do enrolamento do estator de ambas as máquinas devem ser obtidas para cada ponto de teste de carregamento, juntamente com a velocidade e a temperatura ambiente.

Por meio do aumento e diminuição das grandezas tensão e frequência no *M2*, acontece a mudança de carregamento no *M1* que funciona hora com motor hora como

gerador. Diante disso, é necessário a realização de ensaios de aumentos de cargas graduais, conforme Formulário C da IEEE Std 112-2017 (2017).

2.6.2.5 Método E ou E1

Este método de teste mede a potência de entrada e determina a potência de saída subtraindo as perdas totais da entrada. As perdas totais são iguais à soma das perdas do estator e do rotor corrigidas para a temperatura especificada para correção de resistência, perda do núcleo, perda por atrito e ventilação e perdas suplementares.

A determinação do rendimento de máquinas elétricas por meio dos métodos E e E1 utiliza medições da potência elétrica de entrada com separação das perdas no estator, rotor e núcleo. Além disso, o método E requer a medição direta de perdas suplementares, enquanto o método E1 presume valores para tais perdas.

2.6.2.6 Método F ou F1

Os métodos F e F1 utilizam os parâmetros do circuito equivalente com medição direta das perdas suplementares e valores assumidos de perdas suplementares, respectivamente.

Quando os testes em carga não são feitos, as características operacionais são calculadas com base no CE mostrado na Figura 5. Os parâmetros do CE da máquina são derivados de dados de teste registrados durante ensaios a vazio e de rotor bloqueado, como especificados no capítulo 5 da IEEE Std 112-2017 (2017). A precisão dos valores estimados para cada parâmetro dependerá principalmente da proximidade com que R_2 representa a resistência efetiva do rotor a correntes em baixa frequência e da proximidade com que X_2 representa a reatância de dispersão real do rotor a correntes em baixa frequência. Assim, este procedimento demanda um cuidado na execução durante o teste para determinar as características do rotor em baixa frequência.

2.7 Considerações finais

O circuito equivalente de um motor de indução trifásico é uma representação matemática simplificada do motor. Esta representação permite analisar com precisão seu comportamento elétrico e desempenho em diferentes condições de operação.

A estratificação dos parâmetros R_1 , X_1 , R_2 , X_2 e X_m é feita por meio de procedimentos e ensaios com valores de carregamento comumente usados em 25%, 50%, 75%, 100%, 125% e 150% da carga nominal do motor em análise.

O uso de ferramentas computacionais contribuem para uma análise mais eficiente e armazenamento dos dados coletados, como é de orientação normativa,

Espera-se que as análises de teste sejam realizadas usando programas de computador e, em muitos casos, com os dados sendo obtidos por meios eletrônicos e indo diretamente para o programa de análise. (IEEE Std 112-2017, 2017).

Softwares como o MATLAB[®], que será abordado na seção 4.2.3, contribuem para a modelagem e simulação de motores de indução trifásicos sendo uma poderosa ferramenta de computação numérica amplamente utilizada em diversos campos da ciência, engenharia, pesquisa acadêmica e indústria, devido à sua flexibilidade e eficácia em resolver problemas complexos e realizar análises numéricas.

Controle e análises avançadas de motores usam frequentemente métodos numéricos para desenvolver algoritmos iterativos para resolução de sistemas de equações e relações fundamentais do MIT, esses algoritmos podem ser implementados usando o MATLAB[®]. Neste contexto a IIoT pode desempenhar um papel importante, permitindo que as análises sejam realizadas e atualizadas remotamente com base em dados coletados em tempo real por intermédio de sensores ou dispositivos de medição.

O próximo capítulo traz uma abordagem sobre as relações fundamentais do MIT à luz dos algoritmos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson, usados para estratificação dos parâmetros do CE por meio dos dados de placa da máquina.

3 MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O comportamento dos MITs é, em geral, complexo tendo em vista a sua não linearidade mediante a variação de carregamento. Então, frequentemente são usados modelos simplificados para caracterizar grandezas de interesse dentro de uma zona de operação. Bons resultados são obtidos utilizando o CE, que permitem estimar a velocidade no eixo, perdas de potência e carregamento a partir da medição das correntes no estator (CHAPMAN, 2013).

Os parâmetros elétricos dos MITs podem ser categorizados em parâmetros nominais e parâmetros reais. Os parâmetros nominais representam os aspectos estruturais da máquina, ou seja, os valores pré-determinados pela fabricação. Por outro lado, os parâmetros reais são os que os motores realmente possuem e geralmente são obtidos por meio de testes normatizados, como consta na seção 2.6.2 desta dissertação. Esses valores podem sofrer variações ao longo do tempo devido ao uso ou influências externas, como temperatura, sujeira, umidade do ar e corrosão (LEE *et al.*, 2012).

Na prática, o diagrama do CE da máquina não é fornecido pelo fabricante, de forma normativa, apenas os dados de placa são obrigatórios. Dessa forma, para dispor das vantagens advindas do modelo deve-se obter tais parâmetros por meio de ensaios ou estima-los a partir das informações disponíveis.

Utilizando métodos não invasivos, dispondo dos dados de placa e da medição de resistência do estator, através de equações não lineares pode-se determinar os parâmetros do CE. Alguns algoritmos clássicos são capazes de obter soluções válidas para estas equações. Algoritmos iterativos como os de Gauss-Seidel e Newton-Raphson permitem a obtenção dos parâmetros elétricos do MIT, como as resistências, reatância do estator, do rotor e ramo de magnetização com boa precisão.

Pode-se constatar que, de posse dos parâmetros elétricos do MIT, também é possível determinar o grau de desgaste do mesmo, visto que os parâmetros dos motores elétricos tendem a mudar significativamente com o desgaste no tempo. Todavia, é necessária a medição da corrente de entrada e do fator de potência para que sejam obtidos de forma confiável os parâmetros elétricos alterados pelo desgaste das máquinas. Dessa forma, mostra-se se há ou não a necessidade de manutenções corretivas, para então recuperar o rendimento da máquina e, conseqüentemente, uma melhor eficiência energética da mesma

(CHAPMAN, 2013).

Este capítulo expõe um breve histórico sobre métodos para determinação dos parâmetros do MIT, e também apresenta uma metodologia que utiliza as equações clássicas nos métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson para determinar os parâmetros do CE. São apresentados os algoritmos propostos, na forma de fluxogramas, e os resultados gerais destes algoritmos implementados no MATLAB[®] utilizando dois MITs, um de 1,5 cv e outro de 10 cv assim como uma análise dos resultados obtidos.

3.1 Métodos numéricos iterativos

Métodos numéricos são técnicas usadas na solução de problemas matemáticos em que não há uma solução analítica para o problema, que é o caso da maioria dos sistemas lineares (KIUSALAAS, 2009). Com isso, os resultados obtidos são valores aproximados da solução real, há um erro inerente entre a solução numérica e analítica.

O método de Gauss-Seidel é utilizado para resolver equações lineares iterativamente (KUPHALDT, 2002), sendo frequentemente utilizado em sistemas complexos de equações lineares. Já o método de Newton-Raphson é utilizado para resolver equações não lineares e possui convergência rápida (CHAPRA; CANALE, 2016), sendo amplamente utilizado na engenharia elétrica.

Na análise de parâmetros de motores de indução trifásicos, ambos os métodos podem ser utilizados para estimar parâmetros do circuito equivalente, mas o método de Newton-Raphson é mais rápido e robusto, enquanto o de Gauss-Seidel é mais eficiente em termos computacionais (RAMIREZ, 2006). A escolha do método depende do problema específico, mas compreender suas vantagens e limitações é importante para projetar sistemas mais precisos e eficientes (NOCEDAL, 2006).

3.2 Modelagem matemática dos métodos

Os procedimentos de otimização empregam iterações para aprimorar uma suposição inicial da variável de interesse e alcançar uma solução desejada. A forma como o algoritmo passa de uma iteração para a próxima é o que distingue um método do outro, e a maioria deles utiliza informações como a função objetivo, as funções de restrição e as derivadas dessas funções. Alguns algoritmos acumulam dados de iterações anteriores, enquanto outros se baseiam apenas em informações locais do ponto atual (NOCEDAL, 2006). Independentemente dessas diferenças, algoritmos eficazes devem ter as seguintes propriedades:

- Robustez. Capacidade de obter desempenho satisfatório em uma ampla variedade de problemas em sua classe, para todos os valores razoáveis do ponto de partida;
- Eficiência. Indica baixa necessidade de memória e de poder computacional;
- Precisão. Trata da capacidade de identificar uma solução com precisão, sem serem excessivamente sensíveis a erros nos dados ou aos erros de arredondamento aritmético que ocorrem quando o algoritmo é implementado em sistemas digitais.

Os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson apresentam as propriedades necessárias para aplicação de determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente a partir de sistemas de equações apresentado na seção 3.3. Que também é corroborado pela literatura nos trabalhos de Lee *et al.* (2012) e de Pedrini e Brunoro (2021).

3.2.1 Gauss-Seidel

O método de Gauss-Seidel é um método iterativo para resolver sistemas lineares, resolvendo cada equação do sistema sucessivamente para a variável desconhecida, usando as estimativas mais atualizadas das outras variáveis. O processo é repetido até que a solução convirja para uma precisão desejada (CHAPRA; CANALE, 2016).

A solução de um sistema linear $Ax = b$ pelo método de Gauss-Seidel pode ser obtida por meio da fórmula iterativa mostrada na Equação 3.1,

$$x_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} x_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_j^{(k)} \right), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.1)$$

em que $x_i^{(k)}$ é a estimativa da i -ésima componente do vetor solução na k -ésima iteração, e n é o número de equações no sistema.

O algoritmo começa com uma estimativa inicial $x^{(0)}$ e repete a fórmula iterativa até que a norma da diferença entre duas estimativas consecutivas seja menor que uma tolerância especificada. O critério de parada de Sassenfeld pode ser usado para verificar a convergência do método de Gauss-Seidel. Este critério envolve calcular uma sequência de fatores de escala β_i para $i = 1, 2, \dots, n$, definidos pela Equação 3.2,

$$\beta_i = \frac{1}{a_{ii}} \sum_{j=i+1}^n |a_{ij}| \beta_j + \frac{|b_i|}{a_{ii}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

O método de Gauss-Seidel converge se e somente se $\beta_i < 1$ para $i = 1, 2, \dots, n$. Se algum β_i for maior ou igual a 1, então o método pode divergir ou convergir muito lentamente (CHAPRA; CANALE, 2016).

3.2.2 Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é um algoritmo de localização de raízes que possui convergência quadrática usado para resolver equações não lineares. Dada uma estimativa inicial da raiz, o método melhora iterativamente a estimativa linearizando a função em torno da estimativa atual e resolvendo a equação linear resultante (CHAPRA; CANALE, 2016). O método de Newton-Raphson possui convergência rápida para funções bem comportadas e é amplamente utilizado em diversas áreas da engenharia, inclusive na engenharia elétrica. No entanto, a convergência do método pode ser afetada por condições mal estabelecidas ou escolhas inadequadas da estimativa inicial da raiz (CHAPRA; CANALE, 2016).

O algoritmo do método de Newton-Raphson é definido pela Equação 3.3,

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}, \quad (3.3)$$

em que x_i é a estimativa atual da raiz, $f(x_i)$ é o valor da função no ponto x_i e $f'(x_i)$ é a derivada da função no ponto x_i .

Segundo BOLÍVAR *et al.* (2005), para obter a solução de um sistema de equações não lineares na forma $F(x) = 0$, realiza-se os seguintes passos:

1. Estabelecer o conjunto de equações $F(x)$ e determinar as variáveis do sistema.

2. Calcular a jacobiana $J(x)$, descrita na Equação 3.4.

$$J(x^{(k)}) = \begin{bmatrix} \nabla f_1(x^{(k)}) \\ \nabla f_2(x^{(k)}) \\ \dots \\ \nabla f_n(x^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3. Determinar as aproximações iniciais para as variáveis do sistema.
4. Calcular as Equações 3.5, 3.6 e 3.7 até o erro ser o desejado.

$$\Delta x^{(k)} = -[J(x^{(k)})]^{-1} \cdot F(x^{(k)}) \quad (3.5)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon = x^{(k)} - x^{(k-1)} \quad (3.7)$$

3.3 Aplicação dos métodos numéricos para obtenção dos parâmetros do MIT

Dois trabalhos consolidados na literatura desenvolveram métodos para a determinação dos parâmetros do MIT a partir dos dados de placa e de testes de performance, são eles: Natarajan e Misra (1989) e Haque (2008). O método proposto por Natarajan e Misra (1989) utiliza os dados de placa e alguns dados de performance apresentados pelo fabricante, tais como o conjugado de plena carga, conjugado de partida, fatores de potência e rendimentos a 50%, 75% e 100% de carregamento. De posse destes dados, o método resolve um sistema de equações lineares que relaciona os parâmetros do CE. O método de Haque (2008), por sua vez, utiliza os dados de placa, a razão entre o conjugado de partida e o conjugado a plena carga, os fatores de potência e os rendimentos a 50%, 75% e 100% de carregamento. Com estes dados, o método obtém um sistema de equações não lineares que relacionam os parâmetros do circuito à potência de entrada do motor e às perdas. A solução é obtida a partir do método de Gauss-Seidel iterativo.

A principal limitação destes trabalhos está na necessidade dos dados de performance da máquina para carregamentos e de outros dados que não sejam a plena carga.

Como os fabricantes muitas vezes não fornecem esses dados, principalmente para motores pequenos e para motores antigos, essas informações podem ser difíceis de se achar, limitando a aplicabilidade dos métodos citados.

Os métodos estudados nesta dissertação são os propostos por Lee *et al.* (2012) e Pedrini e Brunoro (2021). O primeiro é uma extensão do método de Haque (2008) e consiste de quatro passos: cálculo dos requerimentos a plena carga e de partida do motor; estimação das perdas no motor a partir dos dados de placa, características de projeto NEMA e valores publicados típicos; desenvolvimento de um sistema de equações não lineares que relaciona potência e perdas no motor com os parâmetros do circuito; e a resolução desse sistema a partir do método de Gauss-Seidel iterativo. O método proposto por Pedrini e Brunoro (2021) consiste na utilização de dados construtivos obtidos em placas e catálogos de motores para o desenvolvimento de um sistema não linear de equações que deve ser resolvido pelo método de Newton-Raphson para se obter os dados do CE.

3.3.1 Os MITs analisados

Os algoritmos descritos na seção anterior foram aplicados a dois motores, um de 1,5 cv e outro de 10 cv, no trabalho de Paz (2023) com dados de parâmetros estratificados por meio de ensaios em bancada, onde é proposto uma metodologia computacionais para a determinação dos parâmetros do motor de indução trifásico, e por comparações entre os parâmetros estimados e os parâmetros reais validou-se a eficácia dos algoritmos iterativos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson.

O motor de 1,5 cv foi alvo de estudo de Aguiar (2018), que em sua tese propôs uma avaliação técnico-econômica do aumento do rendimento em motores de indução trifásicos de baixa potência após rebobinagem. Para validar sua proposta Aguiar (2018), apresenta uma bancada experimental de medição de rendimento de acordo com os métodos A e B da norma IEEE Std 112-2017 (2017) que também possibilita a medição da corrente de partida e da temperatura média do enrolamento para cada motor testado.

A Figura 7 mostra o motor de 1,5 cv. Seus dados de placa bem como os parâmetros encontrados por meio dos ensaios realizados são apresentados na Tabela 3.

Figura 7 – Motor de 1,5 cv



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Dados do motor de 1,5 cv

Especificações	Motor de 1,5 cv
Potência nominal (cv/kW)	1,5/1,1
Frequência (Hz)	60
Rotação nominal (rpm)	3440
Número de polos	2
Tensão de linha nominal ΔY (V)	220/380
Corrente nominal em 220/380V (A)	4,16/2,41
Corrente de partida I_p/I_n	7,6
Rendimento à plena carga (%)	82,6
Fator de potência à plena carga	0,84
Categoria (NBR-7094)	N
R_1 (Ω)	5,8
X_1 (Ω)	5,9
X_m (Ω)	170,2
R_2 (Ω)	4,5
X_2 (Ω)	7,1

Fonte: Adaptado de Aguiar (2018).

Enquanto o motor de 10 cv foi alvo de estudo de Pereira (2006) que em sua dissertação propôs o projeto de um freio eletromagnético por ação de correntes induzidas para atender as condições de carga mecânica em ensaio de MITs de 10 cv, com a possibilidade de variação do conjugado de carga e potência entre 0% e 125% do nominal do motor.

A partir do comparativo experimental e de dois modelos matemáticos distintos, modelo ABC e circuito equivalente monofásico, a Figura 8 mostra o motor de 10 cv e seus dados de placa bem como os parâmetros encontrados para o motor de 10 cv, são apresentados na Tabela 4.

Figura 8 – Motor de 10 cv



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Dados do motor de 10 cv

Especificações	Motor de 10 cv
Potência nominal (cv/kW)	10/7,5
Frequência (Hz)	60
Rotação nominal (rpm)	1760
Número de polos	4
Tensão de linha nominal ΔY (V)	380/660
Corrente nominal em 220/380V (A)	15,30/8,80
Corrente de partida I_p/I_n	7,8
Rendimento à plena carga (%)	91,0
Fator de potência à plena carga	0,82
Categoria (NBR-7094)	N
R_1 (Ω)	1,653
X_1 (Ω)	3,323
X_m (Ω)	91,29
R_2 (Ω)	1,013
X_2 (Ω)	3,493

Fonte: Adaptado de Pereira (2006).

3.3.2 Aplicação de Gauss-Seidel para obtenção dos parâmetros do MIT

O método proposto por Castro e Oliveira (2020) permite estimar os parâmetros do MIT com base nos dados de placa e no valor conhecido da resistência do estator R_1 . A resistência do estator de um MIT pode ser conhecida de maneira aproximada por medição direta entre os bornes de acesso à máquina. Esta medição é feita apenas uma única vez.

Castro e Oliveira (2020) utilizam do algoritmo desenvolvido por Lee *et al.* (2012) para determinação dos parâmetros com o motor em funcionamento. Conhecendo-se R_1 , os outros parâmetros do CE da máquina podem ser estimados pela solução de equações clássicas, tomando por base o circuito elétrico equivalente mostrado na Figura 5, onde

pode-se obter uma tensão auxiliar \mathbf{E}_1 , apresentada na Equação 3.8,

$$\mathbf{E}_1 = V_1 - \mathbf{I}_1(R_1 + jX_1), \quad (3.8)$$

e, então reescrever \mathbf{I}_2 como a razão demonstrada na Equação 3.9,

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{E}_1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}, \quad (3.9)$$

sendo o módulo de \mathbf{I}_2 apresentado na Equação 3.10,

$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2}}. \quad (3.10)$$

A potência induzida no entreferro pode ser obtida usando a Equação 3.11,

$$P_{entreferro} = \frac{3I_2^2 R_2}{s}. \quad (3.11)$$

Substituindo a expressão de I_2 da Equação 3.10, na Equação 3.11, obtém-se a Equação 3.12

$$P_{entreferro} = \frac{3R_2 E_1^2}{s\left(\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2\right)}, \quad (3.12)$$

e reescrevendo a Equação 3.12 em função de $\frac{R_2}{s}$, chega-se a Equação 3.13,

$$P_{entreferro} \left(\frac{R_2}{s}\right)^2 - 3\frac{R_2}{s} E_1^2 + P_{entreferro} X_2^2 = 0. \quad (3.13)$$

Resolvendo a Equação 3.13, obtém-se a Equação 3.14,

$$R_2 = s \frac{3E_1^2 + \sqrt{9E_1^2 - 4P_{entreferro}^2 X_2^2}}{2P_{entreferro}}. \quad (3.14)$$

A solução do problema apresentado consiste na resolução da Equação 3.14. Esta expressão apresenta três incógnitas: R_2 , E_1 e X_2 . $P_{entreferro}$ é um valor que pode ser calculado diretamente por meio da Equação 3.15,

$$P_{entreferro} = P_{3\phi} - P_{PCE}, \quad (3.15)$$

No decorrer do processo iterativo as variáveis X_1 e X_2 podem ser atualizadas em função da reatância de rotor bloqueado X_{RB} . Com rotor bloqueado ou na partida, devido a elevada corrente ($I_1 \approx I_2$), pode-se desprezar o ramo de magnetização do CE Figura

5. A Equação 3.16 demonstra as condições do MIT em rotor bloqueado ou na partida (CHAPMAN, 2013):

$$X_{RB} = \sqrt{\frac{V_{nom}^2}{I_{RB}^2} - (R_1 + R_2)^2}. \quad (3.16)$$

Na norma IEEE Std 112-2017 (2017) é definida a relação empírica entre as reatâncias de dispersão para motores de indução a depender da classe do mesmo, conforme apresentado na Tabela 5. A relação entre X_1 e X_2 está expressa na Equação 3.17.

Tabela 5 – Relação entre as reatâncias de dispersão X_1 e X_2 segundo a classe de projeto do MIT

Categoria de conjugado	$\alpha = X_1/X_2$
A, N ou NY	1
B	0,67
C, H ou HY	0,43
D	1

Fonte: Adaptada de IEEE Std 112-2017 (2017).

Nota: a categoria de conjugado da IEC 60034-1 (2022) e da ABNT NBR 17094 (2018) corresponde a classe de projeto NEMA.

$$\begin{cases} X_1 = \left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right) X_{RB}, \\ X_2 = \frac{X_{RB}}{1+\alpha}. \end{cases} \quad (3.17)$$

Com o valor medido de I_1 e os valores estimados de I_2 e E_1 pode-se obter X_m por meio da Equação 3.18

$$\begin{cases} Q_M = Q_{3\phi} - 3I_1^2 X_1 - 3I_2^2 X_2, \\ X_m = \frac{3E_1^2}{Q_M}. \end{cases} \quad (3.18)$$

Da mesma forma, pode-se calcular as perdas no cobre e por consequência R_c por meio da Equação 3.19

$$\begin{cases} P_c = P_{3\phi} - 3I_1^2 R_1 - 3I_2^2 \frac{R_2}{s}, \\ R_c = \frac{3E_1^2}{P_c}. \end{cases} \quad (3.19)$$

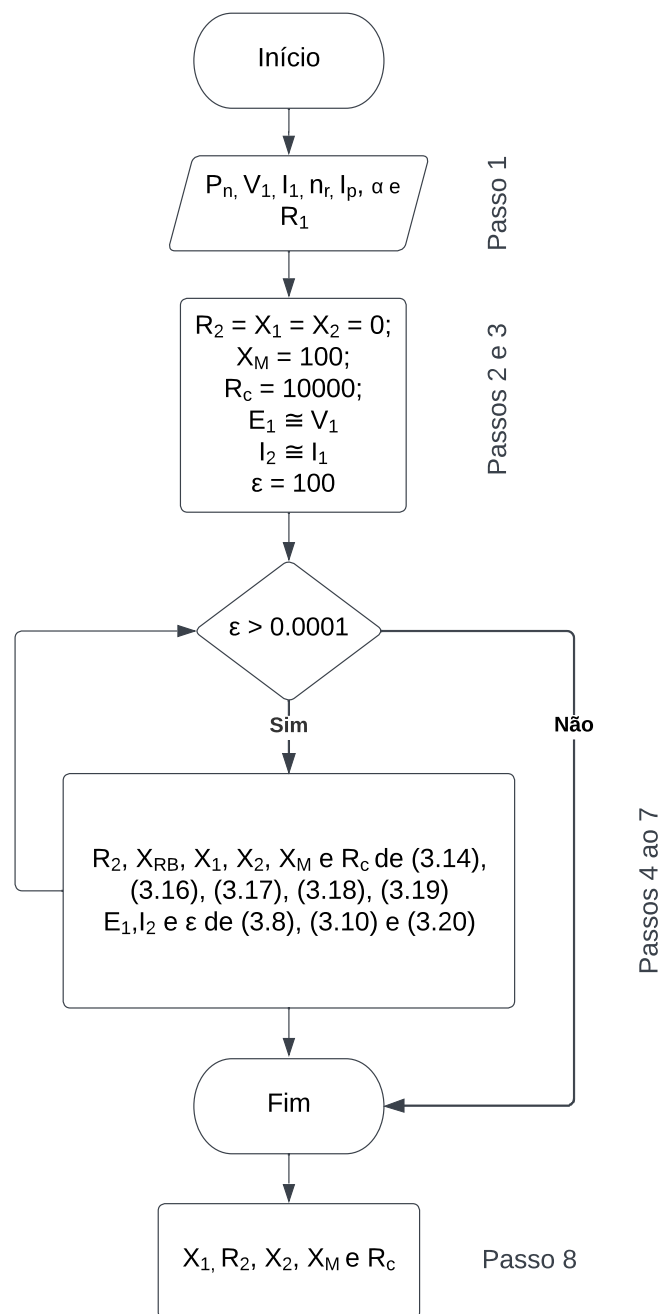
As Equações 3.8, 3.9, 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19 passam a ser atualização das variáveis em função do resultado do processo iterativo. A solução é quando se atinge tolerância ε , expressado na Equação 3.20.

$$\varepsilon = |R_2 - R_2(\text{anterior})|. \quad (3.20)$$

A aplicação do método de Gauss-Seidel é possível e não gera problemas de convergência, contanto que, os valores iniciais estimados das variáveis estejam próximos dos valores reais.

O método de solução proposto e adaptado por Paz (2023) para o método de Gauss-Seidel é representado no fluxograma da Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma do algoritmo de Gauss-Seidel utilizado



Para facilitar o entendimento, o fluxograma é descrito a seguir:

1. Entrada dos valores P_n , V_1 , I_1 , n_r , I_p , α (obtidos por meio dos dados de placa) e R_1 (medido diretamente do estator).
2. Inicializar os valores das variáveis R_2 , X_1 , X_2 iguais a zero, X_m igual a 100Ω (valor elevado pois é característica dos MITs em geral) e R_c (opcionalmente) igual a 10000Ω .
3. Inicializar os valores de $E_1 \approx V_1$, $I_2 \approx I_1$ e ε .
4. Atualizar o valor de R_2 a partir da Equação 3.14.
5. Calcular X_{RB} a partir da Equação 3.16.
6. Atualizar X_1, X_2, X_m, R_c a partir das Equações 3.17, 3.18, 3.19.
7. Verificar a convergência do algoritmo comparando o valor atual das variáveis (X_1 , R_2 , X_2 , X_m e R_c) com seus valores anteriores:
 - a) Se for menor que uma tolerância predeterminada ε a partir da Equação 3.20, parar.
 - b) Caso contrário, atualizar as variáveis de E_1 e I_2 pelas Equações 3.8 e 3.9, respectivamente e voltar ao passo 6.
8. Mostrar Resultados.

Nesta dissertação o algoritmo é iterado até que o valor do erro ϵ seja menor ou igual a 0,0001. O número de iterações para a convergência das variáveis em métodos iterativos é particular de cada sistema de equação e está relacionado a alguns fatores como aproximação inicial para as variáveis.

Por meio de procedimentos empíricos observados por Paz (2023), está sendo aplicado um fator de correção na corrente de partida. Este fator de correção foi obtido dividindo-se o valor da corrente de partida do dado de placa pelo valor obtido do circuito equivalente, utilizando os parâmetros originais medidos, resolvido com escorregamento unitário. Tal procedimento foi realizado nos motores de 1,5 cv e 10 cv e foi observado que ambos têm o fator de correção igual a 1,29, este fator foi aplicado na corrente de partida dos dados de placa para utilização nos algoritmos.

Com o algoritmo proposto, é possível determinar os parâmetros do motor para cada conjunto de medições, criando um histórico dos parâmetros obtidos. Caso algum dos parâmetros exceda os limites do histórico, o algoritmo realizará outras medições e novos cálculos dos parâmetros. Se o problema persistir, o inspetor poderá solicitar a manutenção. Esse aspecto otimiza o processo de inspeção, reduzindo o tempo de inatividade das

máquinas para inspeção e, se necessário, manutenção.

O método detalhado nesta seção 3.3.2 foi implementado na API da plataforma de aplicação da seção 4.2 e seu *script* MATLAB® é parte do código de programação que encontra-se no Apêndice A.

3.3.3 Aplicação de Newton-Raphson para obtenção dos parâmetros do MIT

Semelhantemente a metodologia desenvolvida por Castro e Oliveira (2020) e adaptado por Paz (2023) na seção 3.3.2, o método desenvolvido por Pedrini e Brunoro (2021) foi implementado no MATLAB® e aplicado aos dois motores descritos na seção 3.3.1, permitindo estimar os parâmetros do MIT com base nos dados de placa e no valor conhecido da resistência do estator R_1 .

O método de Newton-Raphson, embora apresente convergência quadrática, depende de uma boa aproximação inicial para que o método convirja, implicando na solução da Equação 3.5.

Com auxílio da literatura estabeleceu-se equações, cuja eficácia já foi comprovada por outros autores para o cálculo dos valores iniciais. Assim, por meio da Equação 3.21 calcula-se uma aproximação inicial para a corrente do rotor I_2 ,

$$I_2 = I_1 f_p, \quad (3.21)$$

Com a Equação 3.22 obtém-se a tensão induzida no enrolamento de estator,

$$E_1 = V_1, \quad (3.22)$$

e por meio das Equações 3.16 e 3.17 determina-se uma aproximação para o parâmetro X_1 . A Equação 3.23 apresenta X_1 ,

$$X_1^{(0)} = \frac{\sqrt{\frac{V_{nom}^2}{I_{RB}^2} - (R_1 + R_2)^2}}{1 + \frac{1}{a}}. \quad (3.23)$$

Por meio de estudos do equacionamento clássico de máquinas elétricas se estabelece aproximações para X_m e R_2 , descritos nas Equações 3.24 e 3.25 respectivamente,

$$X_m^{(0)} = \frac{V_1}{Im(I_1)} \quad (3.24)$$

$$R_2^{(0)} = s \frac{V_1}{I_1 f_p} \quad (3.25)$$

Para se aplicar o método de Newton a um sistema de equações da forma $F(x)=0$, deve-se seguir os passos a seguir:

- Estabelecer o conjunto de equações $f_1(x_1, \dots, x_n)=0, \dots, f_n(x_1, \dots, x_n)=0$. Onde x_1, \dots, x_n são as variáveis independentes;
- Calcular a matriz jacobiana $J(x)$ dada pela Equação 3.4;
- Escolher uma aproximação inicial adequada para as variáveis independentes;
- A partir dos valores atuais, atualizá-los em uma nova iteração pela Equação 3.26, aplicado a operação de inversão da matriz jacobiana (inversa da matriz),

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - [J(x^{(k)})]^{-1} F(x^{(k)}) \quad (3.26)$$

- Averiguar se o erro $x^{(k+1)} - x^{(k)}$ se encontra dentro de uma tolerância estabelecida previamente. Caso negativo, voltar para o passo anterior.

Para R_c tendendo ao infinito, as Equações 3.27, 3.28 e 3.29 são válidas:

$$Re\left(\frac{V_1}{I_1}\right) = R_1 + \frac{\frac{R_2}{s} X_m^2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_2 + X_m)^2} \quad (3.27)$$

$$Im\left(\frac{V_1}{I_1}\right) = X_1 + \frac{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 X_m + X_2^2 \cdot X_m + X_2 \cdot X_m^2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_2 + X_m)^2} \quad (3.28)$$

$$I_{RB} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2 \cdot X_m^2}{R_2^2 + (X_2 + X_m)^2}\right)^2 + \left(X_1 + \frac{R_2^2 \cdot X_m + X_2^2 \cdot X_m + X_2 \cdot X_m^2}{R_2^2 + (X_2 + X_m)^2}\right)^2}} \quad (3.29)$$

As Equações 3.27, 3.28 e 3.29 são utilizadas para construir um sistema de equações $F(x)=0$ de tal modo que sua resolução leve à determinação dos parâmetros do MIT. Como há três equações, deve haver três variáveis independentes que são escolhidas como sendo R_2, X_2 e X_m . Como R_1 não é uma variável independente do sistema, então deve ser determinada por uma medição direta. V_1 e I_1 são ambos dados de placa.

Para transformar as equações 3.27, 3.28 e 3.29 para que fiquem na forma $F(x)=0$, basta subtrair o lado esquerdo de ambos os lados de cada equação. Deste modo, fica evidente

que as componentes de $F(x)$ se mostra nas Equações 3.30, 3.31 e 3.32:

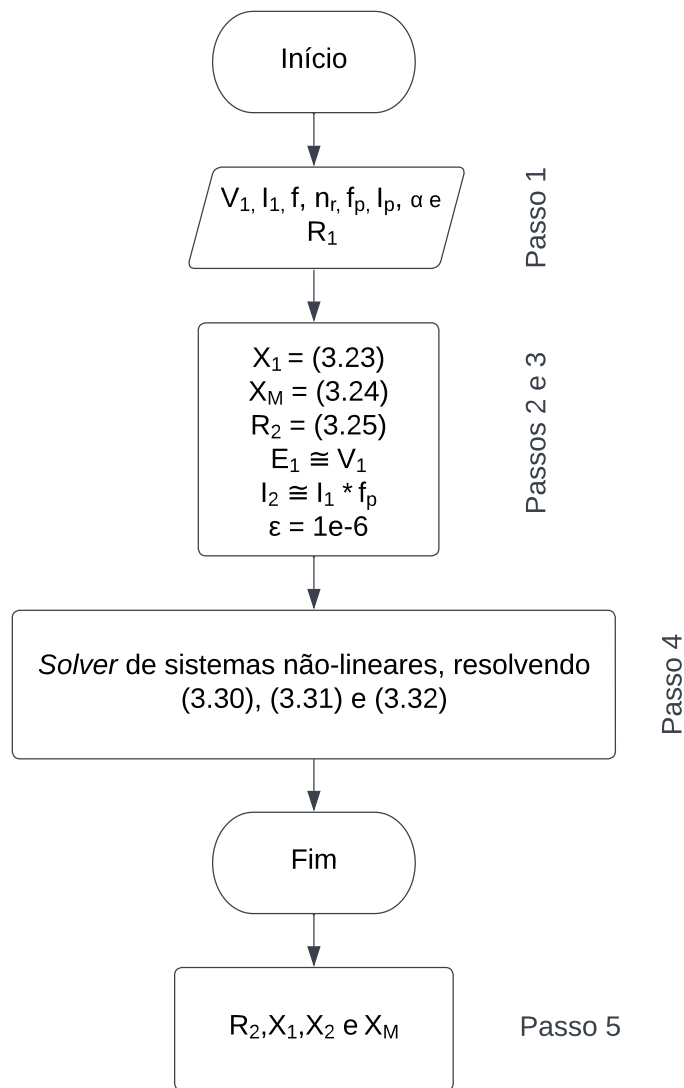
$$f_1(R_2, X_2, X_m) = R_1 + \frac{\frac{R_2}{s} X_m^2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_2 + X_m)^2} - Re\left(\frac{V_1}{I_1}\right), \quad (3.30)$$

$$f_2(R_2, X_2, X_m) = X_1 + \frac{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 X_m + X_2^2 \cdot X_m + X_2 \cdot X_m^2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_2 + X_m)^2} - Im\left(\frac{V_1}{I_1}\right), \quad (3.31)$$

$$f_3(R_2, X_2, X_m) = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2 \cdot X_m^2}{R_2^2 + (X_2 + X_m)^2}\right)^2 + \left(X_1 + \frac{R_2^2 \cdot X_m + X_2^2 \cdot X_m + X_2 \cdot X_m^2}{R_2^2 + (X_2 + X_m)^2}\right)^2}} - I_{RB}. \quad (3.32)$$

O método de solução proposto por Pedrini e Brunoro (2021) e adaptado por Paz (2023) para o método de Newton-Raphson é representado no fluxograma apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma do algoritmo de Newton-Raphson utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para facilitar o entendimento, o fluxograma é descrito a seguir:

1. Entrada dos valores V_1 , I_1 , f , n_r , f_p , I_p e α (obtidos por meio dos dados de placa) e R_1 (medido diretamente do estator).
2. Inicializar os valores das variáveis X_1 , X_m e R_2 com base nas Equações 3.23, 3.24 e 3.25 respectivamente.

3. Inicializar os valores de $E_1 \approx V_1$, $I_2 \approx I_1 f_p$ e ε .
4. Utilizar um *solver* de sistemas não-lineares, no caso o *fsolve* do MATLAB[®], para solução do sistema de equações 3.30, 3.31 e 3.32, com R_1 e os valores iniciais de X_1, X_m e R_2 como parâmetros de entrada para o *solver*.
5. Mostrar Resultados R_2, X_1, X_2 e X_m .

O método detalhado nesta seção 3.3.3 foi implementado na API da plataforma de aplicação da seção 4.2 e seu *script* MATLAB[®] também é parte do código de programação que encontra-se no Apêndice A.

3.4 Esforço computacional

Em síntese, o método de Gauss-Seidel e o método de Newton-Raphson são dois algoritmos iterativos utilizados para resolver problemas matemáticos complexos, em que cada um possui o seu custo computacional que varia dependendo da natureza do problema.

O algoritmo proposto por Castro e Oliveira (2020) é matematicamente simples, o que possibilita que os dados das medições sejam inseridos diretamente em um computador ou enviados para um aplicativo que, em tempo real, fornece os resultados e compara com o histórico do equipamento, permitindo inspeções que identifiquem possíveis anomalias no funcionamento da máquina.

Segundo Chapra e Canale (2016), o custo computacional de métodos da categoria do de Newton-Raphson depende principalmente do número de interações necessárias para encontrar a raiz da função. Cada interação do algoritmo envolve o cálculo da derivada da função, o que pode ser computacionalmente caro em algumas situações podendo ainda não convergir para a raiz da função se as condições iniciais não forem escolhidas adequadamente, assim, aumentando o custo e esforço computacional.

Por sua vez, o método de Gauss-Seidel é um algoritmo iterativo capaz de resolver sistemas grandes e complexos de equações lineares. Ele envolve a iteração sobre variáveis do sistema até que uma solução aproximada seja encontrada. A cada iteração, o método atualiza as variáveis uma a uma, usando as equações restantes do sistema que ainda não foram atualizadas, como observado no algoritmo proposto por Lee *et al.* (2012) que é capaz de estimar os parâmetros do circuito equivalente do MIT por meio da atualização dos valores das variáveis. Portanto, o esforço computacional do método de Gauss é proporcional ao número de iterações necessárias para encontrar a solução satisfatória.

Por fim, os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson possuem o mesmo tipo de esforço computacional, envolvendo as iterações. O que difere um método do outro é a forma como o algoritmo passa de uma iteração para a próxima. No caso de estudo de aproximação dos parâmetros dos motores, há uma limitação computacional que envolve a necessidade dos dados de performance da máquina para carregamentos e de outros dados que não sejam a plena carga.

3.5 Resultados e discussões

A partir dos resultados decorrentes da pesquisa científica realizada Castro e Oliveira (2020) e Pedrini e Brunoro (2021) e implementada por Paz (2023) em sua metodologia proposta, obteve-se a estimação paramétrica do MIT por meio dos dados construtivos, utilizando os métodos numéricos Gauss-Seide e Newton-Raphson. As conclusões que podem ser tiradas a partir dos resultados indicam que os parâmetros calculados usando a abordagem sugerida demonstraram uma margem de erro reduzida em relação aos parâmetros esperados.

Os valores comparativos de impedância, bem como o erro relativo entre a impedância nominal e estimada apresentados nesta seção 3.5, permitem concluir que a metodologia proposta possibilitou a determinação dos parâmetros do CE de forma satisfatória.

A Tabela 6 apresenta os resultados utilizando o algoritmo baseado em Gauss-Seidel aplicado aos motores.

Tabela 6 – Resultados com Gauss-Seidel para os parâmetros nos MITs

Parâmetros	1,5 cv	10 cv
R_1 (Ω)	5,8	1,653
X_1 (Ω)	5,8734	3,2979
X_m (Ω)	175,0746	85,485
R_2 (Ω)	4,3048	1,0665
X_2 (Ω)	5,8734	3,2979

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 apresenta os erros percentuais obtidos utilizando o algoritmo baseado em Gauss-Seidel aplicado aos motores.

Tabela 7 – Erro percentual pelo método de Gauss-Seidel nos MITs

Parâmetros	1,5 cv	10 cv
$R_1 (\Omega)$	0,00%	0,00%
$X_1 (\Omega)$	-0,4508%	-0,7553%
$X_m (\Omega)$	2,8640%	-6,3589%
$R_2 (\Omega)$	-4,3378%	5,2813%
$X_2 (\Omega)$	-17,2761%	-5,5855%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta os resultados utilizando o algoritmo baseado em Newton-Raphson aplicado aos motores.

Tabela 8 – Resultados com o Newton-Raphson para os parâmetros nos MITs

Parâmetros	1,5 cv	10 cv
$R_1 (\Omega)$	5,8	1,653
$X_1 (\Omega)$	6.0442	3.3787
$X_m (\Omega)$	176.5056	84.062
$R_2 (\Omega)$	4.3059	1.04
$X_2 (\Omega)$	6.0442	3.3787

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 9 apresenta os erros percentuais obtidos utilizando o algoritmo baseado em Newton-Raphson aplicado aos motores.

Tabela 9 – Erro percentual pelo método de Newton-Raphson nos MITs

Parâmetros	1,5 cv	10 cv
$R_1 (\Omega)$	0,00%	0,00%
$X_1 (\Omega)$	2,4441%	1,6762%
$X_m (\Omega)$	3,7048%	-7,9176%
$R_2 (\Omega)$	-4,3133%	2,6654%
$X_2 (\Omega)$	-14,8704%	-3,2723%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros nominais do motor de indução, obtidos pela metodologia proposta, podem servir como dados comparativos entre os parâmetros reais determinados por outros métodos. Desta forma, é possível realizar estudos em busca de problemas técnicos

na máquina, já que as alterações dos parâmetros são indicativos de defeitos, que podem comprometer o funcionamento da máquina. Portanto, o conhecimento dos parâmetros nominais do motor poderá auxiliar no diagnóstico de falhas, bem como na realização de estudos de eficiência energética aplicadas aos motores usados nos diversos seguimentos industriais.

A metodologia proposta por Paz (2023) foi incorporada a plataforma IIoT desenvolvida, que será apresentada no Capítulo 4.

4 PLATAFORMA IIOT NÃO INVASIVA PARA MONITORAMENTO DE MIT

Neste capítulo apresenta-se o conceito de IIoT, suas aplicações e desafios inerentes que a acompanham. Apresenta-se cada um dos recursos tecnológicos usados na plataforma IIoT desenvolvida, suas características e suas funcionalidades, bem como as ferramentas de *software* para análise e visualização do carregamento dos MITs. É apresentado um teste de comunicação e funcionalidade em ambiente industrial. E são expostos os resultados obtidos através da comparação das curvas de carregamento pelos três métodos abordados.

4.1 IIoT

A IIoT refere-se à extensão da *Internet of Things* (IoT) para ambientes industriais, permitindo a interconexão de dispositivos, máquinas e sistemas em setores como manufatura, energia, agricultura e transporte.

Ferramentas IIoT emergiram como uma revolução tecnológica que está transformando fundamentalmente os setores industriais em todo o mundo. A convergência da conectividade de dispositivos, análise de dados e automação tem possibilitado uma série de aplicações inovadoras em diversos domínios industriais.

4.1.1 Aplicações de IIoT

Uma das principais aplicações da IIoT é o monitoramento remoto contínuo de ativos industriais, permitindo a detecção precoce de anomalias e falhas iminentes. Sensores colocados em máquinas e equipamentos coletam dados em tempo real, que são então analisados por algoritmos de aprendizado de máquina para identificar padrões de comportamento. Isso possibilita a manutenção preditiva, que reduz os custos associados a paradas não planejadas, otimiza a utilização de recursos e aumenta a eficiência operacional (LEE; LEE, 2015).

Para Tao *et al.* (2017) a IIoT também desempenha um papel vital na otimização de processos industriais. A coleta de dados em tempo real de várias etapas de produção permite a análise detalhada do fluxo de trabalho. Com base nessas análises, os gestores podem identificar gargalos, ineficiências e áreas de melhoria. A automação avançada, impulsionada pela IIoT, permite ajustes em tempo real para otimizar a produção e minimizar o desperdício.

Outra aplicação de IIoT mostra-se na logística e na cadeia de suprimentos que tem impactado positivamente a rastreabilidade, visibilidade e eficiência. Sensores conectados a contêineres, veículos e centros de distribuição fornecem informações precisas sobre o status e a localização dos produtos em trânsito. Isso permite a programação precisa da entrega, reduzindo atrasos e custos associados ao gerenciamento de inventário (IVANOV; DOLGUI, 2020).

4.1.2 IIoT e recursos de Cloud

Para Bonomi *et al.* (2012), convergência da IIoT e os recursos de computação em nuvem tem desempenhado um papel fundamental na transformação digital das indústrias, oferecendo uma infraestrutura sólida e escalável para a coleta, processamento e análise de dados provenientes de dispositivos conectados. Enquanto isso, a computação em nuvem disponibiliza recursos computacionais, como armazenamento, processamento e serviços, por meio da internet, oferecendo uma plataforma flexível para atender às demandas variáveis de processamento e armazenamento dos dados gerados pela IIoT.

A computação em nuvem tem emergido como uma solução viável para lidar com os desafios relacionados à gestão, processamento e análise de grandes volumes de dados da IIoT. As características fundamentais da nuvem, como escalabilidade sob demanda, elasticidade e provisionamento automatizado, oferecem a flexibilidade necessária para lidar com as flutuações no fluxo de dados da IIoT (HERMAN *et al.*, 2020). Além disso, a nuvem proporciona serviços de armazenamento em larga escala, como armazenamento de objetos e bancos de dados distribuídos, como o *JavaScript Object Notation* (JSON) que é um modelo para armazenamento e transmissão de informações no formato texto e que apesar de muito simples, tem sido bastante utilizado por aplicações *Web* devido a sua capacidade de estruturar informações, adequado para a retenção de dados históricos gerados pela IIoT (ASIMINIDIS *et al.*, 2019).

A capacidade de integração oferecida pela nuvem é especialmente vantajosa para utilizar poderosas ferramentas computacionais, a exemplo do MATLAB®, na aplicação de algoritmos de análise de dados complexos, como aprendizado de máquina e inteligência artificial, para extrair *insights* valiosos dos dados brutos da IIoT.

4.1.3 IIoT e sistemas não invasivos

Uma vertente promissora da IIoT é a aplicação de sistemas não invasivos, que visam monitorar, controlar e interagir com sistemas industriais sem a necessidade de interrupções nos processos em andamento. Os sistemas não invasivos têm o potencial de reduzir os custos associados à manutenção e paradas de produção, uma vez que eliminam a necessidade de desligar equipamentos ou interromper linhas de produção para realizar medições ou ajustes (AHMED *et al.*, 2023).

Os sistemas não invasivos se beneficiam da integração de uma variedade de tecnologias, como sensores de monitoramento remoto, técnicas de processamento de sinais avançadas e algoritmos de aprendizado de máquina. Essas tecnologias permitem a coleta contínua de dados em tempo real, a detecção de anomalias e a previsão de falhas iminentes. Além disso, a aplicação de técnicas de controle não invasivas possibilita o ajuste e otimização de parâmetros operacionais sem perturbar o funcionamento normal dos sistemas (TAO *et al.*, 2014).

Um exemplo concreto de aplicação de sistemas não invasivos na indústria é a manutenção preditiva. Ao monitorar constantemente o estado de equipamentos e máquinas através de sensores, é possível identificar padrões de degradação e desgaste, permitindo a realização de manutenções preventivas antes que ocorram falhas catastróficas. Isso resulta em uma maior disponibilidade dos sistemas, redução de custos de manutenção e aumento da eficiência operacional.

Para a implementação eficaz de sistemas não invasivos na IIoT, desafios técnicos e de segurança devem ser abordados. A integração perfeita de dispositivos de monitoramento, a garantia da privacidade e proteção dos dados coletados, bem como a interoperabilidade entre diferentes sistemas são aspectos críticos a serem considerados (LEE; LEE, 2015).

4.1.4 Desafios para a implementação de IIoT

Segundo Ray (2018) a crescente interconectividade da IIoT traz consigo desafios significativos de segurança cibernética. A exposição a ataques cibernéticos pode resultar em interrupções graves da produção, vazamento de dados confidenciais e até mesmo riscos físicos. A natureza heterogênea dos dispositivos conectados dificulta a implementação de

medidas de segurança uniformes, tornando imperativo o desenvolvimento de abordagens robustas para proteger os ecossistemas IIoT.

Para Koleva (2018), adoção da IIoT muitas vezes implica em integrar sistemas legados, que são plataformas ou *softwares* que estão ultrapassados, com as novas tecnologias. Isso pode ser um desafio, já que sistemas mais antigos podem não ser compatíveis com os protocolos de comunicação modernos. A migração suave e a interoperabilidade entre sistemas heterogêneos são cruciais para evitar interrupções e garantir a continuidade operacional.

A heterogeneidade dos dispositivos, protocolos e plataformas na IIoT dificulta a interoperabilidade perfeita entre eles. A falta de padrões uniformes pode resultar em barreiras para a troca de dados entre dispositivos de diferentes fabricantes e, conseqüentemente, limitar a capacidade de obter *insights* abrangentes. A definição e adoção de padrões abertos são essenciais para promover a colaboração e o crescimento sustentável da IIoT (XU *et al.*, 2014).

A adoção bem-sucedida da IIoT requer uma mudança cultural dentro das organizações. Isso inclui a capacitação dos funcionários para operar e entender as novas tecnologias, bem como uma mentalidade aberta à inovação e à transformação digital (CHI *et al.*, 2020). Superar a resistência à mudança e promover uma cultura de aprendizado contínuo são desafios que também impactam diretamente a implementação da IIoT.

Em conclusão, a implementação da IIoT nos dias atuais apresenta uma série de desafios intrincados que vão desde a segurança cibernética até a cultura organizacional. A abordagem desses desafios exige uma colaboração interdisciplinar entre engenheiros, cientistas de dados, especialistas em segurança cibernética, reguladores e gestores. Ao superar esses desafios, a IIoT tem o potencial de transformar significativamente as indústrias e impulsionar a eficiência operacional e a inovação.

4.2 Descrições da plataforma IIoT proposta

A plataforma IIoT desenvolvida nesta dissertação é voltada à análise de eficiência energética nos MITs, uma vez que é possível acompanhar, em tempo real e de maneira remota, o carregamento do motor elétrico, este um indicador de rendimento, possibilitando a comparação dos dados de carregamento segundo o método da linearização da corrente e os métodos iterativos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson através dos valores estimados

dos parâmetros do CE.

Esta plataforma é composta por:

- *Message broker* MQTT, que possibilita a comunicação entre os recursos de *hardware* e *software*;
- Dispositivos de *hardware* (instalados junto ao MIT em análise);
- *Script* executável no MATLAB® (que também está hospedado em um servidor de aplicação);
- API instanciada no *Node-Red* (que por sua vez está hospedado em um servidor de aplicação).

Neste capítulo serão apresentados cada um dos recursos tecnológicos usados na plataforma IIoT, suas características e suas funcionalidades, bem como as ferramentas de *software* para análise e visualização do carregamento dos MITs. É apresentado um teste de comunicação e funcionalidade em ambiente industrial. E são expostos os resultados obtidos através da comparação das curvas de carregamento pelos três métodos abordados.

Na Figura 11 é ilustrada a interação dos recursos tecnológicos que compõem plataforma IIoT desenvolvida.

Figura 11 – Interação dos recursos tecnológicos que compõem plataforma IIoT



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 O Cloud MQTT

O *MQ Telemetry Transport* (MQTT) é um protocolo de mensagens proeminente e leve, projetado para comunicações entre dispositivos em rede e para gerenciar com eficiência dados originados da IoT, este protocolo de transporte de mensagens é usado por diferentes aplicações para coletar e distribuir dados. Cada mensagem MQTT é composta por um tópico e um payload, onde o primeiro caracteriza o conteúdo da mensagem e o segundo contém os próprios dados a transmitir (BORSATTI *et al.*, 2020).

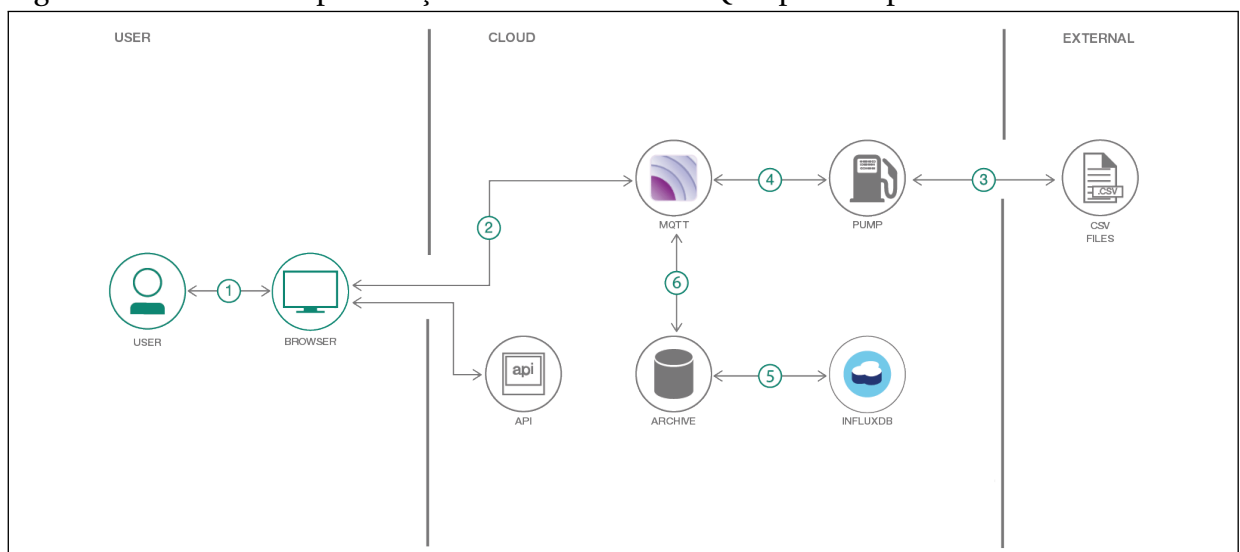
Assim, o *message broker Cloud MQTT* é uma solução, baseada no protocolo MQTT, para mensagens de IoT entre sensores ou dispositivos móveis, como telefones, computadores embarcados ou microcontroladores; responsável por gerenciar e automatizar o fluxo de dados, o *Cloud MQTT* é um intermediário de mensagens hospedadas.

O protocolo MQTT define dois tipos de entidades na rede:

- O *message broker*, que é um servidor que interliga os clientes recebendo e enviando suas mensagens aos destinatários relevantes, conforme suas assinaturas e o tópico da mensagem;
- O cliente, que é definido como qualquer elemento que pode interagir com o *message broker*.

A Figura 12 ilustra a interação entre o *message broker Cloud MQTT* e os clientes usuários.

Figura 12 – Modelo de publicação e assinatura do MQTT para dispositivos de IIoT



Fonte: Dague (2018).

A interação na troca de dados, em um sistema que usa um *message broker*, segue a ordem:

- O cliente se conecta ao *message broker*, mediante a assinatura no tópico de mensagem desejado;
- O cliente publica as mensagens em um tópico, enviando a mensagem e o tópico ao *message broker*;
- O *message broker* encaminha a mensagem a todos os clientes que assinam esse tópico.

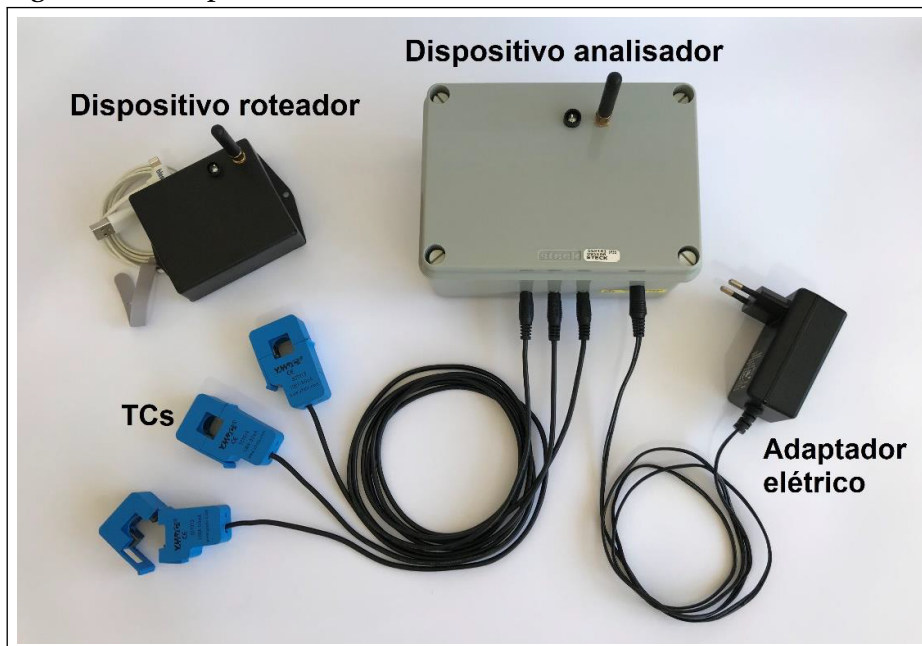
Na plataforma IIoT desenvolvida, o *message broker Cloud MQTT* tem função de conectar o dispositivo roteador com a API desenvolvida no *Node-Red* e , que está hospedado no IBM Cloud.

O *message broker Cloud MQTT* tem função de conectar o dispositivo roteador, a API desenvolvida no *Node-Red* e o *script MATLAB®* executável.

4.2.2 Os dispositivos de hardware

A plataforma IIoT é composta por dois dispositivos de *hardware* com funcionalidades distintas: analisador e roteador; ambos dispositivos mostrados na Figura 13.

Figura 13 – Dispositivos roteador e analisador



Fonte: Elaborado pelo autor.

O dispositivo analisador possui a função de coletar, tratar, processar e calcular os valores *true RMS* de corrente do MIT, enviando essas informações através do protocolo

LoRaWAN® para o dispositivo roteador; por sua vez, este possui a função de encaminhar as informações recebidas para a API através de comunicação *Wi-Fi*.

Os diagramas dos dispositivos analisador e roteador são simples e funcionais atendendo aos propósitos deste trabalho e estão apresentados no Apêndice E e Apêndice F, respectivamente.

A medição de corrente elétrica é realizada através de sensores de corrente Transformador de Corrente (TC) tipo núcleo dividido, sem que seja necessário seccionar o condutor do MIT em análise. O microcontrolador utilizado é o *Wi-Fi* LoRa 32 que fornece interoperabilidade contínua e permite aplicações IIoT. A utilização do microcontrolador *Wi-Fi* LoRa 32 se justifica, pois, a plataforma IIoT pode coletar dados remotamente, simplificando as operações e possibilitando o uso do corpo técnico com mais eficiência; além disso, proporciona a comunicação dos dispositivos de *hardware* com a API.

Os microcontroladores, que possuem entradas analógicas, permitem medir tensão contínua ou tensões que variam no tempo, por meio de seus canais de conversão analógico digital. Entretanto, esses canais só medem tensões positivas e dentro de uma faixa limitada. No caso do microcontrolador *Wi-Fi* LoRa 32, as tensões de aquisição devem estar entre 0 e 3,3 V, de acordo com o datasheet presente no Anexo A.

Por meio da conversão analógico digital é possível a realização de operações matemáticas pelo microcontrolador. A precisão desta conversão é diretamente proporcional à resolução do conversor analógico digital, de forma que, quanto maior o comprimento do conversor, em bits, maior a sua resolução.

O dispositivo analisador é equipado com uma bateria e sistema de recarga que possibilita uma autonomia nas análises.

4.2.3 O script MATLAB

O termo MATLAB® é uma abreviação da expressão *Matrix Laboratory* ou laboratório de matrizes, em português, é um *software* de programação e ambiente de computação numérica amplamente utilizado entre engenheiros e cientistas. O MATLAB® oferece uma variedade de recursos para manipulação de matrizes, visualização de dados, programação, simulações e modelagem, processamento de sinais e imagens e integração com *hardware* (MATLAB, 2012).

No âmbito da automação e troca eficiente de dados, a combinação de um *script*

MATLAB® executável com o protocolo MQTT oferece uma abordagem poderosa para a integração de sistemas com análises e processamento avançado de dados. Ao transformar um *script* MATLAB® em um executável, é possível compartilhar algoritmos complexos e análises com outros usuários sem a necessidade de compartilhar o código-fonte. Isso preserva a propriedade intelectual enquanto permite a utilização prática das funcionalidades implementadas.

Ao utilizar o protocolo MQTT nesse cenário se ganha uma solução dinâmica para distribuir resultados de análises em tempo real. O MQTT permite a comunicação assíncrona entre dispositivos e aplicativos, sendo particularmente essencial para a integração do MATLAB® à plataforma IIoT proposta nesta dissertação.

Ao incorporar o protocolo MQTT ao *script* MATLAB® executável, os resultados das análises e cálculos iterativos são enviados como mensagens para tópicos no *message broker* MQTT usado, permitindo que outros sistemas recebam, processem e respondam a essas informações em tempo real. Isso abre portas para sistemas de controle e tomada de decisão, enriquecendo a interconexão entre análise avançada e automação eficiente.

O *script* executável MATLAB® elaborado nesta dissertação encontra-se no Apêndice A.

4.2.4 A API no Node-Red

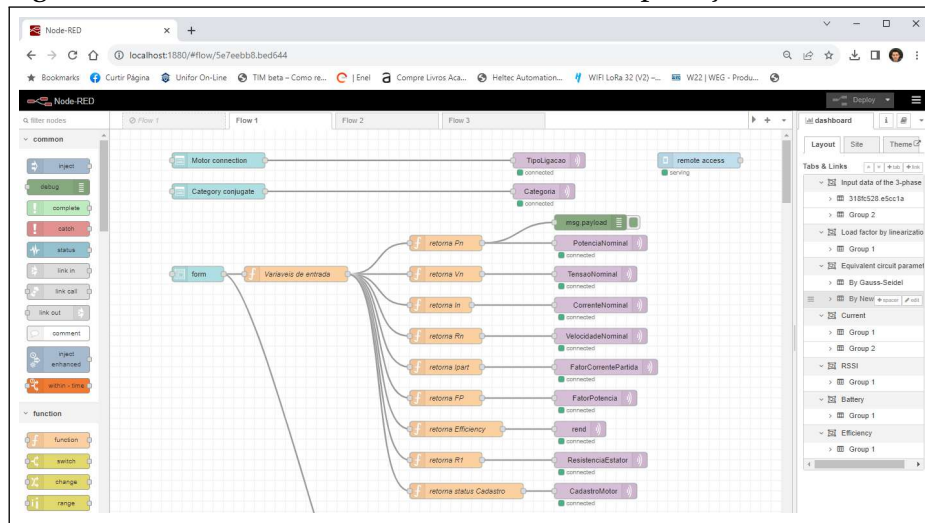
A API foi elaborada utilizando um conjunto de serviços de computação em nuvem e protocolo de rede para IIoT, que permitem:

- Acesso fácil, rápido e dinâmico de qualquer lugar com conexão à internet;
- Visualização em tempo real;
- Armazenamento das informações em banco de dados;
- Portabilidade para os diversos dispositivos com conectividade;
- Compartilhamento com vários usuários;
- Elaboração de interfaces e telas intuitivas.

4.2.4.1 O Node-Red

O *Node-Red* é uma ferramenta de programação baseada em fluxos, com o propósito de facilitar o desenvolvimento de APIs, conectando dispositivos de *hardware* à serviços *online*. A Figura 14 mostra o ambiente de desenvolvimento da aplicação *Node-Red*.

Figura 14 – Ambiente de desenvolvimento da aplicação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desenvolvido em 2013 pela equipe de serviços de tecnologia emergente da IBM, hoje é parte da JS Foundation como projeto *open source* e está disponível para execução em servidores locais, dispositivos embarcados ou em servidores particulares (NODE-RED, 2023).

Um servidor local de aplicação refere-se a configurar e executar um aplicativo em um computador ou em um servidor local, em vez de usar um ambiente de nuvem ou hospedagem externa.

O *Node-Red* hospedado em um servidor local conectado a *internet* é utilizado nesta dissertação para viabilizar a elaboração da API que proporciona acesso fácil e visualização em tempo real dos valores de carregamento segundo os métodos apresentados, por meio das informações inseridas pelo usuário, no ambiente da API, e por meio das informações advindas dos dispositivos de *hardware*, por intermédio do *Cloud MQTT*.

4.2.4.2 Telas da API

A plataforma IIoT oferece, um ambiente intuitivo para inserção dos dados de placa e visualização do carregamento segundo o método da linearização, o método de Gauss-Seidel e o método de Newton-Raphson. O uso da API se dá por quaisquer dispositivos com acesso à internet que tenham permissão para visualizar a análise. Vale ressaltar que mais de um dispositivo pode acessar a aplicação simultaneamente.

Após acessar à API, será visualizada a tela início da aplicação, como mostra a Figura 15; realiza-se a inserção dos dados nominais do MIT em análise na aplicação e clica

em SUBMIT.

Figura 15 – Tela de início (inserção de dados)

Input data of the 3-phase IM

Motor connection Star connection

Category conjugate A/N/NY

Shaft power (HP-cv)

Rated voltage (V)

Rated current (A)

Rated speed (rpm)

Starting current factor

Power factor

Efficiency (%)

Winding resistance (Ω)

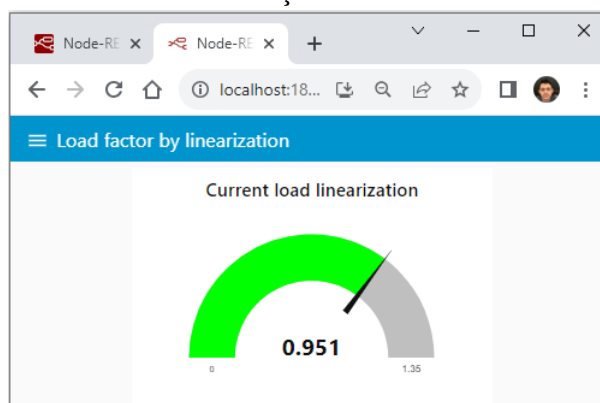
No load current (A)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a confirmação dos dados nominais no botão SUBMIT, a aplicação ficará em *stand-by* até que os dispositivos de *hardware* da plataforma IIoT iniciem o envio dos dados coletados junto ao MIT em análise.

A Figura 16, apresenta o carregamento, em tempo real, segundo o método de linearização da corrente (SANTOS *et al.*, 2022).

Figura 16 – Tela do carregamento segundo o método de linearização da corrente



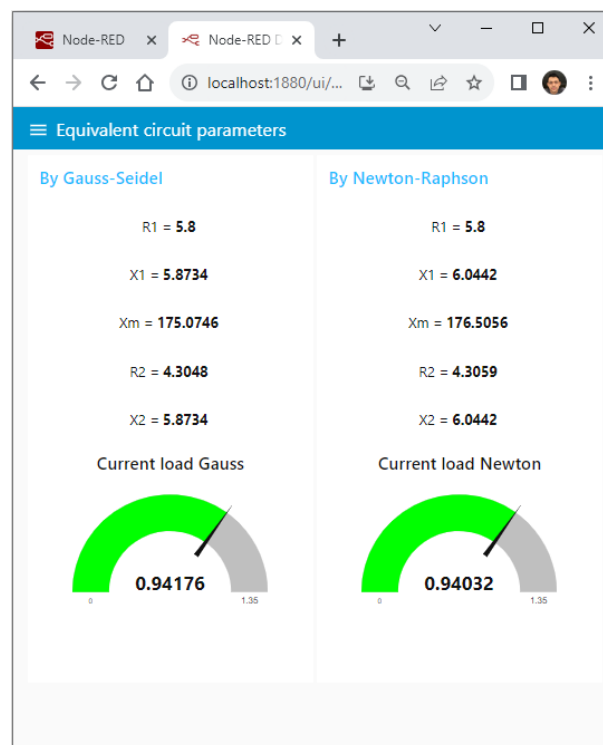
Fonte: Elaborado pelo autor.

Andrade (2009) ressalta que este método, não invasivo, parte do princípio de que a potência de saída é proporcional à corrente de entrada do MIT e que possui maior precisão que alguns dos métodos da categoria escorregamento; contudo, o erro do método da linearização da corrente, de até $\pm 10\%$, classificado como erro aceitável pela comunidade acadêmica.

A partir da inserção dos dados de placa do motor em análise na plataforma proposta, por meio da tela de início da aplicação, mostrada na Figura 15, e pelo recebimento dos valores de corrente RMS coletados pelo dispositivo analisado, são calculados os parâmetros do CE e o carregamento segundo os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson.

A Figura 17 ilustra a tela dos parâmetros do circuito equivalente onde é possível verificar os valores de R_1 , X_1 , X_M , R_2 e X_2 e analisar o carregamento, em tempo real, segundo os métodos iterativo de Gauss-Seidel e Newton-Raphson, descritos na seção 3.3 desta dissertação.

Figura 17 – Tela do carregamento segundo os métodos numéricos

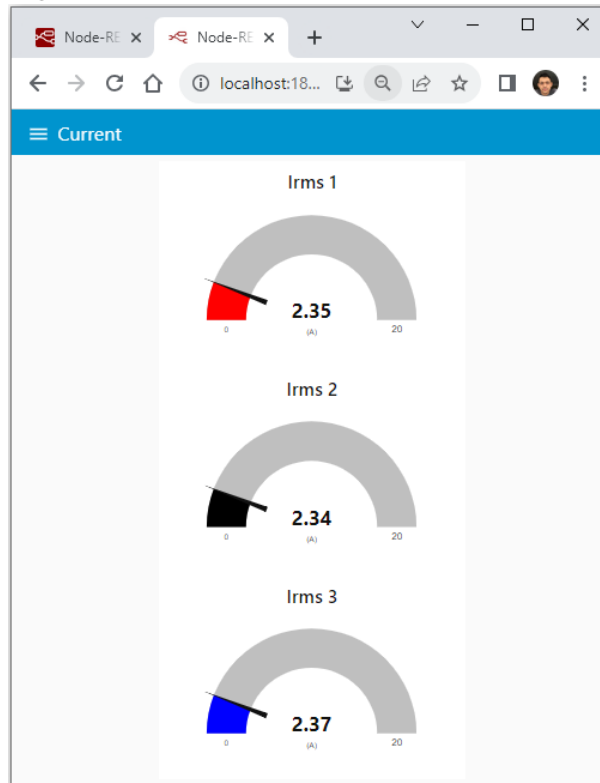


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 18 mostra a tela de leitura das correntes trifásicas onde pode-se observar a intensidade das correntes RMS para cada fase do MIT em análise, medidas pelo dispositivo analisador. Através dos valores de corrente apresentados nesta tela, torna-se possível a

detecção de possíveis desequilíbrios no módulo das correntes.

Figura 18 – Tela de leitura das correntes

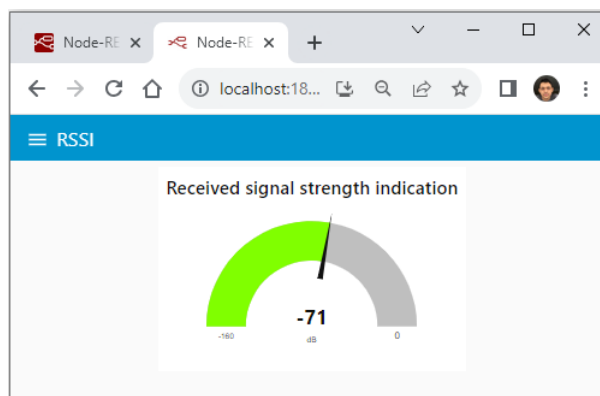


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de *Received Signal Strength Indication* (RSSI), representam uma medida relativa que ajuda a determinar se o sinal recebido é forte o suficiente para obter uma boa conexão sem fio entre os dispositivos de *hardware* da plataforma.

Outra das tela que da API desenvolvida é a tela de leitura da intensidade do sinal RSSI, ilustrada na Figura 19.

Figura 19 – Tela de leitura da intensidade do sinal RSSI

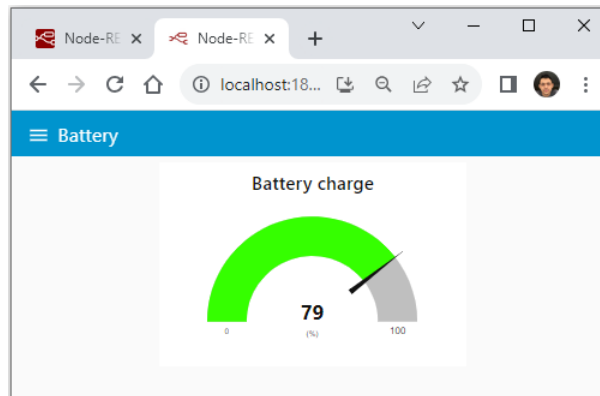


Fonte: Elaborado pelo autor.

O recurso do sinal RSSI, bem como o teste de comunicação realizado é abordado na seção 4.2.5 desta dissertação.

A bateria recarregável utilizada no dispositivo analisador possibilita uma autonomia no monitoramento, isto é, sem que o dispositivo esteja sendo alimentado pela rede elétrica. Assim, faz-se necessário ter na API uma tela de percentagem de carga da bateria. A Figura 20 mostra a tela que indica o nível de carga da bateria durante a operação.

Figura 20 – Tela de percentagem de carga da bateria



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 *Teste de comunicação e funcionalidade em ambiente industrial*

A plataforma IIoT foi testada na indústria TBM Têxtil, com o auxílio da equipe de manutenção elétrica, que é responsável pelos procedimentos preventivos, preditivos e corretivos em todas as instalações e máquinas da indústria, e com a devida autorização foi analisado o MIT principal de uma carda mostrada nas Figuras 21 e 22. A carda é uma máquina têxtil responsável pela paralelização das fibras do algodão, produzindo um véu ou fita de fibras adequada aos passos seguintes do processo têxtil.

Figura 21 – Grupo de cardas



Fonte: Elaborado pelo autor.

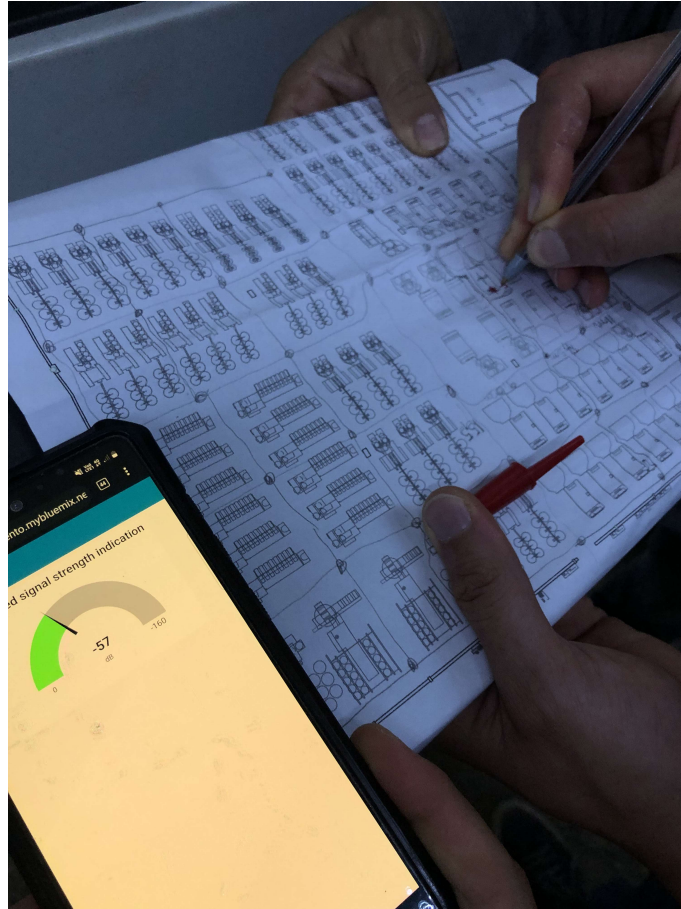
Figura 22 – Painel elétrico da carda onde foi instalado o dispositivo analisador



Fonte: Elaborado pelo autor.

O teste teve como objetivo principal registrar os valores de RSSI, que é uma medida relativa que ajuda a determinar se o sinal recebido é forte o suficiente para obter uma boa conexão sem fio entre os dispositivos de *hardware* da plataforma. A Figura 23 mostra uma medida de RSSI observada através da plataforma IIoT.

Figura 23 – Indicação de intensidade do sinal recebido em um dado ponto



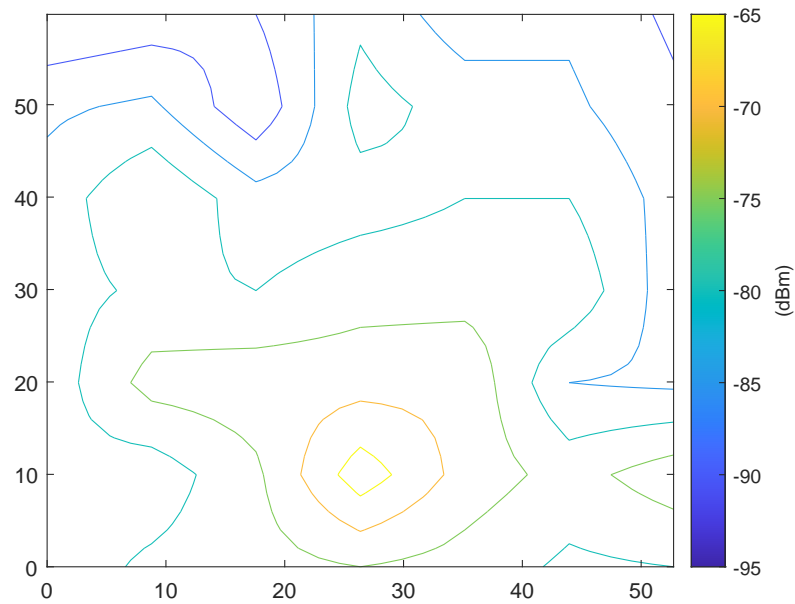
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a comunicação LoRaWAN® oferece suporte à comunicação bidirecional, o RSSI é uma medida importante para gateways e dispositivos finais. RSSI é medido em dBm e seu valor é um valor negativo. Quanto mais próximo o valor do RSSI estiver de zero, mais forte será o sinal recebido (TESSARO *et al.*, 2018).

Através de um teste de distância na Universidade Federal do Ceará - Campus do Pici, verificou-se que a comunicação entre os dispositivos analisador e roteador era comprometida quanto o RSSI atingia valores abaixo de -120 dBm .

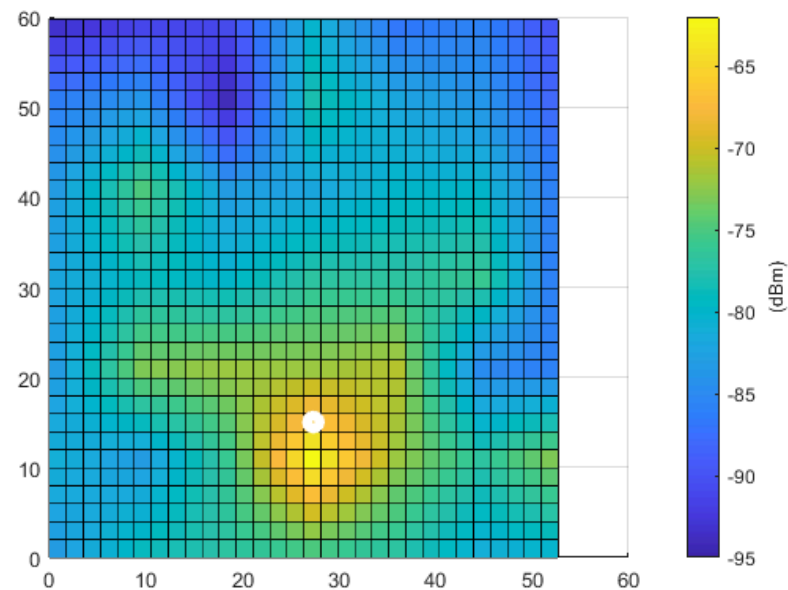
Entretanto, os valores de RSSI do teste realizado na indústria TBM Têxtil, nos pontos destacados na planta baixa do Apêndice B, mostraram valores acima do valor de perda da integridade da informação em um pátio fabril com varias máquinas têxteis funcionando ininterruptamente, como mostram as Figuras 24 e 25. Comprovando a baixa latência, entre a transmissão e recepção dos dados, e se mostrando eletromagneticamente compatível.

Figura 24 – Gráfico de contorno RSSI da planta baixa (em dBm) com o maquinário têxtil em funcionamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Plotagem da superfície RSSI da planta baixa (em dBm) com indicação do ponto de emissão do sinal LoRa



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.6 Análise de custo simplificado

A análise de custo do protótipo pode ser visualizada na Tabela 10; os custos mostrados representam os valores totais para o projeto final; o item "Outros" representa o somatório de pequenos elementos no projeto como cabos, conectores, parafusos, resistores e capacitores.

Tabela 10 – Análise de custo do protótipo

Item	Produto	Quantidade	Preço unitário	Preço total
1	Microcontrolador Wi-Fi LoRa 32 V2	2	R\$ 96,25	R\$ 192,50
2	TC SCT-013-000	3	R\$ 44,90	R\$ 134,70
3	Bateria life 1500 mAh 9.9 V	1	R\$ 150,00	R\$ 150,00
4	Carregador balanceador	1	R\$ 122,00	R\$ 122,00
5	Regulador de tensão SBEC 5A	1	R\$ 55,00	R\$ 55,00
6	Outros	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00
Total				R\$ 754,20

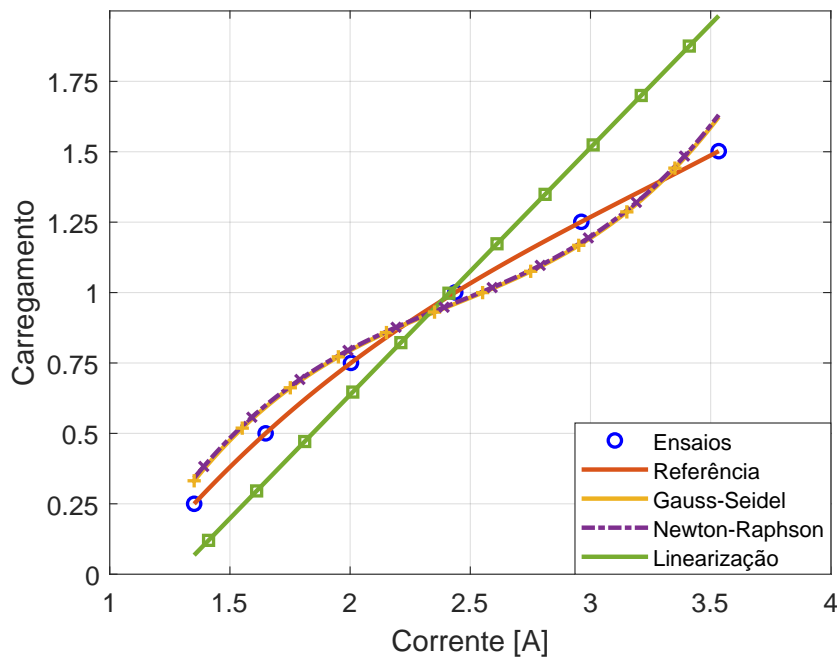
Fonte: Elaborado pelo autor.

O levantamento de custo final da plataforma IIoT, orçou em R\$ 754,20; o custo final do protótipo é composto apenas dos valores associados à aquisição dos recursos de *hardware*, pois há gratuidade ao utilizar os recursos de *software*.

4.3 Resultados experimentais

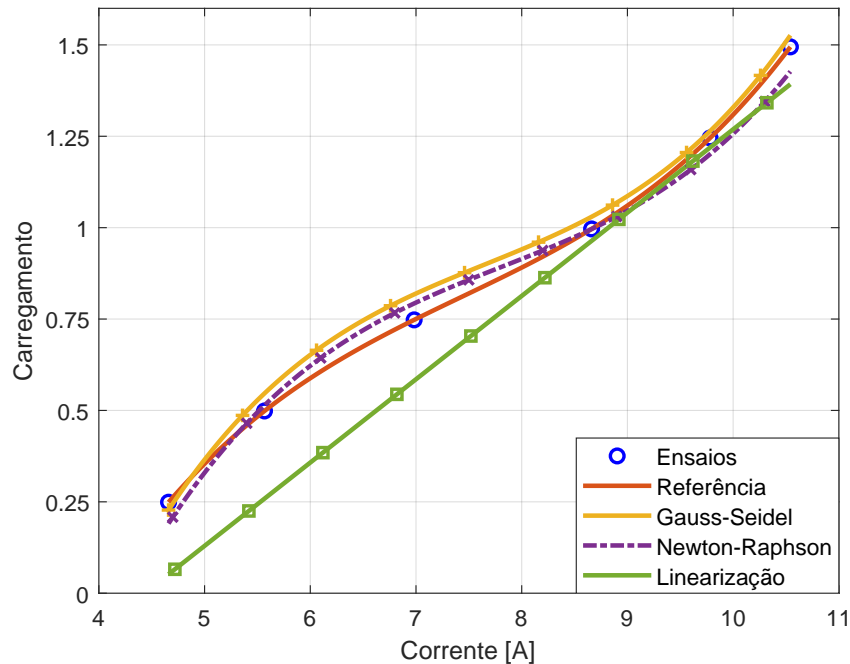
Através dos *scripts* do Apêndice C e D, foram geradas as Figuras 26 e 27, onde é possível comparar as curvas de carregamento *versus* corrente dos métodos com a curva de carregamento *versus* corrente do ensaio realizado nos MITs de 1,5 cv e 10 cv, respectivamente.

Figura 26 – Comparação das curvas de Carregamento *versus* Corrente entre os métodos aplicados ao motor de 1,5 cv



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Comparação das curvas de Carregamento *versus* Corrente entre os métodos aplicados ao motor de 10 cv



Fonte: Elaborado pelo autor.

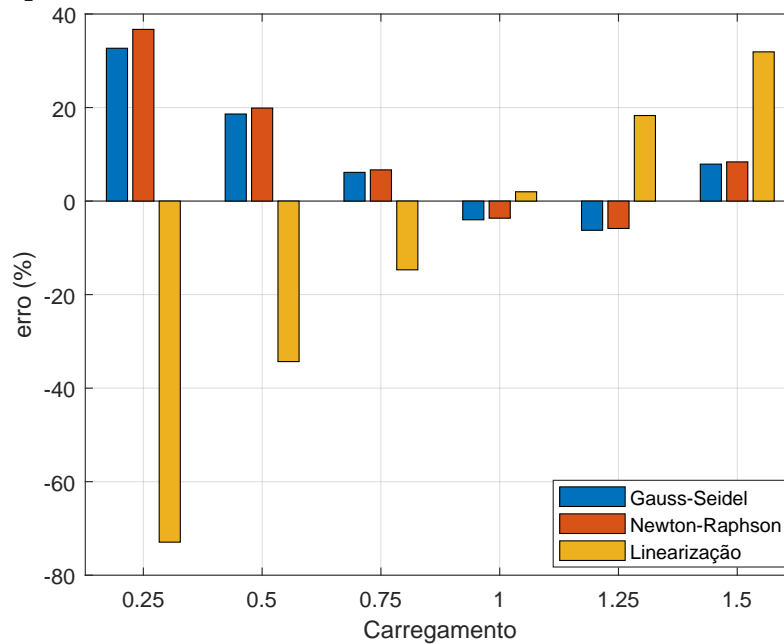
Ao analisar a Figura 26, observa-se que, entre os intervalos de carregamento estimados segundo o método da linearização, apenas o carregamento de 97,06% apresenta uma interseção com a função de referência estratificada pelos ensaios de bancada. Por outro lado, os intervalos de carregamento estimados segundo os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson apresentam dois pontos de interseção com a função de referência, ocorrendo no carregamento de 88,32% e no carregamento de 139,73%.

Ao realizar a análise anterior na Figura 27, observa-se que os valores de carregamento estimados segundo o método da linearização não têm ponto de interseção com a a função de referência. A curva de carregamento estimada segundo o método de Gauss-Seidel apresenta um ponto de interseção com a função de referência no carregamento de 31,75%, enquanto a curva estimada segundo o método de Newton-Raphson apresenta dois pontos de interseção com a função de referência, nos carregamentos de 43,89% e 99,49%.

Os valores de carregamento estimados pelos métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson reproduzem de forma mais assertiva a função de referência estratificada pelos ensaios de bancada e podem estar próximos um do outro em termos de magnitude. Isso sugere que esses métodos podem convergir para resultados semelhantes em diversas condições de carregamento.

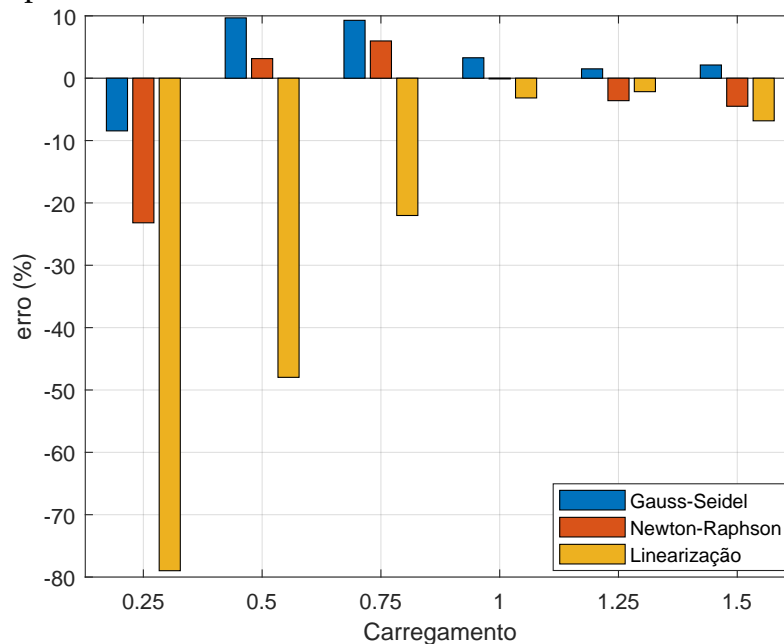
Nas Figuras 28 e 29 é possível observar o comparativo do erro percentual em cada faixa de carregamento segundo cada método, valores estratificado por meio dos ensaios de bancada. O erro percentual indica o quanto os resultados calculados diferem dos valores esperados ou reais.

Figura 28 – Comparação do erro percentual entre os métodos aplicados ao motor de 1,5 cv



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Comparação do erro percentual entre os métodos aplicados ao motor de 10 cv



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda sobre as Figuras 28 e 29 é possível observar que, para os três métodos utilizados nesta dissertação, com valor de carregamento próximo do nominal, os erros são mínimos para qualquer método em ambos os motores. Porém, a medida que o valor de carregamento se difere do nominal, tanto para valores superiores como para valores inferiores, o erro entre os métodos numéricos, que mostram divergência entre si, se mantém entre valores menores quando comparados ao erro do método da linearização para os MITs de 1,5 cv e 10 cv.

A Tabela 11 apresenta de forma resumida os valores de erro percentual para os carregamentos observados, segundo cada método, para o MIT de 1,5 cv.

Tabela 11 – Erro percentual para os carregamentos observados segundo cada método aplicado ao MIT de 1,5 cv

Método	Carregamento					
	25%	50%	75%	100%	125%	150%
Linearização	-72,9331%	-34,3242%	-14,7025%	1,9850%	18,2923%	31,9037%
Gauss-Seidel	32,6765%	18,6141%	6,1360%	-4,0031%	-6,2470%	7,9006%
Newton-Raphson	36,711%	19,886%	6,6677%	-3,6610%	-5,8599%	8,3739%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar, na Tabela 11, que quando foram aplicados os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson no MIT de 1,5 cv obteve-se erros percentuais acima de 10% para o carregamento de 50%. Para os valores de carregamento compreendidos entre 75% a 150% observou-se ótimos resultados no erro percentual apresentado, assumindo valores abaixo de 10%. Apenas para o carregamento nominal, o método da linearização resultou em um erro menor.

A Tabela 12 apresenta de forma resumida os valores de erro percentual para os carregamentos observados, segundo cada método, para o MIT de 10 cv.

Tabela 12 – Erro percentual para os carregamentos observados segundo cada método aplicado ao MIT de 10 cv

Método	Carregamento					
	25%	50%	75%	100%	125%	150%
Linearização	-78,9834%	-47,9731%	-22,0177%	-3,1673%	-2,1593%	-6,8342%
Gauss-Seidel	-8,4465%	9,6757%	9,2825%	3,2785%	1,5016%	2,1194%
Newton-Raphson	-23,1903%	3,1439%	5,9738%	-0,1143%	-3,6026%	-4,5018%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar, na Tabela 12, que, quando aplicados os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson no MIT de 10 cv, obteve-se erros percentuais abaixo de 10% para

todas as faixas de carregamento analisados. O método de Newton-Raphson resultou em menores erros entre o baixo carregamento e a plena carga. Já para carregamentos superiores ao nominal, a aplicação do método de Gauss-Seidel apresentou melhores resultados. Portanto, através dos resultados expostos nas Tabelas 11 e 12, constatou-se que a plataforma desenvolvida apresentou um melhor precisão na análise do MIT de 10 cv quando comparado ao desempenho estratificado na análise do MIT de 1,5 cv.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação apresenta, por meio da plataforma IIoT desenvolvida, uma alternativa prática no levantamento de informações relevantes que contribuem para o segmento da eficiência energética de motores elétricos em operação, uma vez que possibilita a análise ininterrupta de processos motrizes industriais, diminuindo a necessidade de aferição e análise manual normalmente realizadas por um quadro técnico especializado.

É possível constatar que a plataforma de aplicação atinge os objetivos idealizado no início deste trabalho, pois integra com sucesso um protótipo funcional de baixo custo, uma API de acesso livre e a implementação da comunicação entre os dispositivos de *hardware* com o *script* MATLAB[®] usando um MQTT.

A plataforma IIoT realiza as medições das grandezas junto ao MIT através dos dispositivos de *hardware*, analisador e roteador, idealizados de forma personalizada para essa aplicação. A comunicação LoRaWAN[®] entre os dispositivos analisador e roteador foi testada e validada em ambiente industrial.

Usando as ferramentas do ambiente de programação *Node-Red*, foi criada a API que apresenta todas as telas para inserção de dados e análise de motores elétricos. A API desenvolvida apresenta os recursos de conectividade necessários para troca de dados com as demais partes que compõem a plataforma IIoT.

Usando o *message broker Cloud* MQTT foi implementada a comunicação entre o dispositivo roteador, a API desenvolvida no *Node-Red* e o *script* MATLAB[®], garantindo a transmissão eficiente de dados em tempo real.

Usando o *software* MATLAB[®], instalado em um servidor de aplicação, foi desenvolvido um *script* executável que compile os algoritmos dos métodos numéricos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson para determinação dos parâmetros do CE e carregamento de motores elétricos, realizando a atualização das variáveis no *message broker Cloud* MQTT para cálculo dos parâmetros em tempo real.

A plataforma IIoT é usada para a comparação dos dados de carregamento segundo o método da linearização da corrente e os métodos iterativos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson através dos valores estimados dos parâmetros do CE. Os dados foram obtidos por meio da análise de dois MITs, um de 1,5 cv e outro de 10 cv, obtendo os resultados de erro percentual por meio da comparação entre os métodos aplicados no estudo.

Quando foram aplicados os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson no

MIT de 1,5 cv obteve-se erros percentuais acima de 10% para os carregamentos de 25% e 50%. Para os valores de carregamento compreendidos entre 75% e 150% observou-se ótimos resultados no erro percentual apresentado, assumindo valores abaixo de 10%. E para o MIT de 1,5 cv apenas no carregamento nominal, o método da linearização resultou em um erro menor, comparado aos métodos numéricos.

Já quando aplicado o método de Gauss-Seidel no MIT de 10 cv, obteve-se erros percentuais abaixo de 10% para todos os carregamentos analisados, a saber carregamentos compreendidos entre 25% e 150% da carga nominal. O método de Newton-Raphson apresentou os menores erros entre 50% do carregamento nominal até plena carga. Já para carregamentos superiores ao nominal, a aplicação do método de Gauss-Seidel apresentou os melhores resultados. A análise do carregamento do MIT de 10 cv pelo método numérico de Gauss-Seidel, por meio da plataforma IIoT, apresenta a melhor opção de análise, tendo como alvo os valores de erro percentual abaixo de 10% para todas as faixas de carregamento. Constatou-se que a plataforma desenvolvida apresentou melhor desempenho na análise do MIT de 10 cv quando comparado ao desempenho estratificado na análise do MIT de 1,5 cv.

Os resultados de estimativa de carregamento alcançaram as expectativas ao mostrarem percentuais de desempenho que evidenciam a eficácia dos métodos numéricos iterativos, sabendo que estes métodos proporcionam maior precisão comparados ao método da linearização da corrente.

Portanto, a proposta desta dissertação se concretiza ao atingir os objetivos estabelecidos, sendo a plataforma IIoT baseada em métodos computacionais capazes de mostrar, em tempo real e de forma não invasiva, o carregamento dos motores elétricos de indução trifásicos de maneira dedicada, através de métodos com níveis de esforço computacional e rendimento diferentes.

5.1 Trabalhos futuros

Como o funcionamento da plataforma IIoT foi alcançado, é possível prever algumas possibilidades de trabalhos futuros. A primeira proposição de trabalho, é unificar todos os *scripts* elaborados nessa dissertação ao *script* principal MQTTLoofinal.m que é executável e conectado ao *Cloud MQTT*, potencializando os recursos da plataforma de aplicação e garantindo a visualização das demais variáveis e indicadores do sistema, como erro dos parâmetros segundo cada método e erro entre os carregamentos segundo cada

método.

Outra opção de trabalho futuro é analisar motores de maior potência com dados estratificados por meio de ensaios, para constatar os limites de erros observados.

Uma outra proposta é utilizar a plataforma desenvolvida para armazenar as informações orientadas a objeto com todos os atributos pertinentes, com ferramentas de classificação, para utilização destes dados em trabalhos de reconhecimento de padrões de funcionamento do processo motriz usando técnicas de *machine learning*.

Por fim, fazendo uso da ferramenta de cálculo computacional da plataforma IIoT, uma última proposta de trabalho futuro é desenvolver um modelo matemático integrado para estimação do próprio rendimento efetivo do MIT para quaisquer valores de carregamento em tempo real, com análise dos gráficos de resultados e erros na própria API.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 17094. **Máquinas elétricas girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT NBR 17094-1. **Máquinas elétricas girantes – Parte 1: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2002.
- ABNT NBR 17094-1. **Máquinas elétricas girantes – Parte 3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT NBR 5383-1. **Máquinas elétricas girantes - Parte 1: Motores de indução trifásicos - Ensaio**. Rio de Janeiro, 2002.
- AGUIAR, V. B. **AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DO AUMENTO DO RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS DE BAIXA POTÊNCIA APÓS REBOBINAGEM**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- AHMED, S. F.; ALAM, M. S. B.; HOQUE, M.; LAMEESA, A.; AFRIN, S.; FARAH, T.; KABIR, M.; SHAFIULLAH, G.; MUYYEEN, S. Industrial internet of things enabled technologies, challenges, and future directions. **Computers and Electrical Engineering**, v. 110, p. 108847, 2023. ISSN 0045-7906. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790623002719>.
- ALABADI, M.; HABBAL, A.; WEI, X. Industrial internet of things: Requirements, architecture, challenges, and future research directions. **IEEE Access**, IEEE, 2022.
- ANDRADE, C. **Análise de métodos para determinação da eficiência de motores trifásicos de indução**. Tese (Doutorado) – Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2009.
- ASIMINIDIS, C.; KOKKONIS, G.; KONTOGIANNIS, S. Managing iot data using relational schema and json fields, a comparative study. **IOSR Journal of Computer Engineering (JCE)**, v. 20, n. 3, 2019.
- BHAVSAR, R. C.; PATEL, R. Various techniques for condition monitoring of three phase induction motor-a review. **International Journal of Engineering Inventions**, v. 3, n. 4, p. 22–26, 2013.
- BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. [S. l.]: LTC, 2018.
- BOLÍVAR, J. E. B.; ARBELÁEZ, M. B.; ARANGO, A. J. B. El método de newton-raphson-la alternativa del ingeniero para resolver sistemas de ecuaciones no lineales. **Scientia et Technica**, Universidad Tecnológica de Pereira, v. 11, n. 27, p. 221–224, 2005.
- BONOMI, F.; MILITO, R.; ZHU, J.; ADDEPALLI, S. Fog computing and its role in the internet of things. In: **Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing**. [S. l.: s. n.], 2012. p. 13–16.
- BORSATTI, D.; CERRONI, W.; TONINI, F.; RAFFAELLI, C. From iot to cloud: applications and performance of the mqtt protocol. In: IEEE. **2020 22nd international conference on transparent optical networks (ICTON)**. [S. l.], 2020. p. 1–4.

- BORTONI, E.; SANTOS, A. Acionamentos com motores de indução trifásicos. **HADDAD, J., MARTINS, ARS, MARQUES, M. Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**, v. 3, p. 397–435, 2006.
- BRASIL, M. **Portaria Interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017. [Aprova o Programa de Metas para Motores Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo]**. 2017. Disponível em: `\protect\unhbox\voidb@x\bgroup\edef{DiÃarioOficialdaUniÃço}\let\futurelet\@let@token\let\def,{.}\def{,}\skip@\lastskip\unskip\@@italiccorr\hskip\skip@\def\aftergroup\futurelet\@let@token\let\def,{.}\def{,}\skip@\lastskip\unskip\@@italiccorr\hskip\skip@\def\nocorr\defreserved@b{D}\defbbxbxb` seção 1, Brasília, DF, ano 154, n. 167, p. 50, 30 ag.
- CASTRO, M. A.; OLIVEIRA, E. J. Algoritmo para estimação dos parâmetros do motor de indução em plena operação. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. [S. l.: s. n.], 2020. v. 2, n. 1.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. [S. l.]: McGraw Hill, 2013. v. 5.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia-7ª Edição**. [S. l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.
- CHI, J.; LI, Y.; HUANG, J.; LIU, J.; JIN, Y.; CHEN, C.; QIU, T. A secure and efficient data sharing scheme based on blockchain in industrial internet of things. **Journal of Network and Computer Applications**, Elsevier, v. 167, p. 102710, 2020.
- DAGUE, S. **Use MQTT to stream real-time data**. 2018. Disponível em: <https://developer.ibm.com/patterns/use-mqtt-stream-real-time-data>. Acessado em 14/08/2023.
- EPE, E. E. de P. **Balanco Energético Nacional 2023: Ano Base 2022**. 2023.
- HAQUE, M. H. Determination of nema design induction motor parameters from manufacturer data. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 23, n. 4, p. 997–1004, 2008.
- HERMAN, M.; HERMAN, M.; IORGA, M.; SALIM, A. M.; JACKSON, R. H.; HURST, M. R.; LEO, R.; LEE, R.; LANDREVILLE, N. M.; MISHRA, A. K. *et al.* **Nist cloud computing forensic science challenges**. [S. l.]: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2020.
- IEC 60034-1. **Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance**. [S. l.], 2022.
- IEEE Std 112-2017. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**. [S. l.], 2017.
- IVANOV, D.; DOLGUI, A. Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. a position paper motivated by covid-19 outbreak. **International journal of production research**, Taylor & Francis, v. 58, n. 10, p. 2904–2915, 2020.
- KIUSALAAS, J. **Numerical Methods in Engineering with MATLAB®**. 2. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2009.
- KOLEVA, N. Industry 4.0's opportunities and challenges for production engineering and managemnet. 2018.
- KUPHALDT, T. **Lessons in Electric Circuits Vol V - Reference**. 4th ed.. ed. [S. l.: s. n.], 2002.

- LEE, I.; LEE, K. The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises. **Business horizons**, Elsevier, v. 58, n. 4, p. 431–440, 2015.
- LEE, K.; FRANK, S.; SEN, P. K.; POLESE, L. G.; ALAHMAD, M.; WATERS, C. Estimation of induction motor equivalent circuit parameters from nameplate data. In: **2012 North American Power Symposium (NAPS)**. [S. l.: s. n.], 2012. p. 1–6.
- LU, B.; QIAO, W.; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G. Solving induction motor equivalent circuit using numerical methods for an in-service and nonintrusive motor efficiency estimation method. In: IEEE. **2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference**. [S. l.], 2006. v. 2, p. 1–6.
- MADAKAM, S.; LAKE, V.; LAKE, V.; LAKE, V. *et al.* Internet of things (iot): A literature review. **Journal of Computer and Communications**, Scientific Research Publishing, v. 3, n. 05, p. 164, 2015.
- MAMEDE, J. F. Instalações elétricas industriais, 9ª edição. **Editora LTC, Rio**, 2017.
- MATLAB, S. Matlab. **The MathWorks, Natick, MA**, 2012.
- MELO, P. M. A. d. S. Evolução dos parâmetros de motores de indução trifásicos e sua influência em estratégias de controle. 2004.
- NATARAJAN, R.; MISRA, V. Parameter estimation of induction motors using a spreadsheet program on a personal computer. **Electric Power Systems Research**, v. 16, n. 2, p. 157–164, 1989.
- NOCEDAL, S. W. J. **Numerical Optimization**. 2nd ed. ed. [S. l.]: Springer, 2006. (Springer series in operations research). ISBN 9780387303031,0387303030.
- NODE-RED. **Node-RED**. 2023. Disponível em:<https://nodered.org/>. Acessado em 14/08/2023.
- OLIVEIRA, J. G. S. Materiais usados na construção de motores elétricos. **Porto Alegre**, 2009.
- PAZ, E. H. Métodos computacionais para a determinação dos parâmetros do motor de indução trifásico. **Trabalho de Conclusão Curso - Universidade de Fortaleza**, 2023.
- PEDRINI, F.; BRUNORO, M. Determinação dos parâmetros elétricos de motores de indução por meio de dados construtivos [not available in english]. In: **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. [S. l.: s. n.], 2021. p. 622–629.
- PEREIRA, A. H. **FREIO ELETROMAGNÉTICO PARA ENSAIOS DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- RAMIREZ, H. J. S. **Control design techniques in power electronics devices**. [S. l.]: Springer, 2006. (Power systems). ISBN 9781846284595,1846284597,1846284589.
- RAY, P. P. A survey on internet of things architectures. **Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences**, Elsevier, v. 30, n. 3, p. 291–319, 2018.
- SABHARWAL, S. C. Methodology for estimating performance characteristics of three phase induction motor operating direct-on-line or with six pulse inverter. In: IEEE. **2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems**. [S. l.], 2006. p. 1–4.

SANTOS, M. S.; PAZ, E. H.; AGUIAR, V. B.; PONTES, R. T. Non-invasive monitoring system for analysis of energy efficiency of three-phase induction motors. In: **2022 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)**. [S. l.: s. n.], 2022. p. 1–6.

SENS, M. Avanços tecnológicos nos motores elétricos. **Revista WEG**, v. 1, n. 1, p. 11–13, 2001.

SOUZA, D. F. de; SALOTTI, F. A. M.; SAUER, I. L.; TATIZAWA, H.; ALMEIDA, A. T. de; KANASHIRO, A. G. A performance evaluation of three-phase induction electric motors between 1945 and 2020. **Energies**, MDPI, v. 15, n. 6, p. 2002, 2022.

TAO, F.; CHENG, Y.; ZHANG, L.; NEE, A. Y. Advanced manufacturing systems: socialization characteristics and trends. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 28, p. 1079–1094, 2017.

TAO, F.; ZUO, Y.; XU, L. D.; ZHANG, L. Iot-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 2, p. 1547–1557, 2014.

TESSARO, L.; RAFFALDI, C.; ROSSI, M.; BRUNELLI, D. Lora performance in short range industrial applications. In: **2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)**. [S. l.: s. n.], 2018. p. 1089–1094.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. [S. l.]: McGraw Hill, 2014. v. 7.

WEG. **Indústria 4.0 pode mudar o cenário do consumo de energia no Brasil**. 2019. Disponível em: <https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/08/05/industria-4-0-pode-mudar-o-cenario-do-consumo-de-energia-no-brasil.ghtml>. Acessado em 23/03/2023.

WEG. **Manual geral de instalação, operação e manutenção de motores elétricos. Jaraguá do Sul**. 2019.

WEG. **Motores eficientes geram economia de energia na indústria**. 2019. Disponível em: <https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/12/02/motores-eficientes-geram-economia-de-energia-na-industria.ghtml>. Acessado em 23/03/2023.

WEG. **Guia de Especificação: Motores Elétricos**. 2020. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acessado em 23/03/2023.

WENGERKIEVICZ, C. A. C. Desenvolvimento de algoritmo para estimação de valores de parâmetros do circuito equivalente de motores de indução trifásicos a partir de dados de catálogo. 2016.

XU, L. D.; HE, W.; LI, S. Internet of things in industries: A survey. **IEEE Transactions on industrial informatics**, IEEE, v. 10, n. 4, p. 2233–2243, 2014.

APÊNDICE A – SCRIPT EXECUTÁVEL MATLAB

```
%% -----  
%% Este script calcula os parametros do circuito equivalente do MIT  
%% atraves dos metodos numericos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson.  
%% -----  
  
%% Configuracao do broker MQTT  
clear  
clc  
mqClient = mqttclient('tcp://tailor.cloudmqtt.com', 'Port',10115,...  
    Username = 'dsxkcmhx', Password = 'yDgsctb8mtut');  
  
%% Inscricao do script nos topicos  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "TipoLigacao")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "PotenciaNominal")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "TensaoNominal")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "CorrenteNominal")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "VelocidadeNominal")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "FatorCorrentePartida")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "FatorPotencia")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "rend")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "Categoria")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "ResistenciaEstator")  
pause(0.2)  
  
subscribe(mqClient, "R1Gauss")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "X1Gauss")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "XMGauss")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "R2Gauss")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "X2Gauss")  
pause(0.2)  
  
subscribe(mqClient, "R1Newton")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "X1Newton")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "XMNewton")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "R2Newton")  
pause(0.2)  
subscribe(mqClient, "X2Newton")  
pause(0.2)
```

```
subscribe(mqClient, "Canal1")
pause(0.2)
subscribe(mqClient, "Canal2")
pause(0.2)
subscribe(mqClient, "Canal3")
pause(0.2)

subscribe(mqClient, "CadastroMotor")
pause(0.2)
subscribe(mqClient, "Correntes")
pause(0.2)

subscribe(mqClient, "CorrenteMedia")
pause(0.2)
subscribe(mqClient, "CarregamentoGauss")
pause(0.2)
subscribe(mqClient, "CarregamentoNewton")
pause(0.2)

%% Inicialização dos topicos pelo script
write(mqClient, "TipoLigacao", "1");
write(mqClient, "PotenciaNominal", "1.4946");
write(mqClient, "TensaoNominal", "380");
write(mqClient, "CorrenteNominal", "2.41");
write(mqClient, "VelocidadeNominal", "3440");
write(mqClient, "FatorCorrentePartida", "7.6");
write(mqClient, "FatorPotencia", "0.84");
write(mqClient, "rend", "82.6");
write(mqClient, "Categoria", "1");
write(mqClient, "ResistenciaEstator", "11.6");

write(mqClient, "R1Gauss", "0");
write(mqClient, "X1Gauss", "0");
write(mqClient, "XMGauss", "0");
write(mqClient, "R2Gauss", "0");
write(mqClient, "X2Gauss", "0");

write(mqClient, "R1Newton", "0");
write(mqClient, "X1Newton", "0");
write(mqClient, "XMNewton", "0");
write(mqClient, "R2Newton", "0");
write(mqClient, "X2Newton", "0");

write(mqClient, "Canal1", "0"); %write(mqClient, "Canal1", "2.1");
write(mqClient, "Canal2", "0"); %write(mqClient, "Canal2", "2.2");
write(mqClient, "Canal3", "0"); %write(mqClient, "Canal3", "2.3");

write(mqClient, "CadastroMotor", "0");
write(mqClient, "Correntes", "0");

write(mqClient, "CorrenteMedia", "0");
write(mqClient, "CarregamentoGauss", "0");
write(mqClient, "CarregamentoNewton", "0");
```

```
%% Checa se a conexao com o broker foi estabelecida
mqClient.Connected

%% LOOP
while(true)
    pause(1)
    VariaveisEntrada = peek(mqClient);
    CadastroMotor = str2double(VariaveisEntrada.Data(24));
    Correntes = str2double(VariaveisEntrada.Data(25));

    if(CadastroMotor)
        TipoLigacao= str2double(VariaveisEntrada.Data(1));
        PotenciaNominal = str2double(VariaveisEntrada.Data(2))*735.5;
        TensaoNominal = str2double(VariaveisEntrada.Data(3));
        CorrentoNominal = str2double(VariaveisEntrada.Data(4));
        VelocidadeNominal = str2double(VariaveisEntrada.Data(5));
        FatorCorrentePartida = str2double(VariaveisEntrada.Data(6));
        FatorPotencia = str2double(VariaveisEntrada.Data(7));
        rend = str2double(VariaveisEntrada.Data(8))/100;
        CatConjugado = str2double(VariaveisEntrada.Data(9));
        ResistenciaEstator = str2double(VariaveisEntrada.Data(10));

        %% Representacao das grandezas elétricas do circuito equivalente
        %% monofasico de acordo com o fechamento do motor.
        if(TipoLigacao) %estrela
            V1 = TensaoNominal/sqrt(3);
            I1 = CorrentoNominal;
            R1 = ResistenciaEstator/2;
            % Para R1 = 5.8, ResistenciaEstator = 11.6 ohm.
            %Ip = FatorCorrentePartida*CorrentoNominal/1.293598333;
        else %delta
            V1 = TensaoNominal;
            I1 = CorrentoNominal/sqrt(3);
            R1 = ResistenciaEstator*(3/2);
            % Para R1 = 5.8,
            % ResistenciaEstator = (5.8*11.6)/(5.8+11.6) = 3.8667 ohm.
        end

        %% Representacao da relacao entre X1 e X2 acordo com a categoria
        %% de conjugado/classe de projeto do motor
        if(CatConjugado==1||CatConjugado==4)
            alpha = 1;
        elseif (CatConjugado==2)
            alpha = 0.67;
        elseif (CatConjugado==3)
            alpha = 0,43;
        end

        %% identifica a velocidade sincrona e polos
        polos=(2:2:10);
        velocidadesSinc=[120*50./(polos),120*60./(polos)];
        [~,nvec]=min(abs(velocidadesSinc-VelocidadeNominal));
        Nsinc=velocidadesSinc(nvec);
    end
end
```

```

%% -----
%% Metodo numerico de Gauss-Sidel
%% -----
P3F = PotenciaNominal/rend;
P3AP = P3F/FatorPotencia;
Q3F = sqrt((P3AP)^2 - P3F^2);
s = (Nsinc - VelocidadeNominal)/Nsinc;
PEF = P3F - (3*R1*I1^2);
Ip = FatorCorrentePartida*I1/1.293598333;
%inicializa
R2ant = 0; X1ant = 0; X2ant = 0; XMant = 100;
RCant = 10000; E1 = V1*0.99; I2 = I1*0.99;
erro = 0.0001;
condition = 1;

ItG=0;
while (condition == 1)
    ItG=ItG+1;
    c = [PEF,-3*E1^2,PEF*X2ant^2];
    y = s*roots(c);
    if (y(1) > 0 )
        R2_g = y(1);
    else
        R2_g = y(2);
    end

    XRB = sqrt((V1/Ip)^2 - (R1+R2_g)^2);
    X1_g = alpha/(1+alpha) * XRB;
    X2_g = 1/(1+alpha) * XRB;
    QM = Q3F - 3*I1^2*X1_g - 3*I2^2*X2_g;
    XM_g = E1^2/(QM/3);
    PC = P3F - 3*R1*I1^2 - 3*(R2_g)*I2^2;
    RCat = E1^2/(PC/3);

    if (abs(R2_g - R2ant) > erro || abs(X1_g - X1ant) > erro || abs(X2_g -
X2ant) > erro || abs(XM_g - XMant) > erro || abs(RCat - RCant) > erro)
        E1 = abs(V1 - (I1*(FatorPotencia-i*sqrt(1-FatorPotencia^2)))*
(R1+i*X1_g));
        I2 = E1/sqrt((R2_g/s)^2 + X2_g^2);
    else
        condition = 0;
    end

    R2ant = R2_g; X1ant = X1_g; X2ant = X2_g; XMant = XM_g; RCant = RCat;
end

%% -----
%% Metodo numerico de Newton-Raphson
%% -----
I2newton = I1 * FatorPotencia; % Corrente do Rotor
Pout = 1100; % Potência de saída em Watts (eixo da máquina)
R1f = R1; % Resistência do estator frio
R1q = R1; % Resistência do estator quente
I1ph = I1*(FatorPotencia-i*sin(acos(FatorPotencia))); % Corrente do estator
(defasada)

```

```

R2_n = s * V1/(I2newton); % Resistência do rotor inicial
X1_n = sqrt(V1^2/Ip^2 - (R1+R2_n)^2)/(1+(1/alpha)); % Reatância do estator
inicial
Xm_n = V1/-imag(I1ph); % Reatância de magnetização inicial
%Pconsti = Pin - 3*R1i*I1^2 - 3*R2i*I2^2 - Pout; % Potência constante
(Ventilação + Atrito + Núcleo) inicial
x0 = [X1_n; Xm_n; R2_n];
opts = optimset ('MaxIter', 2000, 'TolFun', 1e-6);

f=@(x) [R1q + (x(3)/s * x(2)^2)/((x(3)/s)^2 + (x(1)/alpha + x(2))^2) - real
(V1/I1ph);...
x(1) + ((x(3)/s)^2 * x(2) + (x(1)/alpha)^2 * x(2) + (x(1)/alpha) * x(2)^2)
/((x(3)/s)^2 + (x(1)/alpha + x(2))^2) - imag(V1/I1ph);...
V1/sqrt((R1f + (x(3)*x(2)^2)/(x(3)^2 + (x(1)/alpha + x(2))^2))^2 + (x(1) +
(x(3)^2 * x(2) + (x(1)/alpha)^2 * x(2) + x(1)/alpha * x(2)^2)/(x(3)^2 + (x(1)/alpha +
x(2))^2))^2) - Ip];
[x_n, fval,exitflag,output,info] = fsolve (f, x0, opts)

%xN=[x_n',x_n(1)/alpha]
X1_n=x_n(1); XM_n=x_n(2); R2_n=x_n(3); X2_n=X1_n/alpha;

%output.iterations
xG=[X1_g, XM_g, R2_g, X2_g]
xN=[X1_n, XM_n, R2_n, X2_n]

write(mqClient, "R1Gauss", num2str(R1));
write(mqClient, "X1Gauss", num2str(xG(1)));
write(mqClient, "XMGauss", num2str(xG(2)));
write(mqClient, "R2Gauss", num2str(xG(3)));
write(mqClient, "X2Gauss", num2str(xG(4)));

write(mqClient, "R1Newton", num2str(R1));
write(mqClient, "X1Newton", num2str(xN(1)));
write(mqClient, "XMNewton", num2str(xN(2)));
write(mqClient, "R2Newton", num2str(xN(3)));
write(mqClient, "X2Newton", num2str(xN(4)));

CadastroMotor=0;
write(mqClient, "CadastroMotor", "0");clc

end

if(Correntes)
TipoLigacao= str2double(VariaveisEntrada.Data(1));
PotenciaNominal = str2double(VariaveisEntrada.Data(2))*735.5;
CorrenteMedia = str2double(VariaveisEntrada.Data(26));

if(TipoLigacao) %estrela
CorrenteFase = CorrenteMedia;
else %delta
CorrenteFase = CorrenteMedia/sqrt(3);
end

if(PotenciaNominal==1103.25)
if(CorrenteMedia<=1.5)

```

```
CarregamentoGauss = 0;
write(mqClient, "CarregamentoGauss", num2str(CarregamentoGauss));
CarregamentoNewton = 0;
write(mqClient, "CarregamentoNewton", num2str(CarregamentoNewton));
else
    CarregamentoGauss = (0.1676*CorrenteFase^4) + (-1.269*CorrenteFase^3)
+ (3.286*CorrenteFase^2) + (-2.792*CorrenteFase) + 0.7124;
write(mqClient, "CarregamentoGauss", num2str(CarregamentoGauss));
CarregamentoNewton = (0.1676*CorrenteFase^4) + (-1.266*CorrenteFase^3)
+ (3.272*CorrenteFase^2) + (-2.779*CorrenteFase) + 0.7188;
write(mqClient, "CarregamentoNewton", num2str(CarregamentoNewton));
end

elseif(PotenciaNominal==7355)
    if(CorrenteMedia<=7.3)
        CarregamentoGauss = 0;
        write(mqClient, "CarregamentoGauss", num2str(CarregamentoGauss));
        CarregamentoNewton = 0;
        write(mqClient, "CarregamentoNewton", num2str(CarregamentoNewton));
    else
        CarregamentoGauss = (0.006299*CorrenteFase^4) + (-0.1409
*CorrenteFase^3) + (1.082*CorrenteFase^2) + (-3.002*CorrenteFase) + 2.01;
        write(mqClient, "CarregamentoGauss", num2str(CarregamentoGauss));
        CarregamentoNewton = (0.005705*CorrenteFase^4) + (-0.1304
*CorrenteFase^3) + (1.023*CorrenteFase^2) + (-2.901*CorrenteFase) + 2.005;
        write(mqClient, "CarregamentoNewton", num2str(CarregamentoNewton));
    end
end

Correntes=0;
write(mqClient, "Correntes", "0");clc

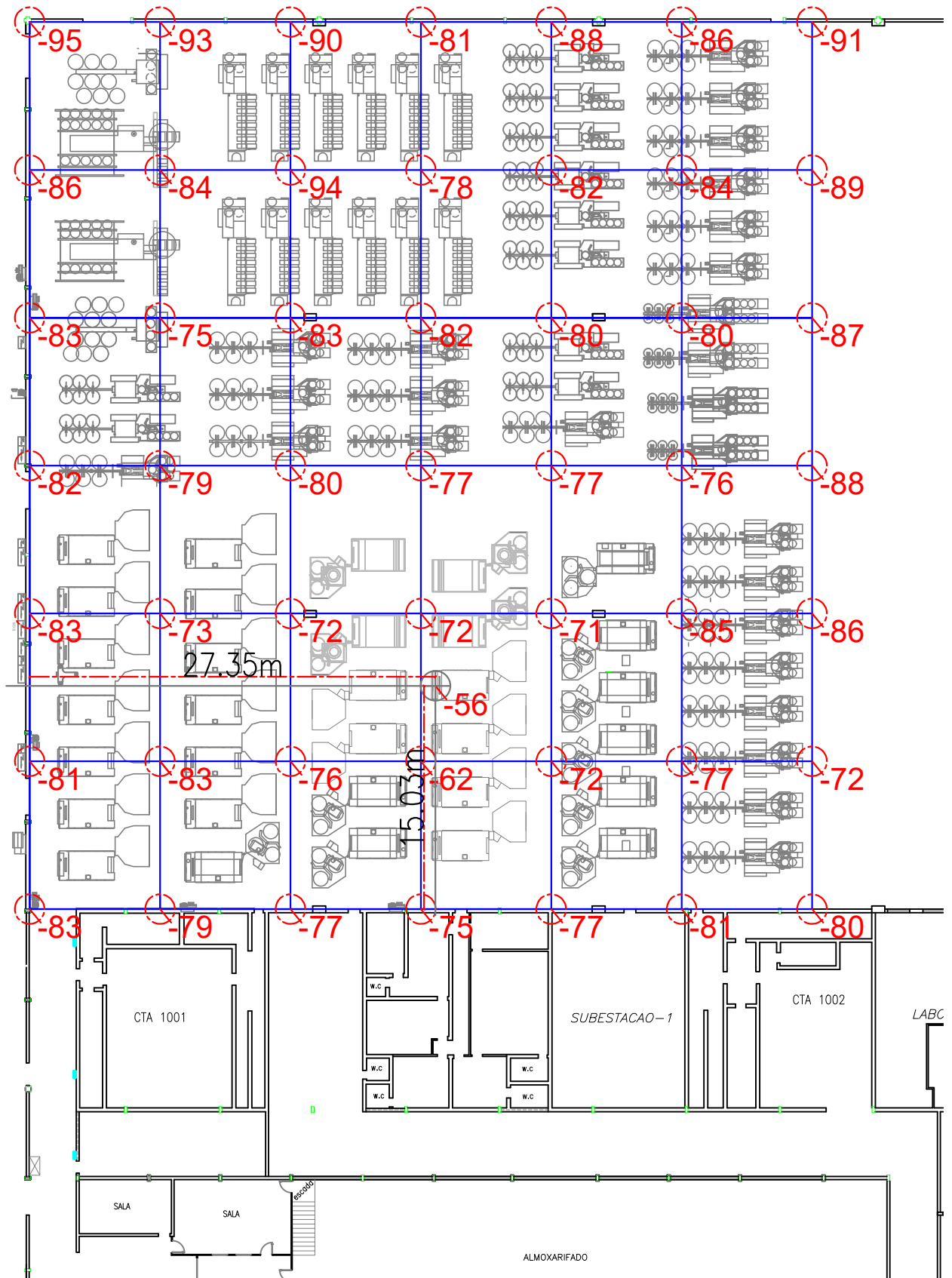
end

end
```


**APÊNDICE B – PLANTA BAIXA DA ÁREA ONDE FOI REALIZADO O TESTE DE ENLACE
DE COMUNICAÇÃO**

52.73m

59.77m



ALMOXARIFADO

**APÊNDICE C – SCRIPT DA COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE CARREGAMENTO
ENTRE OS MÉTODOS PARA O MOTOR DE 1,5 CV**

```
clc;
clear;

%% Dados do ensaio de carregamento do motor de 1.5cv

s=(3600-[3395, 3427, 3457, 3480, 3487, 3507, 3530])/3600;
I1_trabalho=[2.743, 2.41, 2.28967, 2.07567, 1.98433, 1.86733, 1.647];
Carregamento=[1.15, 1.00, 0.90, 0.80, 0.75, 0.65, 0.50];

% Polynomial Curve Fit grau 3
% eixo x = I1_trabalho e eixo y = Carregamento

%Linear model Poly3:
% f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4
%Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =    0.04435; %(-0.557, 0.6457)
    p2 =   -0.4317; %(-4.39, 3.527)
    p3 =    1.836; %(-6.721, 10.39)
    p4 =   -1.552; %(-7.628, 4.524)

%Goodness of fit:
% SSE: 0.0008966
% R-square: 0.9968
% Adjusted R-square: 0.9937
% RMSE: 0.01729

x_med_o = [1.3512;1.6485;2.0036;2.4374;2.9618;3.5335];
x_med = 1.3512:0.0001:3.5335;

f_med_o = p1*x_med_o.^3 + p2*x_med_o.^2 + p3.*x_med_o + p4;
f_med = p1*x_med.^3 + p2*x_med.^2 + p3.*x_med + p4;

figure
plot(x_med_o,f_med_o,'o','LineWidth',1); hold on; grid on;
plot(x_med,f_med);
yticks([0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75]);
xlabel('Corrente [A]')
ylabel('Carregamento')
grid on

%% GS

% Polynomial Curve Fit grau 3
% eixo x = I1abs p/ GS(do script: CircuitoEquivalentel_5.m) e eixo y = Carregamento

%Linear model Poly3:
% f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4
%Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =    0.2087; %(0.05007, 0.3674)
    p2 =   -1.516; %(-2.564, -0.4667)
    p3 =    4.014; %(1.755, 6.273)
    p4 =   -2.839; %(-4.425, -1.253)

%Goodness of fit:
% SSE: 0.0002331
```

```
% R-square: 0.9992
% Adjusted R-square: 0.9984
% RMSE: 0.008815

f_gs = p1*x_med.^3 + p2*x_med.^2 + p3*x_med + p4;

plot(x_med,f_gs);
% grid on

%% NR
% Polynomial Curve Fit grau 3
% eixo x = I1abs p/ NR(do script: CircuitoEquivalentel_5.m) e eixo y = Carregamento

%Linear model Poly3:
% f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4
%Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =    0.2067;  %(0.04848, 0.365)
    p2 =   -1.497;  %(-2.539, -0.454)
    p3 =    3.958;  %(1.72, 6.196)
    p4 =   -2.783;  %(-4.349, -1.218)

%Goodness of fit:
% SSE: 0.0002344
% R-square: 0.9992
% Adjusted R-square: 0.9984
% RMSE: 0.008839

f_nr = p1*x_med.^3 + p2*x_med.^2 + p3*x_med + p4;

plot(x_med,f_nr);
% grid on

%% LINEARIZAÇÃO
% Polynomial Curve Fit grau 3

%I1_trabalho=[2.743, 2.41, 2.28967, 2.07567, 1.98433, 1.86733, 1.647];
CarregamentoL=[1.2826, 1, 0.8958, 0.7078, 0.6264, 0.5213, 0.3206];

%Linear model Poly1:
% f(x) = p1*x + p2
%Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =    0.8775;  %(0.8621, 0.8929)
    p2 =   -1.118;  %(-1.151, -1.084)

%Goodness of fit:
% SSE: 0.000145
% R-square: 0.9998
% Adjusted R-square: 0.9997
% RMSE: 0.005385

f_L = p1*x_med + p2;

plot(x_med,f_L);
% grid on
```

```
legend('Ensaaios', 'Referência', 'Gauss-Seidel', 'Newton-Raphson', 'Linearização')

figure
erros=([f_gs(1), f_nr(1), f_L(1);...
        f_gs(2972), f_nr(2972), f_L(2972);...
        f_gs(6520), f_nr(6520), f_L(6520);...
        f_gs(10852), f_nr(10852), f_L(10852);...
        f_gs(16080), f_nr(16080), f_L(16080);...
        f_gs(21778), f_nr(21778), f_L(21778)] - ...
        [f_med(1), f_med(1), f_med(1);...
        f_med(2972), f_med(2972), f_med(2972);...
        f_med(6520), f_med(6520), f_med(6520);...
        f_med(10852), f_med(10852), f_med(10852);...
        f_med(16080), f_med(16080), f_med(16080);...
        f_med(21778), f_med(21778), f_med(21778);]) ./ ...
        [f_med(1), f_med(1), f_med(1);...
        f_med(2972), f_med(2972), f_med(2972);...
        f_med(6520), f_med(6520), f_med(6520);...
        f_med(10852), f_med(10852), f_med(10852);...
        f_med(16080), f_med(16080), f_med(16080);...
        f_med(21778), f_med(21778), f_med(21778);])*100;

bar([0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5],erros);grid on
xticks([.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5]);
xlabel('Carregamento')
ylabel('erro (%)')
%title('Carregamento')
legend('Gauss-Seidel', 'Newton-Raphson', 'Linearização')
```

**APÊNDICE D – SCRIPT DA COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE CARREGAMENTO
ENTRE OS MÉTODOS PARA O MOTOR DE 10 CV**

```

clc;
clear;

%% Dados do ensaio de carregamento do motor de 10cv

s=(1800-[1753, 1760, 1771, 1781, 1786, 1790, 1792, 1797])/1800;
I1_trabalho=([17.39, 15.4, 12.5, 10.3, 8.9, 7.9, 7.5, 7.3])/sqrt(3);
Carregamento=[1.25, 1.042442, 0.791761, 0.568012, 0.389062, 0.247213, 0.135226,
0.069081];

% Polynomial Curve Fit grau 3
% eixo x = I1_trabalho e eixo y = Carregamento

%Linear model Poly3:
%      f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4
%Coefficients (with 95% confidence bounds):
      p1 =      0.008397; %(-0.003733, 0.02053)
      p2 =     -0.1871; %(-0.4243, 0.05018)
      p3 =      1.528; %(0.03434, 3.022)
      p4 =     -3.658; %(-6.683, -0.6332)

%Goodness of fit:
% SSE: 0.001515
% R-square: 0.998
% Adjusted R-square: 0.9961
% RMSE: 0.02247

x_med_o = [4.65920,5.56680,6.98240,8.6610,9.78170,10.541599];
x_med = 4.65920:0.0001:10.541599;

f_med_o = p1*x_med_o.^3 + p2*x_med_o.^2 + p3.*x_med_o + p4;
f_med = p1*x_med.^3 + p2*x_med.^2 + p3.*x_med + p4;

figure
plot(x_med_o,f_med_o,'o','LineWidth',1); hold on; grid on;
plot(x_med,f_med);
yticks([0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75]);
xlabel('Corrente [A]')
ylabel('Carregamento')
grid on

%% GS

% Polynomial Curve Fit grau 3
% eixo x = I1abs p/ GS(do script: CircuitoEquivalentel0.m) e eixo y = Carregamento

%Linear model Poly3:
%      f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4
%Coefficients (with 95% confidence bounds):
      p1 =      0.01199; %(0.00519, 0.01879)
      p2 =     -0.2753; %(-0.4181, -0.1325)
      p3 =      2.224; %(1.259, 3.188)
      p4 =     -5.371; %(-7.459, -3.283)

%Goodness of fit:

```



```
% SSE: 0.002524
% R-square: 0.9981
% Adjusted R-square: 0.9966
% RMSE: 0.02512

f_gs = p1*x_med.^3 + p2*x_med.^2 + p3*x_med + p4;

plot(x_med,f_gs);
% grid on

%% NR
% Polynomial Curve Fit grau 3
% eixo x = I1abs p/ NR(do script: CircuitoEquivalentel_5.m) e eixo y = Carregamento

%Linear model Poly3:
% f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4
%Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =    0.01102;  %(0.004779, 0.01726)
    p2 =   -0.2582;  %(-0.3919, -0.1245)
    p3 =    2.13;   %(1.21, 3.051)
    p4 =   -5.243;  %(-7.273, -3.213)

%Goodness of fit:
% SSE: 0.002492
% R-square: 0.9981
% Adjusted R-square: 0.9967
% RMSE: 0.02496

f_nr = p1*x_med.^3 + p2*x_med.^2 + p3*x_med + p4;

plot(x_med,f_nr);
% grid on

%% LINEARIZAÇÃO
% Polynomial Curve Fit grau 3

%I1_trabalho=([15.4, 12.5, 10.3, 8.9, 7.9, 7.5, 7.3])/sqrt(3);
CarregamentoL=[1.0128, 0.6375, 0.3484, 0.1624, 0.0287, -0.025, -0.052];

%Linear model Poly1:
% f(x) = p1*x + p2
%Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =    0.2279;  %(0.2262, 0.2297)
    p2 =   -1.01;  %(-1.021, -0.9999)

%Goodness of fit:
% SSE: 4.174e-05
% R-square: 1
% Adjusted R-square: 0.9999
% RMSE: 0.002889

f_L = p1*x_med + p2;

plot(x_med,f_L);
% grid on
```

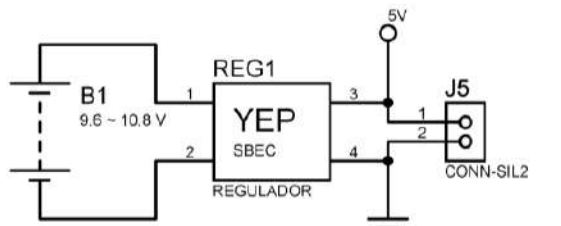
```
legend('Ensaios', 'Referência', 'Gauss-Seidel', 'Newton-Raphson', 'Linearização')
```

```
figure
```

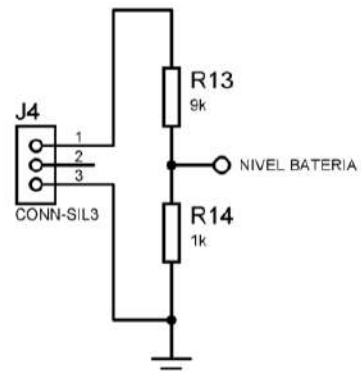
```
erros=([f_gs(32), f_nr(32), f_L(32);...  
f_gs(9141), f_nr(9141), f_L(9141);...  
f_gs(23390), f_nr(23390), f_L(23390);...  
f_gs(40216), f_nr(40216), f_L(40216);...  
f_gs(51391), f_nr(51391), f_L(51391);...  
f_gs(58824), f_nr(58824), f_L(58824)] - ...  
[f_med(32), f_med(32), f_med(32);...  
f_med(9141), f_med(9141), f_med(9141);...  
f_med(23390), f_med(23390), f_med(23390);...  
f_med(40216), f_med(40216), f_med(40216);...  
f_med(51391), f_med(51391), f_med(51391);...  
f_med(58824), f_med(58824), f_med(58824);]) ./ ...  
[f_med(32), f_med(32), f_med(32);...  
f_med(9141), f_med(9141), f_med(9141);...  
f_med(23390), f_med(23390), f_med(23390);...  
f_med(40216), f_med(40216), f_med(40216);...  
f_med(51391), f_med(51391), f_med(51391);...  
f_med(58824), f_med(58824), f_med(58824);])*100;
```

```
bar([0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5],erros);grid on  
xticks([.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5]);  
xlabel('Carregamento')  
ylabel('erro (%)')  
%title('Carregamento')  
legend('Gauss-Seidel', 'Newton-Raphson', 'Linearização')
```

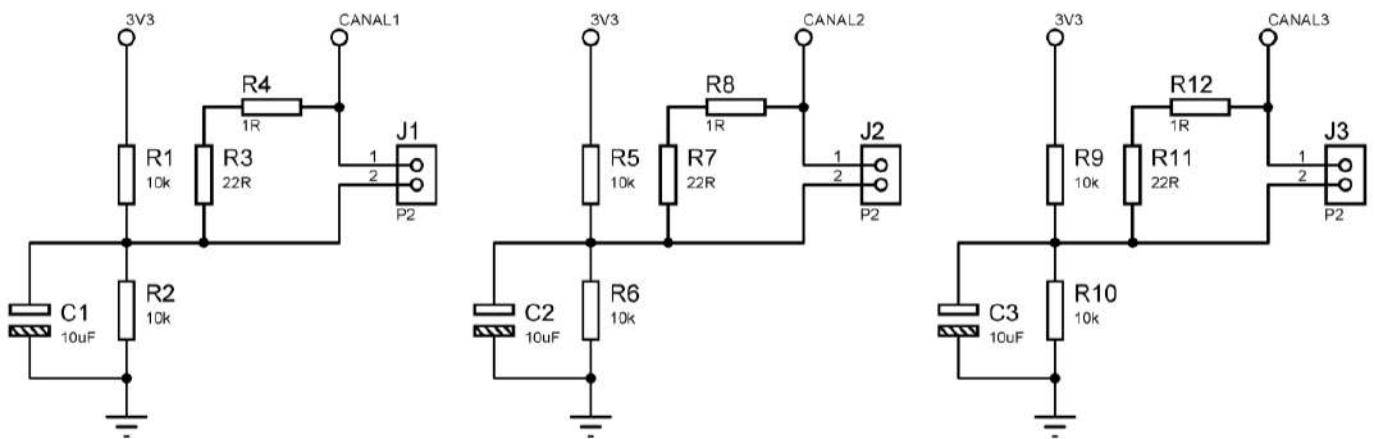
APÊNDICE E – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DISPOSITIVO ANALISADOR



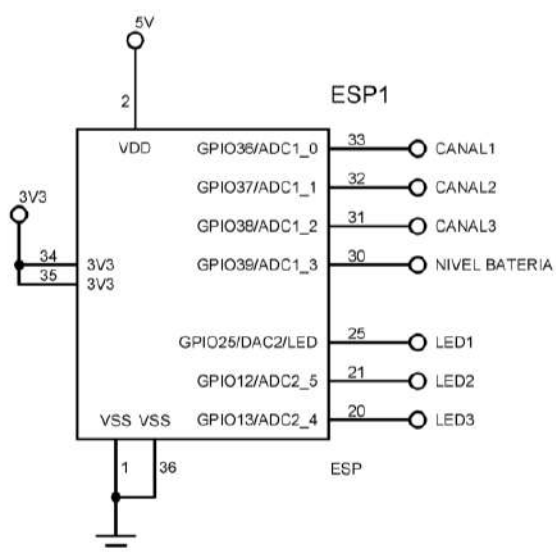
a) Alimentação e regulação de tensão



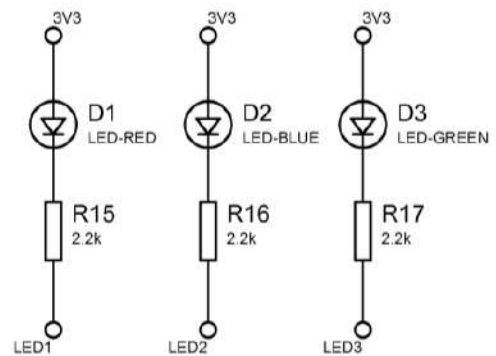
b) Nível da bateria



c) Circuito de condicionamento de sinal

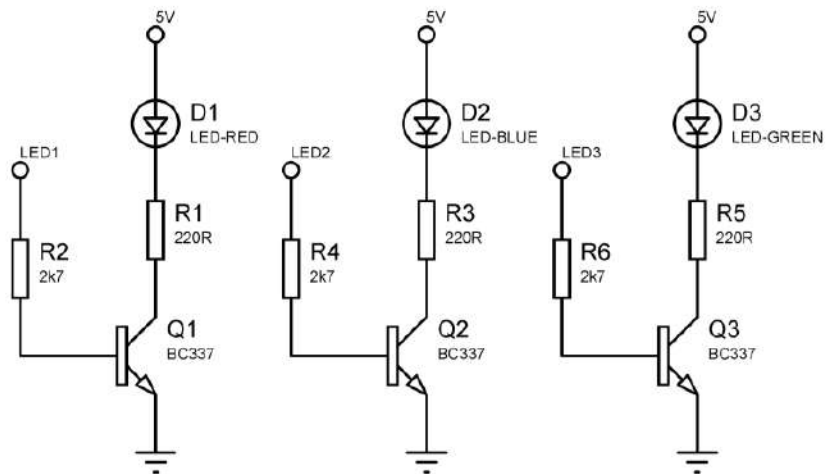


d) Wifi LoRa 32

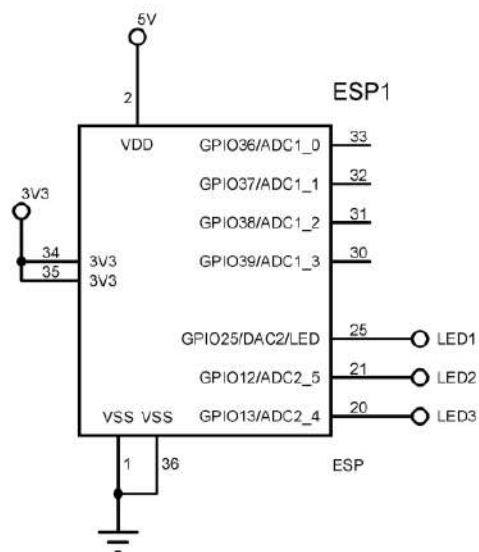


e) Sinalização

APÊNDICE F – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DISPOSITIVO ROTEADOR



a) Sinalização



b) Wifi LoRa 32

ANEXO A – DATASHEET WIFI LORA 32



Technical Parameters

source	parameter
MCU	ESP32(240MHz Tensilica LX6 dual-core + 1 ULP, 600 DMIPS, 520KB SRAM, Wi-Fi, dual mode Bluetooth)
LoRa chip	SX1276 (868 and 915 version); SX1278 (433 and 470 version)
LoRa bands	EU_433, CN_470_510, EU_863_870, US_902_928 four bands optional
LoRa maximum output power	18dB ± 2dB
Hardware resources	UART x 3; SPI x 2; I2C x 2; I2S x 1
	12 – bits ADC; 8 – bits DAC
	29 general GPIO
Display	0.96 inch 128*64 OLED display
FLASH	8MB(64M-bits) SPI FLASH
interface	Micro USB x 1; LoRa antenna interface(IPEX) x 1
Size	50.2 x 25.5 x 9.74 mm
USB to UART Bridge	CP2102
Battery Type	3.7V Lithium (SH1.25 x 2)
Battery detection circuit	√
External device power	√





Electrical characteristics

Electrical characteristics	condition	Minimum	Typical	Maximur
Power Supply	USB powered (≥500mA)	4.7V	5V	6V
	Lithium powered (≥250mA)	3.3V	3.7V	4.2V
	3.3V (pin) powered (≥150mA)	2.7V	3.3V	3.5V
	5V (pin) powered (≥500mA)	4.7V	5V	6V
Power consumption(mA)	WIFI scan		115mA	
	WIFI AP		135mA	
	LoRa 10dB emission		50mA	
	LoRa 12dB emission		60mA	
	LoRa 15dB emission		110mA	
Output	3.3V pin output			500mA
	5V pin output (USB powered only)		Equal to the input current	
	External device power control (Vext 3.3V)			350mA

