



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Cainã Mundstock Cunegatto

**Estudo e Desenvolvimento de Novas Funcionalidades Aplicadas ao Diagnóstico
Avançado do Perfil de Utilização de Inversores de Frequência WEG**

Florianópolis
2023

Cainã Mundstock Cunegatto

**Estudo e Desenvolvimento de Novas Funcionalidades Aplicadas ao Diagnóstico
Avançado do Perfil de Utilização de Inversores de Frequência WEG**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Carlos Montez, Dr.

Supervisor: Guilherme Mazon Hessmann, Eng.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cunegatto, Cainã

Estudo e desenvolvimento de novas funcionalidades aplicadas ao diagnóstico avançado do perfil de utilização de inversores de frequência WEG / Cainã Cunegatto ; orientador, Carlos Montez, 2023.

109 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Engenharia de Controle e Automação. 3. Vida útil de componentes eletrônicos. 4. Indicadores de Desempenho. 5. Inversor de frequência. I. Montez, Carlos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Cainã Mundstock Cunegatto

**Estudo e Desenvolvimento de Novas Funcionalidades Aplicadas ao Diagnóstico
Avançado do Perfil de Utilização de Inversores de Frequência WEG**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 27 de fevereiro de 2023.

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.
Orientador
UFSC/CTC/DAS

Guilherme Mazon Hessmann, Eng.
Supervisor WEG Drives & Controls

Prof. Odilson Tadeu Valle, Dr.
Avaliador
Instituição IFSC

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.
Presidente da Banca
UFSC/CTC/DAS

Este trabalho é dedicado aos meus familiares, amigos pessoais, colegas de curso, gestores do conhecimento e todas as pessoas que fizeram parte da minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus familiares, por todo o apoio, suporte, confiança e amor durante toda minha trajetória até aqui, aos meus amigos e amigas pessoais, que foram fundamentais nos momentos de descontração, mas também nos momentos de necessidade, a todos os professores da graduação de engenharia de controle e automação - UFSC, por compartilhar de toda sua sabedoria e experiências, a todas as empresas que me deram oportunidade de por em prática os conceitos aprendidos em sala de aula, especialmente a WEG e toda sua equipe de pesquisa e desenvolvimento por todo suporte no desenvolvimento deste presente projeto.

RESUMO

A solução proposta neste projeto de fim de curso foi desenvolvida durante o ano de 2022, na área de desenvolvimento de redes de comunicação para drives seriados de baixa tensão na empresa WEG Drives & Controls, que é uma das empresas do grupo WEG, onde são desenvolvidas as soluções para a linha de automação e controle industrial. Com a ascensão dos conceitos apresentados pela Indústria 4.0, a busca por produtos inteligentes, com conectividade e capazes de gerar o maior número de informações para satisfazer a experiência do cliente ganhou notoriedade. É neste contexto que boa parte das equipes de pesquisa e desenvolvimento das grandes empresas estão inseridas. Dessa forma, realizou-se um estudo e desenvolvimento de novas funcionalidades para integração em um novo módulo de diagnóstico avançado do perfil de utilização de inversores de frequência WEG. Neste presente trabalho são abordadas as funcionalidade de estimativa de vida útil do módulo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e dos capacitores do inversor. Além disso, também é proposta a adoção de alguns indicadores de desempenho julgados como importantes para adquirir informações relevantes acerca do desempenho do produto nas diferentes aplicações de inversores de frequência. A criação deste novo módulo converge com a ideia de gerar informações relevantes para as manutenções preditivas dos componentes, garantir a integridade de funcionamento do equipamento, adquirir informações sobre a utilização do inversor ao longo do seu tempo de vida, além de servir como gerador de dados para abordagens futuras. No decorrer deste documento, serão apresentadas as principais técnicas utilizadas, as formulações matemáticas dos problemas abordados, o desenvolvimento de software da implementação e os resultados obtidos.

Palavras-chave: Módulo de diagnóstico. Vida útil de componentes eletrônicos. Indicadores de Desempenho. IGBT. Capacitores. Inversor de frequência. Indústria 4.0. Conectividade.

ABSTRACT

The solution proposed in this undergraduate project was developed during the year 2022, in the area of development of communication networks for low voltage serial drives in the company WEG Drives & Controls, which is one of the companies in the WEG group, where the solutions for the industrial automation and control line are developed. With the ascendancy of the concepts presented by Industry 4.0, the search for intelligent products, with connectivity and able to generate the most information to satisfy the customer's experience has gained notoriety. It is in this context that most of the research and development teams of large companies are inserted. In this way, a study and development of new functionalities for integration into a new advanced diagnostic module for the WEG frequency inverters usage profile was carried out. In this work, the functionalities for estimating the useful life of the IGBT (Insert Inserted Gate Bipolar Transistor) module and the inverter capacitors are addressed. In addition, it is also proposed the adoption of some performance indicators deemed important to acquire relevant information about the product performance in different applications of frequency inverters. The creation of this new module converges with the idea of generating relevant information for predictive maintenance of the components, ensuring the integrity of the equipment's operation, acquiring information about the use of the inverter over its lifetime, besides serving as a data generator for future approaches. Throughout this document, the main techniques used, the mathematical formulations of the problems addressed, the software development of the implementation and the results obtained will be presented.

Keywords: Diagnostic Module. Life span of electronic components. Performance Indicators. IGBTs. Capacitors. Frequency inverter. Industry 4.0. Connectivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha de inversores de baixa frequência - WEG	19
Figura 2 – Exemplo de um Módulo IGBT	20
Figura 3 – Distribuição de falhas em sistemas eletrônicos de potência por componentes	21
Figura 4 – WEG eletromotores Jaraguá - 1961	29
Figura 5 – Componentes do módulo IGBT e seus coeficientes de expansão térmica	32
Figura 6 – Principais causas de estresse em componentes eletrônicos	33
Figura 7 – Número de ciclos $\times \Delta T_j$	34
Figura 8 – Fator de correção do número de ciclos de acordo com o período da variação da temperatura de junção.	35
Figura 9 – Evolução da temperatura de junção ao longo do tempo durante uma aplicação para inversores de frequência.	36
Figura 10 – Resultado esperado pelo exemplo através do monitoramento pelo método de temperatura de junção máxima.	37
Figura 11 – Curva exemplo da Figura 9 ampliada para exemplificar o monitoramento do <i>ripple</i> de T_j	38
Figura 12 – Tela de seleção das informações do capacitor - software EPCOS/TKD.	39
Figura 13 – Tela de seleção das condições de operação do capacitor - software EPCOS/TKD.	39
Figura 14 – Tabela gerada pelo sinal de corrente nos capacitores.	40
Figura 15 – Gráfico das amplitudes da corrente em rms em relação a frequência simulada.	41
Figura 16 – Resultado da simulação de duas condições de operação.	42
Figura 17 – Esquemático FramePI para definição de indicadores de desempenho.	44
Figura 18 – Gráfico de $T_{j_{max}}$ para exemplificar nova regra de reversão.	52
Figura 19 – Gráfico de $T_{j_{ripple}}$ para exemplificar nova regra de reversão.	52
Figura 20 – Gráfico da Frequência para exemplificar nova regra de reversão. . .	52
Figura 21 – Resultado dos ciclos da variação de $T_{j_{max}}$ utilizando apenas a primeira regra de reversão.	53
Figura 22 – Resultado dos ciclos da variação de $T_{j_{max}}$ após a inclusão da segunda regra de reversão.	53
Figura 23 – Dados do número de ciclos estipulado para $\Delta T_j < 45^\circ\text{C}$	56
Figura 24 – Comparação gráfica para $\Delta T_j < 45^\circ\text{C}$	57
Figura 25 – Dados do número de ciclos estipulado para $\Delta T_j > 45^\circ\text{C}$	57
Figura 26 – Comparação gráfica para $\Delta T_j > 45^\circ\text{C}$	58
Figura 27 – Exemplo de leitura da temperatura do IGBT	59

Figura 28 – Fluxograma de inicialização da função de estimativa de vida útil do módulo IGBT.	61
Figura 29 – Fluxograma de operação da função de estimativa de vida útil do módulo IGBT.	62
Figura 30 – Motor utilizado para levantamento de curvas de operação do inversor de frequência.	63
Figura 31 – Inversor de frequência utilizado para levantamento de curvas de operação.	63
Figura 32 – Painel para aplicação de carga utilizado no levantamento de curvas de operação.	64
Figura 33 – Diagrama ladder para variação do setpoint de velocidade de rotação do motor - 1.	64
Figura 34 – Diagrama ladder para variação do setpoint de velocidade de rotação do motor - 2.	64
Figura 35 – Gráfico de tendência gerado pelo WPS.	65
Figura 36 – Recorte da tabela de dados exemplo em .xml.	65
Figura 37 – Placa de testes utilizada para validação de algoritmos.	66
Figura 38 – Gráfico geral com os parâmetros de interesses monitorados - Simulação 1.	67
Figura 39 – Gráfico de $T_{j_{max}}$ ampliado - Simulação 1.	68
Figura 40 – Gráfico da amplitude do <i>ripple</i> ampliado - Simulação 1.	68
Figura 41 – Gráfico da frequência de saída ampliado - Simulação 1.	69
Figura 42 – Valor do gasto esperado da vida útil do módulo IGBT através da análise manual - Simulação 1.	70
Figura 43 – Valor dos contadores, gasto por grupo de contadores e gasto total da vida útil do módulo IGBT pela depuração do algoritmo em firmware - Simulação 1.	70
Figura 44 – Gasto da vida útil do módulo IGBT pela depuração do algoritmo em firmware - Simulação 1.	71
Figura 45 – Gráfico geral com os parâmetros de interesses monitorados - Simulação 2.	72
Figura 46 – Gráfico de $T_{j_{max}}$ ampliado - Simulação 2.	72
Figura 47 – Gráfico da amplitude do <i>ripple</i> ampliado - Simulação 2.	73
Figura 48 – Gráfico da frequência de saída ampliado - Simulação 2.	73
Figura 49 – Valor do gasto esperado da vida útil do módulo IGBT através da análise manual - Simulação 2.	74
Figura 50 – Gasto da vida útil do módulo IGBT pela depuração do algoritmo em firmware - Simulação 2.	74
Figura 51 – Gráfico de $T_{j_{max}}$ ampliado - Simulação 3.	75

Figura 52 – Avaliação da variação da temperatura para o método de T_j máximo.	75
Figura 53 – Gráfico da amplitude do <i>ripple</i> ampliado - Simulação 3.	75
Figura 54 – Gráfico da frequência de saída ampliado - Simulação 3.	75
Figura 55 – Incrementos do <i>ripple</i> resultantes da etapa 1 - Simulação 3.	76
Figura 56 – Incrementos do <i>ripple</i> resultantes da etapa 2 - Simulação 3.	76
Figura 57 – Incrementos do <i>ripple</i> resultantes da etapa 3 e 4 - Simulação 3. . .	76
Figura 58 – Gasto da vida útil do módulo IGBT pela depuração do algoritmo em firmware - Simulação 3.	77
Figura 59 – Gráfico geral com os parâmetros de interesses monitorados - Simu- lação 4.	78
Figura 60 – Recorte do arquivo de configuração para publicação dos dados em nuvem.	79
Figura 61 – Recorte do arquivo de configuração para publicação dos dados do IGBT em nuvem.	80
Figura 62 – Telas com os dados da função da estimativa de vida útil do módulo IGBT na plataforma WMFM.	80
Figura 63 – Levantamento da vida útil dos capacitores na condição de 100% da corrente nominal ND.	81
Figura 64 – Fluxograma de inicialização da função de estimativa de vida útil dos capacitores.	83
Figura 65 – Fluxograma de operação da função de estimativa de vida útil dos capacitores.	83
Figura 66 – Simulação do gasto da vida útil dos capacitores - Iteração 1.	84
Figura 67 – Simulação do gasto da vida útil dos capacitores - Iteração 2.	85
Figura 68 – Simulação do gasto da vida útil dos capacitores - Iteração 3.	85
Figura 69 – Fluxograma de operação do indicador de contagem das energizações.	86
Figura 70 – Energizações pré desligar a alimentação da potência.	87
Figura 71 – Inversor alimentado pelo controle e potência desligada.	87
Figura 72 – Número de energizações do inversor pós realimentar a potência. . .	87
Figura 73 – Número de energizações do inversor pré desligar a potência - WMFM.	88
Figura 74 – Tensão no link CC 1 - WMFM.	88
Figura 75 – Número de energizações do inversor pós realimentar a potência - WMFM.	88
Figura 76 – Tensão no link CC 2 - WMFM.	89
Figura 77 – Exemplo de cálculo da temperatura média.	90
Figura 78 – Fluxograma de operação da função das temperaturas médias de operação.	91
Figura 79 – Teste das temperaturas médias - Simulação 1.	92
Figura 80 – Recorte da tabela de dados e valor médio gerado pelo Excel.	92

Figura 81 – Resultado por firmware da simulação 2.	93
Figura 82 – Indicador de temperaturas médias - integração com o módulo WMFM (1).	93
Figura 83 – Indicador de temperaturas médias - integração com o módulo WMFM (2).	94
Figura 84 – Fluxograma de operação da função do indicador de contagem da proteção de sobrecarga.	95
Figura 85 – Valor do indicador de proteção de sobrecarga pré teste.	96
Figura 86 – Corrente nominal efetiva do inversor utilizado para teste.	96
Figura 87 – Corrente de saída do inversor durante o teste - 1.	96
Figura 88 – Corrente de saída do inversor durante o teste - 2.	96
Figura 89 – Valor do indicador de proteção de sobrecarga pós teste.	97
Figura 90 – Indicador de início da contagem da proteção de sobrecarga - integra- ção com o módulo WMFM.	97
Figura 91 – Fluxograma de operação da função do indicador de contagem das falhas de interesse.	98
Figura 92 – Valor do indicador do número de falhas por dessaturação pré teste.	99
Figura 93 – Processo de forçar falha - 1.	99
Figura 94 – Processo de forçar falha - 2.	99
Figura 95 – Valor do indicador do número de falhas por dessaturação pós teste.	99
Figura 96 – Indicador dos contadores de falha - integração com o módulo WMFM.	100
Figura 97 – Fluxograma geral de operação dos contadores de tempo.	101
Figura 98 – Teste dos indicadores de tempo integrados com a plataforma WMFM.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicadores e justificativas	46
Tabela 2 – Relação entre contadores e faixas de ΔT_j máxima	53
Tabela 3 – Relação entre contadores e faixas de ΔT ripple	54
Tabela 4 – Resumindo o fator de correção	55
Tabela 5 – Resumindo o total de ciclos esperado	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica.
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor.</i>
BJT	Transistor Bipolar.
FET	Transistor de Efeito de Campo.
SEP	Sistema Eletrônico de Potência.
DC	<i>Direct Current.</i>
CC	Corrente contínua.
CNI	Confederação Nacional da Indústria
WMFM	WEG Motion Fleet Management.
FramePI	Framework for Building Performance Indicators.
WAU	WEG Automação.
IGBT4	IGBT geração 4 da fabricante Infineon..
CV	Cavalo-vapor.
WPS	WEG Programming Suite.
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport.</i>
ND	Normal Duty.

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔT_j	Varição da temperatura de junção.
T_j	Temperatura de junção.
$T_{j_{max}}$	Temperatura de junção máxima.
$T_{j_{min}}$	Temperatura de junção mínima.
$T_{j_{ripple}}$	Ripple da temperatura de junção.
$T_{j_{med}}$	Temperatura de junção média.
kh	Quilo-horas (horas x1000).
I_o	Corrente de saída.
P_o	Potência de saída.
F_o	Frequência de saída.
I_{nom}	Corrente nominal.
$I_{nom_{ef}}$	Corrente nominal efetiva.
N_{ciclos}	Número de ciclos.
$T_{j_{max}^i}$	Temperatura de junção máxima inicial.
$T_{j_{max}^f}$	Temperatura de junção máxima final.
$\Delta T_{j_{max}}$	Amplitude da variação da temperatura de junção máxima.
$\Delta T_{j_{ripple}}$	Amplitude do ripple da temperatura de junção.
$t_{A_{kH}}$	Tempo de amostragem em kH.
T_{med}	Temperatura média.
T_{atual}	Temperatura atual.
N	Número de amostras.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	PROPOSTA GLOBAL	18
1.2	DEFINIÇÕES INICIAIS	18
1.2.1	O Inversor de Frequência	19
1.2.2	A Importância dos IGBT's	20
1.2.3	A Importância dos Capacitores	21
1.2.4	O conceito de Vida Útil	21
1.2.5	Indicadores de Desempenho	22
1.3	UM PARALELO COM O CENÁRIO TECNOLÓGICO ATUAL	23
1.3.1	Indústria 4.0	23
1.3.2	Manutenção Preditiva	24
1.4	METODOLOGIA	25
1.4.1	Vida Útil do Módulo IGBT	25
1.4.2	Vida Útil dos Capacitores	26
1.4.3	Indicadores de Desempenho	26
1.4.4	Integração com o WMFM	27
1.5	OBJETIVOS	27
1.5.1	Objetivo Geral	27
1.5.2	Objetivo Específico	27
1.6	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	28
2	A EMPRESA WEG	29
2.1	INTRODUÇÃO	29
2.2	UM POUCO DE HISTÓRIA	29
2.3	CONTEXTUALIZAÇÃO	30
3	FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS	32
3.1	ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DO MÓDULO IGBT	32
3.1.1	O Módulo e a Principal Causa de Falha	32
3.1.2	Modelagem do Estudo	33
3.1.3	Métodos de Monitoramento da Temperatura de Junção	35
3.1.3.1	Método 1: Monitoramento da Temperatura de Junção Máxima	36
3.1.3.2	Método 2: Monitoramento do <i>Ripple</i> da Temperatura de Junção	37
3.2	ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DOS CAPACITORES	38
3.2.1	Software AIcap Useful Life Calculation Tool - EPCOS/TKD	39
3.2.2	Software LTspice	39
3.2.3	Exemplo de Simulação	41
3.3	INDICADORES DE DESEMPENHO	43
3.3.1	FramePI	43

3.3.1.1	Passo 1 - Definição do Processo Crítico	44
3.3.1.2	Passo 2 - Definição dos Indicadores	45
3.3.1.3	Passo 3 - Justificativa da Importância	46
3.3.1.4	Passo 4 - Definição das Fórmulas e Normatizações e Passo 5 - Planejamento de Medição	50
3.3.1.5	Passos 6,7 e 8 - Averiguar Consistência, Análise de Viabilidade, Acordo de Uso	50
4	DESENVOLVIMENTO DOS SOFTWARES	51
4.1	ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DO MÓDULO IGBT	51
4.1.1	Definições Iniciais	51
4.1.1.1	Métodos 1: Monitoramento da Temperatura de Junção Máxima . . .	51
4.1.1.2	Método 2: Monitoramento do <i>Ripple</i> da Temperatura de Junção . . .	54
4.1.1.3	Resumo das Informações Relevantes dos Métodos de Monitoramento	54
4.1.1.4	Definição dos Valores do Número de Ciclos	55
4.1.1.5	Temperatura de Junção	58
4.1.1.6	Definição do Cálculo do Gasto do IGBT	59
4.1.2	Criação da Função de Vida Útil do Módulo IGBT	59
4.1.2.1	Fluxograma de Inicialização	60
4.1.2.2	Fluxograma de Operação	61
4.1.3	Resultados e Análise Exploratória	63
4.1.3.1	Validação do Algoritmo	63
4.1.3.1.1	<i>Simulação 1</i>	67
4.1.3.1.2	<i>Simulação 2</i>	71
4.1.3.1.3	<i>Simulação 3</i>	75
4.1.3.1.4	<i>Simulação 4</i>	77
4.1.3.2	Integração com a Plataforma WMFM	78
4.2	ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DOS CAPACITORES	80
4.2.1	Definições Iniciais	80
4.2.2	Criação da Função de Vida Útil dos Capacitores	82
4.2.2.1	Fluxograma de Inicialização	82
4.2.2.2	Fluxograma de Operação	83
4.2.3	Resultados e Análise Exploratória	83
4.3	INDICADORES DE DESEMPENHO	86
4.3.1	Passos 9, 10, 11, 12 - Prepara, implanta, libera e verifica IDs . . .	86
4.3.2	Número de Energizações do Inversor	86
4.3.2.1	Fluxograma de Operação	86
4.3.2.2	Resultados e Análise Exploratória	87
4.3.3	Temperaturas Médias de Operação	89
4.3.3.1	Fluxograma de Operação	90

4.3.3.2	Resultados e Análise Exploratória	91
4.3.4	Número de Contagem da Proteção de Sobrecarga	94
4.3.4.1	Fluxograma de Operação	94
4.3.4.2	Resultados e Análise Exploratória	95
4.3.5	Contadores de Falhas	97
4.3.5.1	Fluxograma de Operação	98
4.3.5.2	Resultados e Análise Exploratória	98
4.3.6	Contadores de Tempo	100
4.3.6.1	Fluxograma de Operação	100
4.3.6.2	Resultados e Análise Exploratória	101
5	CONCLUSÃO	103
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROPOSTA GLOBAL

A ideia inicial proposta pelo projeto é desenvolver funcionalidades para integração em um módulo de diagnóstico aplicado ao uso de inversores de frequência de baixa tensão. A motivação do projeto começou com a reclamação de um cliente, que entrou em contato com a gerência responsável do setor de desenvolvimento de drives seriados da WEG Automação, solicitando um parecer a respeito da durabilidade do módulo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dos inversores da empresa. De acordo com o cliente, a sua aplicação resultava em um rápido desgaste do componente em inversores concorrentes, comprometendo o desempenho e causando interrupções indesejadas na operação.

Em conjunto com a empresa parceira fornecedora do componente foi elaborado um estudo preliminar acerca da durabilidade do módulo. No decorrer deste trabalho, uma funcionalidade que estimava a vida útil do módulo IGBT do inversor de frequência foi desenvolvida.

Neste contexto, em conjunto com a proposta de outra área de negócio da empresa (WEG Digital) de criar um novo módulo com diagnóstico avançados na sua ferramenta de monitoramento inteligente de plantas industriais “WEG Motion Fleet Management” (WMFM), teve-se a ideia de desenvolver algumas outras funcionalidades para futura integração ao módulo. Assim, foi realizado um estudo para, além da vida útil do módulo IGBT, desenvolver a vida útil dos capacitores, outro componente fundamental dos inversores de frequência. Além disso, foram propostos alguns indicadores de desempenho, necessários para gerar informações sobre o perfil de utilização dos inversores e, em conjunto com a aplicação WMFM, gerar dados para futuras aplicações.

1.2 DEFINIÇÕES INICIAIS

Para entendimento da abordagem do tema, alguns conceitos serão definidos. Logo, a seguir serão apresentados o produto (inversor de frequência), os principais componentes envolvidos na solução proposta (módulo IGBT e capacitores) e a função de ambos para diversas aplicações industriais. Em seguida será apresentado os conceitos de vida útil e de indicadores de desempenho, que são soluções derivadas das tecnologias habilitadoras propostas e possibilitadas pelo atual momento tecnológico advento da indústria 4.0.

1.2.1 O Inversor de Frequência

Segundo o guia de aplicação para inversores de WEG (MASCHERONI *et al.*, 2005), o motor de indução é o responsável por transformar a energia elétrica em mecânica. Esse sistema era comumente utilizado para velocidades fixas, devido à necessidade de utilizar dispositivos secundários de conversão de energia para variar a velocidade. Contudo, com o avanço do mercado de semicondutores de potência na década de 80, foi possível implementar sistemas de variações de velocidade eletrônicos. Esse tipo de dispositivo eletrônico ficou conhecido como inversor de frequência e, através dele, o motor de indução, ao contrário do que acontece quando ligado diretamente a rede elétrica, pode ser alimentado com frequência e tensão variáveis, possibilitando a obtenção de uma velocidade variável no eixo do motor. Alguns dos benefícios desse equipamento são a flexibilidade, suavidade nas partidas e paradas, redução de desgaste mecânico e proteção eletrônica do motor. Essas características, resultam em redução do custo com a energia, melhora no desempenho das máquinas e redução da manutenção, dando maior produtividade e lucro ao processo.

Essa capacidade dos inversores de frequência faz com que ele tenha uma aplicabilidade em diversos processos industriais, tais como esteiras transportadoras (variação da velocidade de transporte), sistema de dosagem (variação da velocidade de alimentação), ventiladores (variação de vazão de ar), bombas (variação de vazão de líquidos). A Figura 1 ilustra a linha de inversores de baixa frequência da WEG.

Figura 1 – Linha de inversores de baixa frequência - WEG



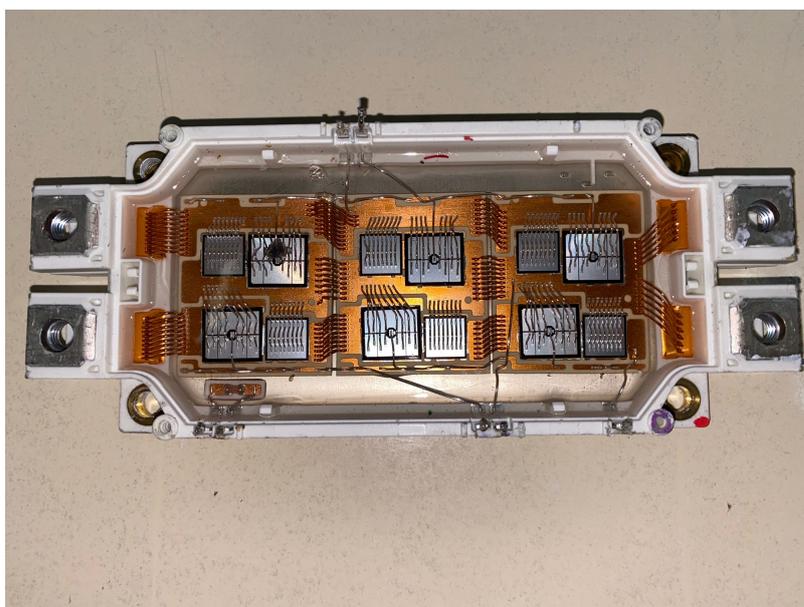
Fonte: Material interno de desenvolvimento WEG.

1.2.2 A Importância dos IGBT's

O nome IGBT, que significa “Transistor Bipolar de Porta Isolada” em português, é um tipo de dispositivo semicondutor de potência. Ele combina as características de um transistor bipolar (BJT) e um transistor de efeito de campo (FET), possibilitando o controle preciso da corrente elétrica através dele. Devido à sua capacidade de lidar com altas correntes e tensões, é amplamente utilizado em aplicações como controle de motores, conversão de energia e amplificação de potência. A porta isolada, que é basicamente um MOSFET, permite o controle capacitivo e o baixo consumo de energia (KHANNA, 2004).

Os IGBT's são amplamente utilizados em sistemas de controle de velocidade de motores elétricos, pois eles permitem o controle preciso da corrente elétrica. Eles são usados em conjunto com retificadores e inversores de frequência para converter a corrente alternada trifásica da rede elétrica em uma tensão contínua. Após passar por um processo de filtragem, essa tensão é então utilizada para gerar ondas de saída com diferentes formatos, através de uma combinação de chaves abertas ou fechadas. Dessa forma, é possível alterar a frequência e amplitude de saída, permitindo o controle preciso da velocidade do motor. Em aplicações WEG, um conjunto de normalmente 6 IGBT's são agrupados em um único módulo, chamado de “módulo IGBT”. A Figura 2 mostra o exemplo de um módulo IGBT.

Figura 2 – Exemplo de um Módulo IGBT



Fonte: Autoria própria.

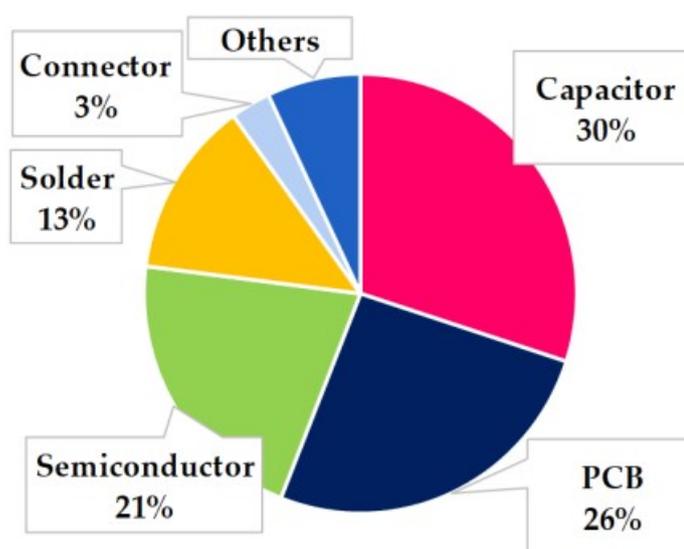
1.2.3 A Importância dos Capacitores

Os capacitores são compostos por duas partes condutoras (chamadas de armadura) separadas por um material isolante (ou dielétrico), eles são responsáveis por armazenar uma certa quantidade de energia em um circuito elétrico. Essa capacidade da estrutura armazenar cargas elétricas é dada pela capacitância. Devido à sua grande capacidade em alcançar altos valores de capacitância e tensão em conjunto com seu baixo custo e volume reduzido, os capacitores eletrolíticos são amplamente utilizados nos SEP's (Sistemas Eletrônicos de Potência) (MEHL, 2000).

Os capacitores DC-link são amplamente utilizados em conversores de energia para compensar as flutuações instantâneas de potência entre a fonte de entrada e a carga de saída, e reduzir a variação de tensão no link DC. Em algumas aplicações, eles também são usados para fornecer energia suficiente durante o período de retenção (WANG, H.; BLAABJERG, 2014).

Entre os componentes eletrônicos de potência, os capacitores são os principais causadores de falhas (KIM *et al.*, 2020). Portanto, este componente é foco em pesquisas e estudos que visam prever possíveis falhas. A Figura 3 demonstra a distribuição típica de falhas em sistemas eletrônicos de potência.

Figura 3 – Distribuição de falhas em sistemas eletrônicos de potência por componentes



Fonte: (KIM *et al.*, 2020).

1.2.4 O conceito de Vida Útil

O conceito de vida útil é amplamente estudado e aplicado em vários campos, incluindo a engenharia, a contabilidade e a gestão de ativos, portanto muitas vezes

acaba sendo subjetivo e baseado em premissas ou estimativas. Ele se refere ao período de tempo durante o qual um bem é capaz de executar sua função de forma adequada antes de se tornar obsoleto ou inoperável.

Existem várias definições de vida útil, como a vida útil técnica e a vida útil contábil. A vida útil técnica é o período de tempo durante o qual o bem é capaz de realizar a função para a qual foi projetado, enquanto a vida útil contábil se refere ao período de tempo esperado que o bem possa prover serviços e registrar contabilmente a transferência de valores investidos para a empresa (RAINERI, 2010).

Neste estudo, estamos interessados em prever o momento em que os componentes em questão (módulo IGBT e capacitores) não serão mais capazes de executar sua função corretamente, então nos concentraremos no conceito de vida útil técnica.

1.2.5 Indicadores de Desempenho

Apesar de grande parte das pessoas associarem os indicadores de desempenho apenas à parte administrativa e econômica das empresas, qualquer processo ou recurso é avaliável quanto ao seu desempenho. Portanto, resolveu-se trazer esta abordagem para a área de pesquisa e desenvolvimento de produtos como método de avaliação do produto na aplicação desenvolvida, possibilitando a verificação e validação do projeto. Vale ressaltar que a avaliação do desempenho de uma determinada aplicação deve ser feita com base em critérios devidamente identificados e mensuráveis, afinal não pode-se gerir algo que não é medido de maneira confiável.

Os sistemas de medição de desempenho são fundamentais no atual cenário das empresas, pois consistem em um conjunto de procedimentos e indicadores que buscam medir o desempenho das atividades, processos e a organização das mesmas. Inclusive, os sistemas de medição de desempenho devem ser capazes de fornecer dados para monitorar o desempenho tanto passado quanto futuro, fortalecendo estratégias e fornecendo dados para o *benchmarking* (VARISCO *et al.*, 2018).

Uma parte fundamental para desenvolvimento de indicadores é saber diferenciá-los de dados e métricas. De acordo com o estudo proposto por (GUEDES; CÁSSIA FONSECA; ROCIO STRAUHS, 2021) temos as seguintes definições:

1. **Dados:** fatos discretos e objetivos sobre eventos.
2. **Indicadores:** unidade de informação, que sintetizam ou realçam características de um sistema.
3. **Métricas:** base comparativa para determinar com mais precisão a qualidade da informação combinando indicadores, heurísticas e algoritmos para quantificar a qualidade da informação utilizada em diferentes contextos.

Os indicadores de desempenho deste presente projeto serão operacionais, internos e qualitativos, pois eles visam adquirir informações da operação de um produto desenvolvido internamente com base em valores mensuráveis. Os indicadores de desempenho por si só não servem como fonte de dados históricos e, então, como um dos focos deste projeto é a geração de dados que possibilitem reconhecimentos de possíveis padrões e formulação de novos indicadores de desempenho no futuro, a integração destes indicadores na plataforma WMFM será fundamental.

1.3 UM PARALELO COM O CENÁRIO TECNOLÓGICO ATUAL

1.3.1 Indústria 4.0

Com a chegada da quarta revolução industrial, a conectividade e a troca de informações entre os componentes de uma planta industrial gerou uma grande quantidade de dados e informações. Quando bem utilizadas e processadas, essas informações proporcionam uma melhor experiência para os clientes e melhor planejamento, otimizando o lucro e o tempo (SACOMANO *et al.*, 2018).

De acordo com a CNI – Confederação Nacional da Indústria (ANDRADE, 2020), o percentual das empresas nacionais que não implementaram projetos da Indústria 4.0 está em 50%. Essas afirmam que conseguiram manter a competitividade com base em outros ativos que não a eficiência produtiva e a competência no campo da tecnologia, porém essa situação não mostra-se sustentável ao médio e longo prazo. Logo, as grandes empresas buscam aplicar a transformação tecnológica da Indústria 4.0 com a utilização de soluções cada vez mais equipadas de tecnologias que permitem o acesso e desenvolvimento de informações e indicadores.

Neste contexto, algumas das tecnologias da Indústria 4.0 são de importante relevância para o desenvolvimento do trabalho em questão, tais como:

1. **Internet das coisas:** conjunto de objetos inteligentes, como dispositivos domésticos, dispositivos móveis e laptops, que possuem um endereço único e estão conectados à internet através de uma estrutura unificada, como a computação em nuvem (ALI, Z. H.; ALI, H. A.; BADAWY, 2015). Assim, permite a integração de diferentes tecnologias capazes de coletar dados, mantendo o equipamento sempre conectado, facilitando o monitoramento de informações em tempo real.
2. **Computação em nuvem:** modelo que permite o acesso conveniente e sob demanda a um conjunto compartilhado de recursos de computação configuráveis, como redes, servidores, armazenamento, aplicativos e serviços, que podem ser rapidamente disponibilizados e liberados com pouco esforço de gerenciamento ou interação com o provedor de serviços (MELL; GRANCE *et al.*, 2011).

3. **Big Data e Analytics:** "big data" é o termo usado para descrever grandes conjuntos de dados com estrutura complexa e variada, que apresentam desafios para armazenamento, análise e visualização. O processo de investigação de grandes volumes de dados para revelar padrões escondidos e correlações é conhecido como análise de grande volume de dados (SAGIROGLU; SINANC, 2013).
4. **Machine Learning:** através da utilização de softwares e algoritmos de Machine Learning, os equipamentos podem tomar ações autônomas com base no conhecimento adquirido a partir dos dados. Isso permite que as máquinas aprendam e melhorem continuamente sem intervenção humana, tornando o processo mais eficiente e preciso (MURDOCH *et al.*, 2019).

1.3.2 Manutenção Preditiva

É através das tecnologias propostas pela Indústria 4.0, como as apresentadas anteriormente, que a solução proposta neste projeto de fim de curso torna-se possível. Através das unidades processadoras presentes no inversor de frequência conseguimos desenvolver funções e acessar informações para além de um estudo apenas teórico. Assim, proporcionando uma melhor experiência e satisfação dos clientes, que com o acesso a informação possui a flexibilidade para planejar-se e evitar perdas no processo produtivo.

Um dos conceitos que ajuda no planejamento de paradas indesejadas é a chamada manutenção preditiva. Esse conceito é definido na norma ABNT NBR 5462/1994 como um modelo baseado na implementação de técnicas de análise da condição, e evitar paradas indesejadas.

Inicialmente, este conceito de manutenção preditiva pode não ser muito valorizado por grande parte das pessoas. Por muito tempo, os processos produtivos e as empresas em geral prezaram pelos conceitos da manutenção corretiva, que é a forma mais primitiva de manutenção, pois é uma manutenção de emergência (MARQUES; BRITO, 2019).

No entanto, com os processos cada vez mais automatizados e integrados entre si, uma parada indesejada pode causar um prejuízo enorme para a empresa, pois ao ocorrer uma quebra temos um longo percurso que demanda tempo até a normalização. Como exemplo dos agravantes de uma parada indesejada podemos citar:

1. acidentes que podem ser causados devido a uma parada repentina;
2. descoberta do motivo da quebra, o que torna-se mais difícil sem acesso à informação rápida;
3. analisar e realizar possíveis retrabalhos de lotes produzidos pré parada de máquina, pois mesmo que a máquina estivesse funcionando os lotes podem ter tido

uma queda significativa em qualidade;

4. reparo dos componentes, que em tempos de crise no mercado de componentes pode ser um grande problema devido ao longo tempo de espera;
5. reteste da máquina.

Uma quebra inesperada pode causar longos tempos de espera e significativos prejuízos financeiros para as empresas. No trabalho exposto por (GALÉ, 2019), a simples aplicação de análise de fluidos em máquinas agrícolas para substituir a manutenção corretiva por preditiva resultou em economias de 95,4% para tratores e 59,1% para colhedoras nas manutenções. Da mesma forma, a empresa Syncrude conseguiu economizar 20 milhões de dólares canadenses em um ano aplicando manutenção preditiva em 131 caminhões de transporte e 5 pás, baseando-se nas informações sobre o processo de deterioração e o potencial de falha dos veículos conforme apresentado por (MARTIN PROVENCHER, 2020). Portanto, é claro que soluções baseadas em técnicas de manutenção preditiva podem gerar significativas reduções de custos para as empresas.

1.4 METODOLOGIA

Focando na metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, cada funcionalidade desenvolvida teve suas particularidades e elas são brevemente descritas nas subseções seguintes.

1.4.1 Vida Útil do Módulo IGBT

O estudo dessa funcionalidade foi desenvolvido em conjunto com uma das empresas fornecedoras, a Infineon. A empresa forneceu curvas relacionadas à durabilidade com a temperatura a qual o módulo é submetido. Assim, ficou definida que a temperatura de junção do módulo seria a principal componente a ser analisada para modelar os gastos da sua vida útil.

Em seguida, foram feitas as formulações matemáticas e as hipóteses que o algoritmo deveria seguir para ser capaz de realizar os cálculos de acordo com a evolução da temperatura de junção do módulo ao longo do tempo. A empresa forneceu uma solução para um determinado perfil de temperatura e aqui começou a participação do autor no projeto, sendo responsável pela validação e formulação de um corpo de algoritmo capaz de suprir todas as possibilidades do projeto.

Com as validações feitas, realizou-se toda a parte de desenvolvimento de software para a implementação da funcionalidade, desde a especificação, escrita do algoritmo e avaliação de resultados em diversas aplicações, tanto reais quanto simuladas. A funcionalidade de vida útil do módulo IGBT teve início durante o estágio obrigatório

do autor na empresa. Porém, ao decorrer deste projeto de fim de curso, foi refinada, finalizada e integrada com o módulo WMFM.

Por fim, com o algoritmo finalizado e validado, foram desenvolvidas as *dashboards* de visualização interna das informações no WMFM em conjunto com a WEG Digital e realizados testes para a publicação dos dados do inversor na plataforma com a utilização de um gateway. Aqui, vale ressaltar que as *dashboards* e interface de comunicação com a plataforma não foram de responsabilidade do autor, o mesmo só ficou responsável por editar o arquivo de configuração, possibilitando o envio das informações para a plataforma e visualização para fim de testes.

Ao longo da apresentação deste projeto serão retomados os conceitos e soluções apontadas ao longo do estágio obrigatório, as diferenças e a responsabilidade de cada uma das partes envolvidas em cada etapa da solução.

1.4.2 Vida Útil dos Capacitores

O desenvolvimento da análise da vida útil dos capacitores se deu através da utilização de *datasheets* e estudos que relacionam os diversos fatores envolvidos no gasto do componente, como base foi utilizado um software de simulação da EPCOS, onde através das condições de operação dos diferentes modelos de capacitores é retornado uma vida útil esperada. Para apoio ao simulador da EPCOS, foi montado o circuito elétrico do inversor de frequência, através da ferramenta LTspice, com ele foi possível estipular os valores para preenchimento dos campos exigidos pelo software da EPCOS.

Com a análise das simulações realizadas, foi possível estabelecer a vida útil esperada para operação do inversor de frequência em corrente nominal e uma relação de aumento ou diminuição da expectativa da vida útil em relação a diferentes correntes de operação.

Assim, foi possível realizar a formulação matemática do problema e toda a parte de implementação do software, envolvendo as mesmas etapas citadas na vida útil do módulo IGBT. Porém, até o fim deste trabalho, a funcionalidade não foi integrada com o WMFM devido ao tempo hábil.

1.4.3 Indicadores de Desempenho

Para o desenvolvimento desses indicadores, foi levantado os parâmetros e condições de operação consideradas mais relevantes para o funcionamento do inversor de frequência. Em seguida, foram escolhidos os métodos de tratamento dos dados para gerar informações relevantes, tais como: média dos valores, tempo em determinada condição e número de vezes que ocorreu uma determinada falha devido ao estresse do inversor. A determinação dos indicadores se deu pela necessidade da empresa e

sentimento dos desenvolvedores, com embasamento no método FramePI, cujo sua fundamentação será exposta na Seção 3.3.

Com os indicadores definidos, foi realizada toda a implementação de desenvolvimento de firmware e integração com o WMFM, conforme explicado na subseção de vida útil dos capacitores. Assim, os indicadores podem ser acessados facilmente pelas partes interessadas.

1.4.4 Integração com o WMFM

Algo importante de ressaltar é que todas as funcionalidades desenvolvidas e os dados levantados podem ser acessadas pelos engenheiros através do próprio produto. Dessa forma, evita-se que as informações sejam perdidas em caso de inversores que não estão conectados a uma rede, possibilitando a análise por parte da equipe de desenvolvimento em todas as possíveis necessidades, com a desvantagem de não poder visualizar a evolução dos dados ao longo do tempo. A integração em rede com o WMFM faz-se importante para geração de dados futuros, que podem facilitar a identificação de padrões e soluções focadas na Indústria 4.0.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do projeto é fornecer o estudo e desenvolvimento de novas funcionalidades que proporcionem a geração de informações sobre o perfil de utilização dos inversores de frequência WEG e, ainda, possibilite a empresa adquirir alguns dados sobre aplicação do produto para desenvolvimentos futuros.

Em um primeiro momento pós desenvolvimento, as funcionalidades serão utilizadas internamente, onde apenas a engenharia e a assistência técnica terão acesso as informações para verificação de informações, de modo que possibilite a equipe de assistência técnica na identificação de possíveis causas de quebra em campo e a engenharia na busca pela validação das funcionalidades.

Após esse primeiro momento, busca-se dar mais um passo nas soluções propostas pela Indústria 4.0, principalmente a aplicabilidade dos conceitos de manutenção preditiva, antes inéditas em inversores de frequência, com a integração das funcionalidades em um novo módulo com diagnóstico avançados acerca do uso de inversores de frequência.

1.5.2 Objetivo Específico

O objetivo específico do projeto é dividido em duas principais partes, primeiro o desenvolvimento de métodos para analisar os gastos de dois componentes fundamentais dos inversores de frequência, o módulo IGBT e os capacitores, onde através de

estudos acerca do desgaste é possível criar um modelo matemático simplificado que monitore os principais parâmetros envolvidos nos gastos sofridos pelo componente durante a sua vida.

O outro objetivo específico é a geração de indicadores de desempenho de confiabilidade e do produto, onde através deles será possível verificar se o projeto desenvolvido foi bem dimensionado para a aplicação e se os valores levantados estão de acordo com a expectativa das equipe de engenharia, além disso eles serão fundamentais para possível identificação de padrões no futuro, de modo que seja possível estudá-los para obtenção de possíveis padrões pré falhas e atuar de maneira preditiva.

1.6 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A estrutura do documento se dará da seguinte forma:

1. **capítulo 1:** introdução do projeto, onde serão apresentadas a proposta global, motivações, conceitos importantes para entendimento da proposta, metodologia geral, objetivos e estrutura do documento.
2. **capítulo 2:** breve apresentação da empresa, para que os leitores situem-se acerca dos passos que trouxeram a empresa até o presente momento desta solução.
3. **capítulo 3:** apresentação da fundamentação teórica, métodos e estudos desenvolvidos, este capítulo será dividido em seções para cada funcionalidade.
4. **capítulo 4:** todo o processo de desenvolvimento de software, desde as definições iniciais, requisitos e especificações de projeto, até a criação dos algoritmos, testes e resultados obtidos. Este capítulo será dividido em seções para cada funcionalidade.
5. **capítulo 5:** conclusão com base nos principais assuntos abordados durante o projeto, análise geral dos resultados obtidos e desenvolvimentos futuros.

2 A EMPRESA WEG

2.1 INTRODUÇÃO

O projeto de fim de curso foi realizado na empresa WEG Drives & Controls, que é uma das unidades que compõem a WEG. A WEG é mundialmente conhecida por ser uma das maiores fabricantes de motor elétrico do mundo, produzindo anualmente cerca de 19 milhões de motores. Porém, a empresa dedicou foco na diversificação das suas linhas de produtos nos últimos anos, possuindo hoje em dia um portfólio com mais de 1500 linhas de produtos (WEG, 2022).

2.2 UM POUCO DE HISTÓRIA

A empresa foi fundada na década de 60 com o nome de WEG eletromotores Jaraguá. Inicialmente a empresa era de pequeno porte, sediada em Jaraguá do Sul e eram produzidos apenas motores elétricos. Não muito tempo mais tarde, a empresa mudou seu nome para apenas "WEG", uma união das iniciais dos nomes dos seus três principais fundadores Werner, Eggon e Geraldo. Em 1964, deu-se o início da construção do seu primeiro parque fabril (WEG, 2022). Na Figura 4, é ilustrada a WEG nos seus primórdios.

Figura 4 – WEG eletromotores Jaraguá - 1961



Fonte: Página Institucional WEG (WEG, 2022).

Com um rápido crescimento, em 1971, a WEG já foi listada na bolsa de valores e em 1973 a empresa já iniciava a construção do seu segundo parque fabril, exportando motores para mais de 20 países (WEG, 2022).

A década de 80 foi marcada pela ampliação das atividades econômicas da empresa, com a criação da WEG acionamentos, WEG transformadores, WEG energia, WEG química e WEG automação. Isso fez com que a empresa se firmasse não só como fornecedora de motores mas, também de sistemas elétricos industriais completos, produzindo desde componentes eletroeletrônicos até tintas e vernizes (WEG, 2022).

Nos anos 90, a empresa se dedicou a expansão de filiais comerciais no exterior, em países como Estados Unidos, Alemanha, Inglaterra e França, chegando no final da década a exportar para 55 países e possuir 79% de *market share* em motores elétricos no Brasil (WEG, 2022).

Dos anos 2000 em diante, a WEG continua seu foco em expansão fabril e comercial nos mercados internos e externos, adquirindo e construindo novos parques, além de comprar empresas menores que se alinhavam com os objetivos da empresa, entrando no mercado de aerogeradores e, em 2020, a WEG começou a entrar com força no mercado tecnológico voltado para as soluções da Indústria 4.0 (WEG, 2022).

2.3 CONTEXTUALIZAÇÃO

Como pode-se notar, a WEG possui uma história riquíssima e hoje é consolidada como uma das maiores empresas brasileiras, sendo frequentemente uma das melhores e mais notórias empresas listadas na bolsa de valores. Tudo isso contribui no sentido da evolução, a empresa foca seu trabalho nas soluções mais atuais que existem no mercado, investindo pesado em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias.

Nesse sentido, a WEG automação (também chamada de *Drives & Controls*) não é diferente, nela é produzida grande parte dos produtos da linha automação da WEG, que possuem foco em aumentar a produtividade e eficiência dos processos produtivos dos clientes da empresa (WEG, 2022).

A WEG é presidida por um executivo e abaixo dele têm-se diversas diretorias superintendentes, uma delas é a WAU (WEG Automação). Abaixo da diretoria superintendência WAU, surgem outras diversas diretorias, uma delas é a diretoria industrial e desenvolvimento de produtos, é nesta diretoria que se localiza o departamento de desenvolvimento de drives seriados.

É no desenvolvimento de drives seriados que são desenvolvidos os drives de baixa tensão onde ocorreu a realização deste presente projeto, mais especificamente na área de desenvolvimento de redes de comunicação. O setor de desenvolvimento de redes de comunicação (setor foco do projeto) atua em toda a parte de conectividade dos drives da linha WEG automação. Os integrantes do setor de drives de baixa tensão basicamente se dividem para trabalhar em algum produto específico, podendo este ser um produto em desenvolvimento ou algum produto que já faz parte da linha WEG automação porém, necessita de atualizações de projeto, desenvolvimento de novas

funcionalidades etc. O autor do projeto acabou integrando a equipe de desenvolvimento do novo inversor de frequência de baixa tensão de alta performance que a WEG está desenvolvendo.

Por ser um projeto que compõe o que tem de mais atual em termos de tecnologia, ele possui uma grande capacidade de adquirir dados e realizar processamento, o que possibilita o desenvolvimento de funções específicas com foco em soluções propostas pela Indústria 4.0, que proporcionam satisfação e ganhos ao cliente, tais como: a geração de relatórios de uso e desgaste de componentes; diagnóstico e previsão de infuncionalidade do produto; aceleração do processo de identificação das causas e as devidas ações preventivas ou corretivas.

3 FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS

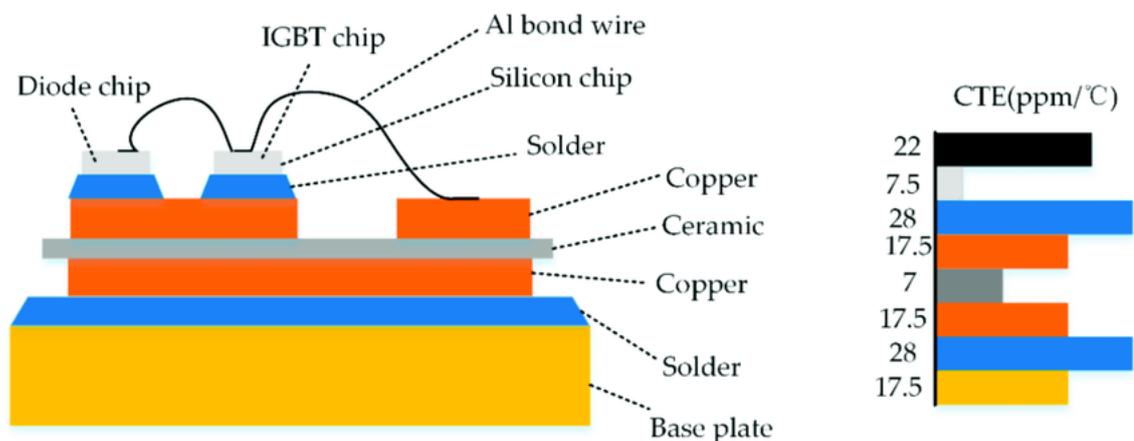
3.1 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DO MÓDULO IGBT

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento da funcionalidade de vida útil do módulo IGBT. São retomados alguns conceitos estudados no decorrer do desenvolvimento do estágio obrigatório do autor que fazem parte da solução final alcançada neste presente projeto de fim de curso.

3.1.1 O Módulo e a Principal Causa de Falha

O módulo IGBT, componente fundamental nas aplicações da indústria de eletrônica de potência, conforme apresentado durante a introdução do presente projeto, possui em sua composição diferentes componentes com coeficientes de expansão térmicos distintos devido às suas diferentes composições. Em geral, o módulo é formado por fios de ligação (normalmente feitos de alumínio), chips de silício (IGBT e diodo), placas de cobre, chapa de cerâmica, placa base, solda e pasta térmica. A relação entre os componentes e seu coeficiente de expansão térmico pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Componentes do módulo IGBT e seus coeficientes de expansão térmica

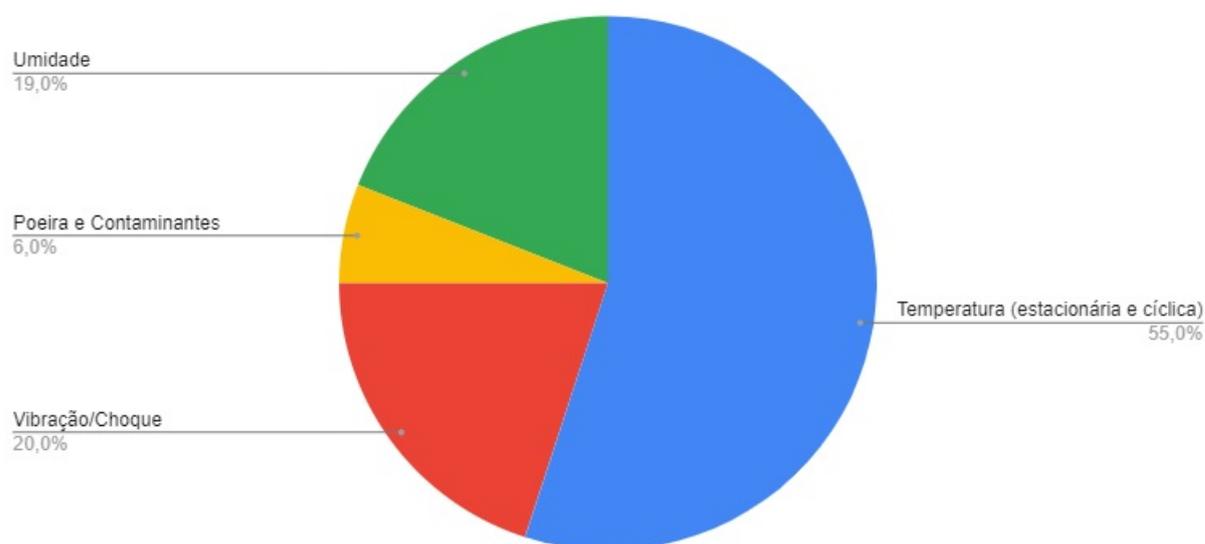


Fonte: (WANG, C. *et al.*, 2020)

De acordo com o gráfico apresentado por (BYRNE; ELEKTRONIKINDUSTRIE, 2008), a principal fonte de estresse em componentes eletrônicos se dá pela temperatura tanto em estado estacionário quanto cíclico (Figura 6).

Ainda de acordo com o estudo proposto por (WANG, C. *et al.*, 2020), os chip IGBT e o chip do diodo são unidos eletricamente por fios de conexão, bem como o chip IGBT e a placa de cobre. Durante o funcionamento do IGBT, o calor gerado pelo chip semiconductor é transferido para o dissipador de calor através da estrutura mul-

Figura 6 – Principais causas de estresse em componentes eletrônicos



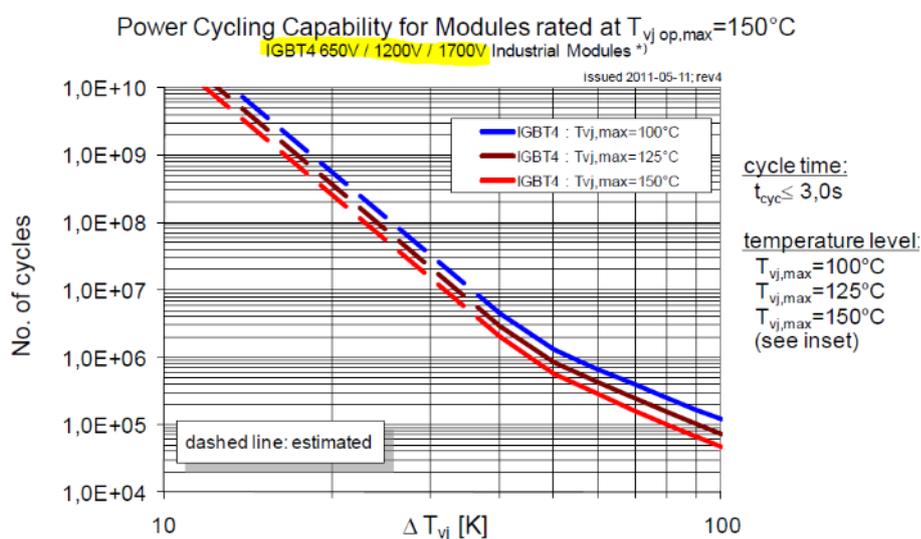
Fonte: Adaptado de (BYRNE; ELEKTRONIKINDUSTRIE, 2008)

ticamada, causando variações de temperatura na chamada "temperatura de junção". Essas variações de temperatura geram tensões mecânicas nos pontos de solda dos fios de ligação. Essas tensões acabam desgastando os fios de ligação até se soltarem por completo, gerando uma reação em cadeia que acaba por resultar na falha do chip IGBT e, conseqüentemente, na falha do módulo.

A falha causada pelo processo citado é a principal fonte de problemas associados aos módulos IGBT's e, portanto, a análise da temperatura de junção será o foco desta solução que visa estimar a vida útil do mesmo.

3.1.2 Modelagem do Estudo

A partir do exposto na seção acima, foi disponibilizado por uma das fabricantes dos módulos IGBT's da WEG, a Infineon, o gráfico que relaciona a quantidade de ciclos da vida útil do módulo em relação as variações sofridas pela temperatura de junção (Figura 7).

Figura 7 – Número de ciclos x ΔT_j .

Fonte: Material de desenvolvimento interno WEG - por Infineon.

Através da Figura 7, nota-se pela escala logarítmica do eixo da temperatura de junção que as curvas podem ser consideradas como uma composição de duas exponenciais, uma para valores de $\Delta T_j < \approx 45^{\circ}\text{C}$ e outra para $\Delta T_j > \approx 45^{\circ}\text{C}$ e, portanto, uma boa aproximação para as curvas se dá por:

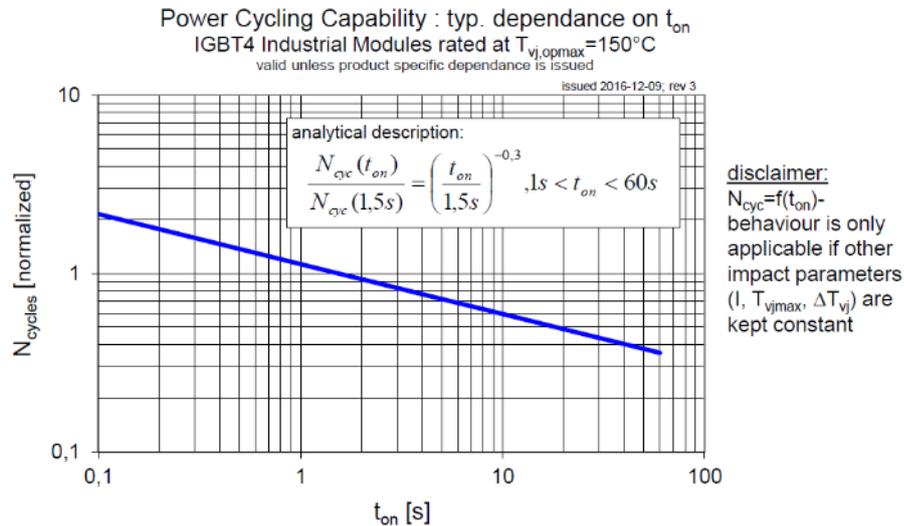
$$N_of_cycles = x \cdot \Delta T_j^y. \quad (1)$$

Onde $x = x_1$ e $y = y_1$ para $\Delta T_j < 45^{\circ}\text{C}$, $x = x_2$ e $y = y_2$ para $\Delta T_j \geq 45^{\circ}\text{C}$.

No entanto, não pode-se observar apenas a variação de temperatura e contar o número de ciclos, é necessário saber o período de duração do mesmo, pois ciclos que atuam por menores períodos de tempo tendem a ser menos estressantes ao módulo, porém com maior repetitividade. Logo, o escopo de análise se dará em cima tanto das variações macros de longo período quanto nas variações menores de curto período (aqui chamadas de *ripple*).

O fator de correção em relação com o período da variação da temperatura de junção também foi disponibilizada pela Infineon (Figura 8). Apesar de ser uma curva específica para o IGBT4 (um dos modelos proprietários da empresa), ficou definido que ele seria expandido para os demais módulos utilizados pela WEG devido à simplificação das análises e por ser definido como uma boa aproximação para os restantes.

Figura 8 – Fator de correção do número de ciclos de acordo com o período da variação da temperatura de junção.



Fonte: Material de desenvolvimento interno WEG - por Infineon.

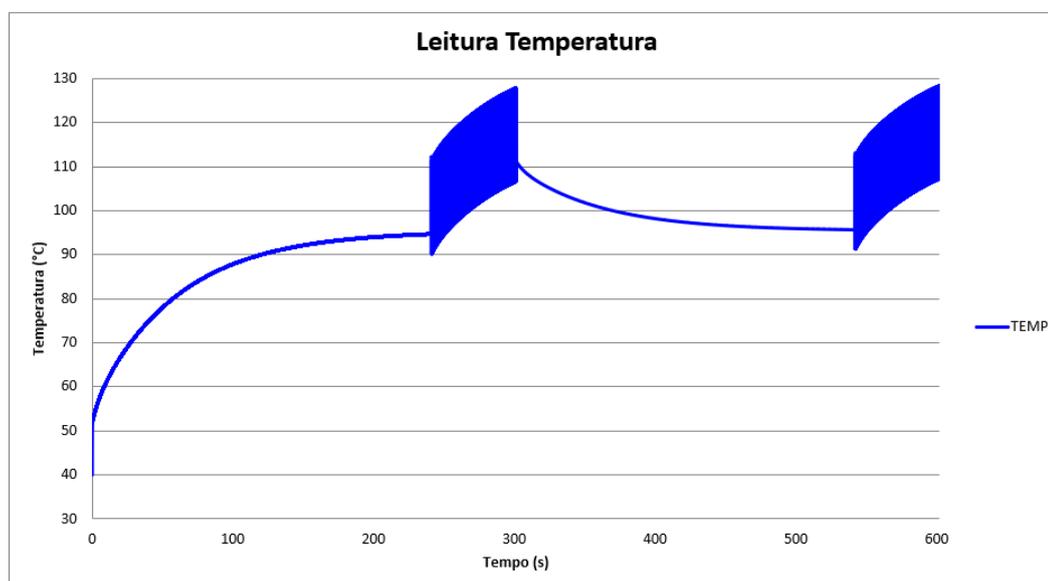
Agora, o número total de ciclos será calculado pela relação:

$$Total_cycles = N_of_cycles \cdot N_{cycles}[normalized]. \quad (2)$$

3.1.3 Métodos de Monitoramento da Temperatura de Junção

As diferentes aplicações dos inversores de frequência, fazem com que não seja possível estipular um perfil de variação de temperatura de junção e assumi-lo como fixo. Logo, precisamos monitorar em tempo real a evolução da temperatura ao longo do tempo. Na Figura 9 é demonstrado um exemplo de como a temperatura de junção evolui ao longo do tempo em uma aplicação de inversores de frequência.

Figura 9 – Evolução da temperatura de junção ao longo do tempo durante uma aplicação para inversores de frequência.



Fonte: Material de desenvolvimento interno WEG - por Infineon.

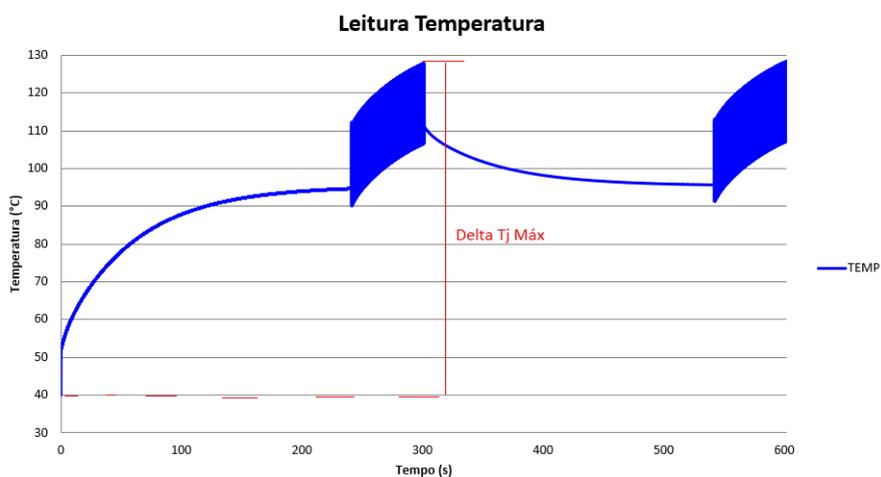
Através da Figura 9 pode-se observar que embora a temperatura da junção tenha uma oscilação ao longo do tempo (*ripple*), o módulo ainda está em aquecimento e não resfriamento. Então, deve ser considerado um ciclo máximo de variação de temperatura, mas não devem ser desconsideradas as pequenas variações causadas pelo ripple. Por esse motivo foram criados dois métodos para o monitoramento da temperatura de junção: T_j máximo do módulo e *ripple* de T_j em baixas frequências.

Outro fato importante de ressaltar aqui é que estaremos interessados em analisar apenas as variações positivas a qual o módulo é submetido, já que os problemas associados ao módulo se dão pelo coeficiente de expansão de seus componentes, conforme explicado na Seção 3.1.1.

3.1.3.1 Método 1: Monitoramento da Temperatura de Junção Máxima

Este método serve para monitorar as variações positivas macro da temperatura de junção, levando em consideração todo o período de aquecimento do módulo e contar como um grande ciclo, sem levar em consideração as quedas de temperatura causadas pelo *ripple*. Portanto, para a aplicação exposta na Figura 9, levando em conta os 300 segundos iniciais, pelo método de monitoramento 1, temos um ciclo de variação de temperatura dado por $128 - 40 = 88$ °C (Figura 10).

Figura 10 – Resultado esperado pelo exemplo através do monitoramento pelo método de temperatura de junção máxima.



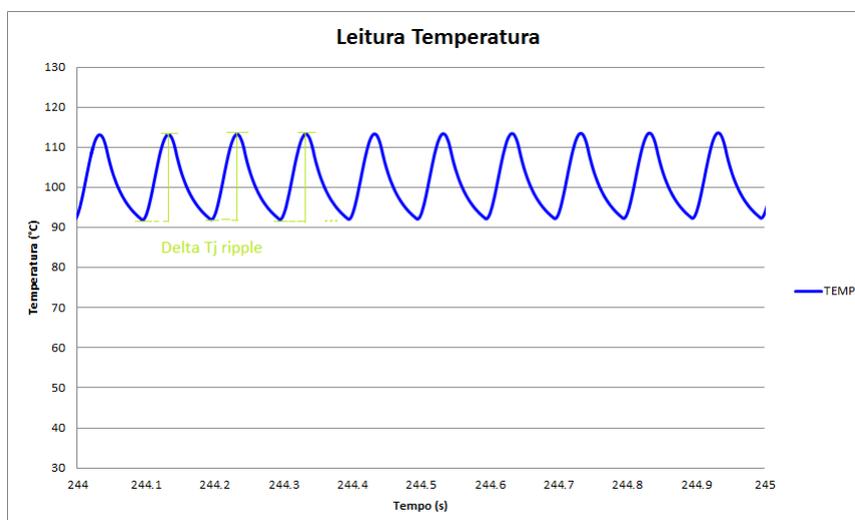
Fonte: Autoria própria.

3.1.3.2 Método 2: Monitoramento do *Ripple* da Temperatura de Junção

Ainda observando a Figura 9, pode-se notar uma espécie de “borrão” na evolução da temperatura a partir dos 240 segundos, este é o que chamamos de *ripple*. Ele aparece tipicamente quando o inversor é submetido a altas correntes e baixa frequência.

Realizando uma aproximação no gráfico, é possível visualizar com clareza o que de fato acontece nessas condições (Figura 11).

Figura 11 – Curva exemplo da Figura 9 ampliada para exemplificar o monitoramento do *ripple* de T_j .



Fonte: Autoria própria.

Conforme explicado ao longo das seções, é importante levar em conta os desgastes sofridos pelo módulo devido a essas pequenas variações e, portanto, devemos ser capazes de identificar todos os incrementos ao longo do *ripple*.

3.2 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DOS CAPACITORES

Conforme apresentado na introdução deste projeto, os capacitores são os principais causadores de falhas em sistemas eletrônicos de potência, porém são inúmeros fatores que influenciam na vida útil destes componentes. De acordo com (PARLER; DUBILIER, 2004), os principais efeitos utilizados para modelar e quantificar o desgaste dos capacitores são:

1. Tensão de operação;
2. Ondulação de corrente;
3. Frequência;
4. Temperatura do ambiente;
5. Fluxo de ar.

As fórmulas matemáticas que modelam a vida útil em termo desses efeitos são bastante complexas. Porém, neste estudo não estamos devidamente interessados em expandi-las, pois atualmente já existem softwares que realizam o cálculo necessário

com base nas condições de operação desejadas e a intenção do projeto é achar uma regra em termos de corrente de operação, que satisfaça grande parte das aplicações dos inversores de baixa tensão WEG.

3.2.1 Software AICap Useful Life Calculation Tool - EPCOS/TKD

Basicamente para a utilização do software, temos uma tela inicial onde é selecionado as informações referentes ao capacitor, normalmente encontradas no datasheet do componente (Figura 12).

Figura 12 – Tela de seleção das informações do capacitor - software EPCOS/TKD.

Fonte: Disponível em <https://cuptools.tdk-electronics.tdk.com/alcap/>.

Em seguida, a Figura 13 mostra a tela de seleção das condições de operação.

Figura 13 – Tela de seleção das condições de operação do capacitor - software EPCOS/TKD.

Fonte: Disponível em <https://cuptools.tdk-electronics.tdk.com/alcap/>.

Nesta tela são selecionadas a tensão do link do capacitor; a temperatura do ambiente, neste caso dada pela temperatura do ambiente somada com a temperatura interna até o capacitor; a velocidade do ar interno, normalmente dada pelo ventilador interno, caso existente no projeto; e, por fim, os valores referentes a amplitude da corrente da ondulação de corrente e a frequência dada no momento da medição.

3.2.2 Software LTspice

A parte mais complexa e fundamental deste processo é encontrar as componentes da ondulação de frequência. Com esse objetivo utiliza-se o software LTspice.

Através dele, é possível montar o circuito elétrico do inversor e realizar simulações de acordo com os valores de entrada do sistema. Por motivos de sigilo do projeto, não será exposta a foto do circuito utilizado.

Simulando o circuito, consegue-se verificar a forma de onda da corrente no capacitor e através da utilização das transformadas de Fourier temos as componentes do sinal (Figura 14).

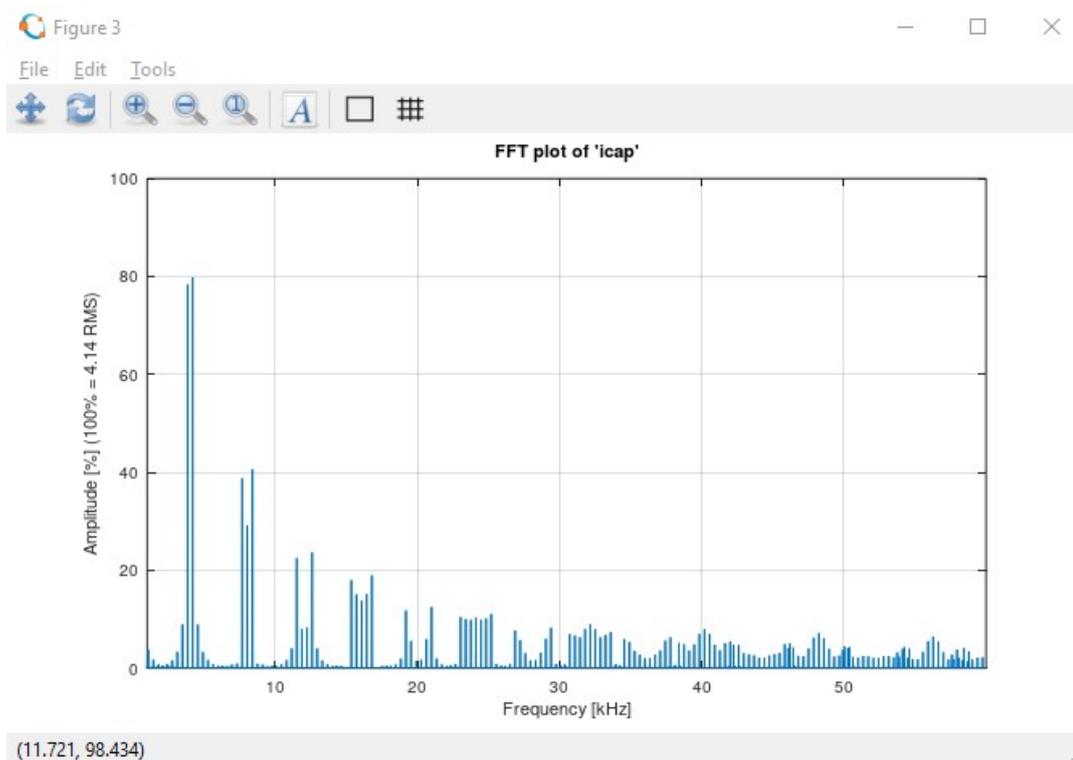
Figura 14 – Tabela gerada pelo sinal de corrente nos capacitores.

Frequency [Hz]	icap Peak Amplitude	icap RMS	Phase [deg]
0	0,00013809	9,76E-05	270
12	0,00018977	0,0001342	187,1965
24	0,00076345	0,0005398	214,5295
35,9999	0,0014223	0,0010057	108,37
47,9999	0,00089099	0,00063	237,4901
59,9999	0,0041561	0,0029388	-51,0842
71,9999	0,0030245	0,0021386	162,0129
83,9998	0,0022224	0,0015715	214,6945
95,9998	0,0051158	0,0036174	-72,0374

Fonte: Autoria própria.

Através destas componentes, pode-se verificar o gráfico das amplitudes da corrente do capacitor em termos da frequência. Tipicamente coloca-se as amplitudes em porcentagem da maior amplitude encontrada (Figura 15).

Figura 15 – Gráfico das amplitudes da corrente em rms em relação a frequência simulada.



Fonte: Autoria própria.

A grande questão aqui é que há muitos valores de corrente do capacitor. Porém, o simulador da EPCOS/TKD só permite o preenchimento de 30 valores. Neste caso, selecionamos os 30 maiores valores gerados pela simulação, logicamente porque estamos interessados nas componentes mais significantes do sinal.

3.2.3 Exemplo de Simulação

Para exemplificar melhor o que conseguimos retirar da composição destes software, simulou-se dois casos:

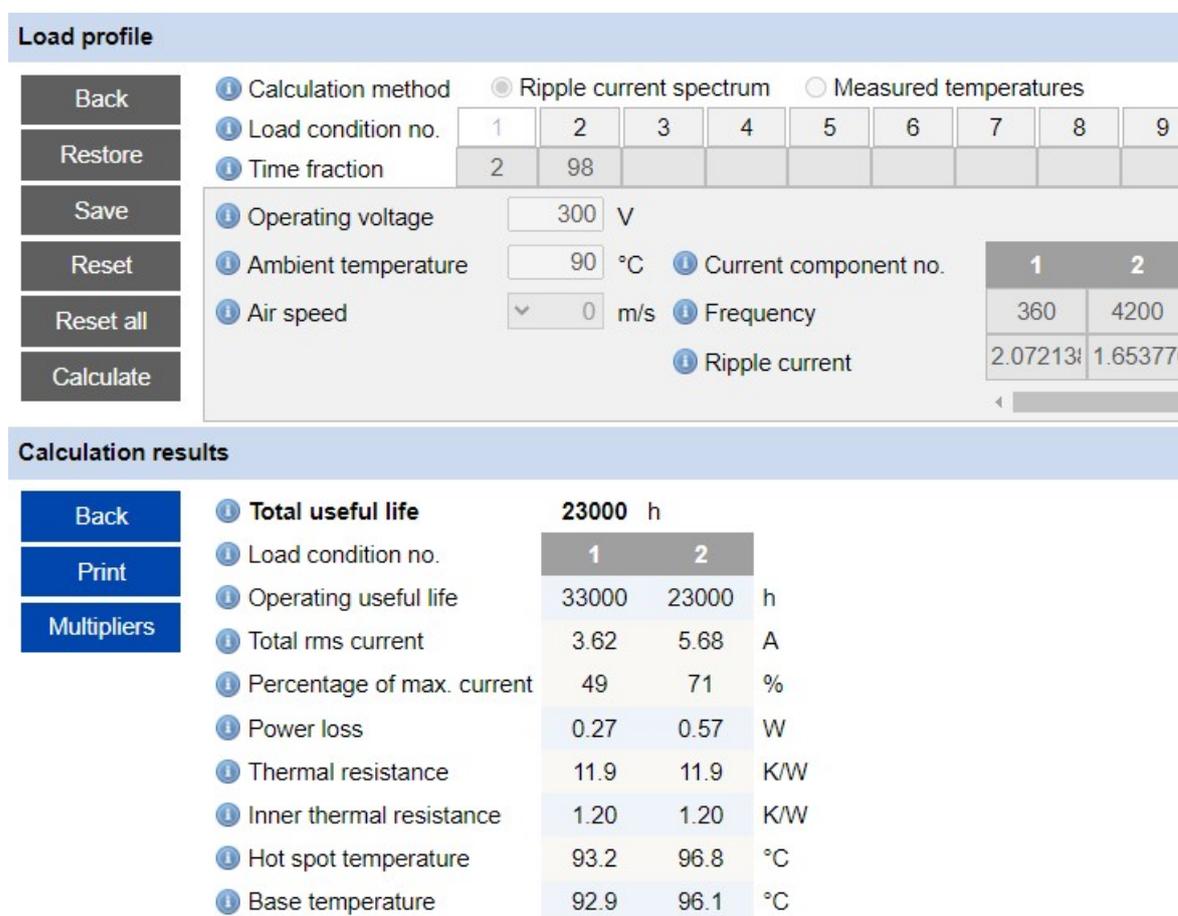
1. **Caso 1:** Inversor alimentado com tensão = 440 V, frequência de saída = 60 Hz, fator de potência = 0.81, inversor para motor de 15 cv com corrente de operação em 100% da corrente nominal, sem ventilador interno e um circuito com 4 capacitores, 2 ramos de 2 capacitores em série.
2. **Caso 2:** Inversor alimentado com tensão = 440 V, frequência de saída = 60 Hz, fator de potência = 0.81, inversor para motor de 15 cv com corrente de operação em 200% da corrente nominal, sem ventilador interno e um circuito com 4 capacitores, 2 ramos de 2 capacitores em série.

Neste caso, para ambas as simulações, os valores a serem preenchidos no simulador são:

1. Operating voltage = 300 V, para aplicações com 440 V de alimentação do inversor, tem-se aproximadamente 600 V no link CC, como são 2 braços, 300 V em cada.
2. Ambient temperature = 90 °C, valor experimental.
3. Air speed = 0, sem ventilador interno.

A única diferença entre eles são os valores da ondulação de corrente, que foram encontradas usando a simulação do circuito pelo LTspice. O resultado da simulação é demonstrado na Figura 16.

Figura 16 – Resultado da simulação de duas condições de operação.



Fonte: Autoria própria.

Ainda da Figura 16, pode-se observar alguns resultados interessantes, que foram replicados para encontrar a regra de aumento e decréscimo da vida útil do componente apresentada nos capítulos seguintes para os capacitores utilizados pela WEG. A operação com 100% da corrente nominal possui vida útil dos de 33 kh, já com

200% da corrente nominal a vida útil é de 22 kh, se o inversor operasse 98% do tempo em 200% da corrente nominal e 2% em 100%, a vida útil dele seria de 22 kh, pois a operação é majoritariamente na condição de 200% da corrente nominal.

3.3 INDICADORES DE DESEMPENHO

Para os indicadores de desempenho, o grande desafio é selecionar quais são de fato relevantes para o problema que deseja-se solucionar, pois escolhas incorretas podem resultar em enganos, análises erradas ou até mesmo não chegar a nenhum resultado com o indicador escolhido. Além disso, os indicadores devem ser específicos, mensuráveis, viáveis, relevantes frente ao custo e com prazo para sua obtenção.

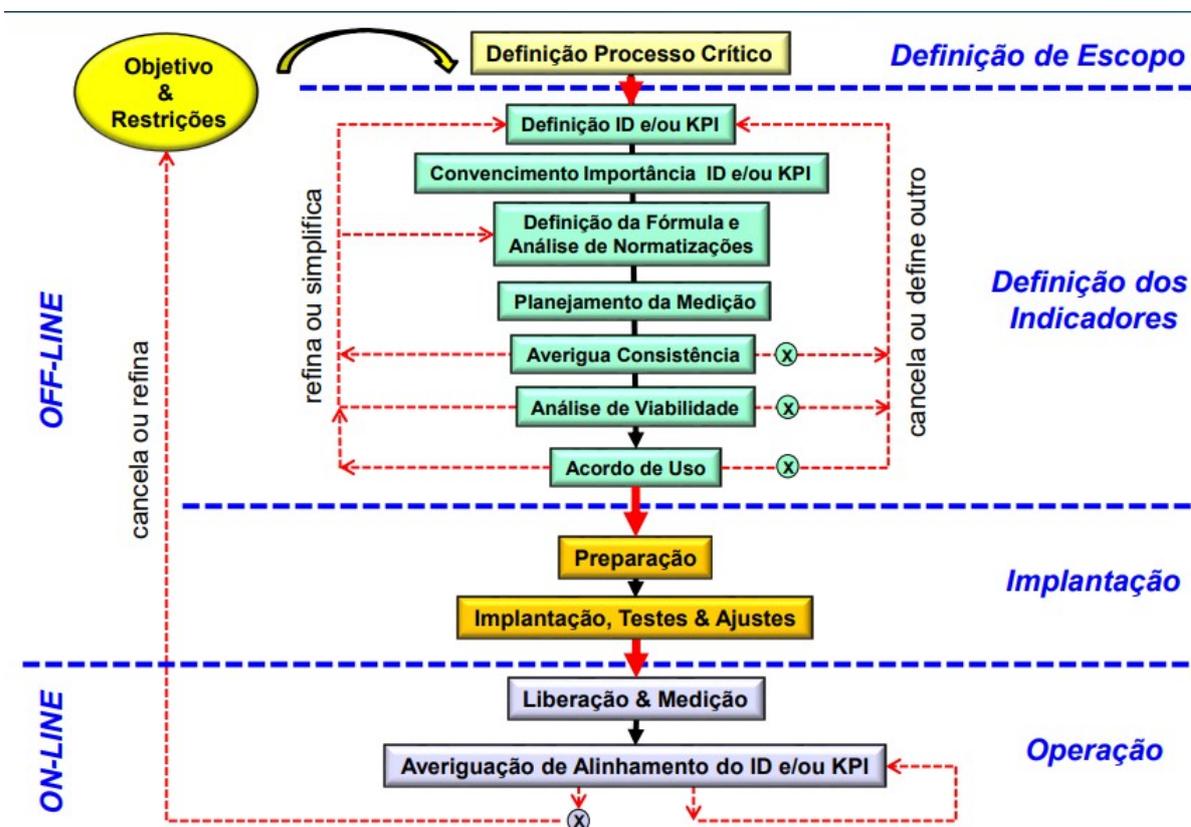
Os indicadores em geral muitas vezes não possuem uma fundamentação teórica e se baseiam no conhecimento próprio dos gestores, que possuem um certo conhecimento sobre o problema que o mesmo procura resolver ou buscar informações e empiricamente justifica a utilização de dados existentes para gerar as informações relevantes. Neste trabalho buscou-se fundamentar as decisões acerca dos indicadores de performance abordados através de um método estudado ao longo da graduação, na disciplina de Avaliação de Desempenho de Sistemas de Automação Discretas, ministrada pelo professor Ricardo José Rabelo, o FramePI (*Framework for Building Performance Indicators*).

3.3.1 FramePI

O método FramePI busca formalizar o processo de geração de um indicador de desempenho, desde a identificação do problema, até a implementação do indicador. Logo o foco do FramePI está na definição dos indicadores e será usado para abordar essa solução ao longo de todo trabalho.

Em geral o FramePI é composto por 12 passos ilustrados no esquemático da Figura 17.

Figura 17 – Esquemático FramePI para definição de indicadores de desempenho.



Fonte: Material interno UFSC - por Ricardo José Rabelo.

Neste capítulo, o foco está na fundamentação da escolha das funcionalidades desenvolvidas, apresentando as motivações, justificativas e dando indícios do que será desenvolvido nos próximos capítulos. Portanto, nesta seção serão abordados os passos 1 até 8 do método FramePI, que tratam da definição dos indicadores. Os demais passos, por se tratarem da parte implementacional e de operação, serão apresentados no decorrer dos próximos capítulos.

3.3.1.1 Passo 1 - Definição do Processo Crítico

O processo crítico que deseja-se melhorar é a validação dos projetos dos inversores de frequência e geração de informações para futuras implementações de análises preditivas, pois até o presente momento deste projeto a empresa quase não tem informações sobre a real aplicabilidade e desempenho dos inversores de frequência, baseando-se muito no *feedback* dos seus clientes. Este cenário acaba dificultando algumas análises, tanto em termos de projeto quanto na identificação da real causa dos problemas em campo, tais como:

1. O inversor está super ou subdimensionado para a aplicação do cliente?

2. Os parâmetros estão atuando dentro dos limites esperados?
3. Qual foi o real motivo da quebra do produto? Excesso de sobrecarga, falha de um componente específico, sobretemperatura constante ou algum outro motivo específico.
4. Depois de quanto tempo de operação ocorreu o problema?
5. Houve algum indício pré-quebra?

3.3.1.2 Passo 2 - Definição dos Indicadores

Uma das etapas mais difíceis de ser cumprida, é definir quais serão os indicadores que devem ajudar a resolver o processo crítico apresentado.

Para a geração de indicadores, muitas vezes são usados os chamados modelos normativos, isto é, baseado em referências. Porém, é comum a utilização de modelos construtivistas, quando os indicadores de desempenho abordam áreas muito específicas do negócio.

Os modelos construtivistas são baseados puramente nos conhecimentos dos gestores de uma determinada área. Neste presente projeto, esse será o modelo utilizado, pois o processo crítico analisado é extremamente dependente de pessoas que possuem conhecimento sobre o produto e sobre as partes críticas do projeto.

Dado o devido contexto, os indicadores definidos foram:

1. Número de vezes que o inversor foi energizado;
2. Novos parâmetros que retornem o valor médio, valor médio diário de operação, valor médio mensal de operação e valor médio anual de operação enquanto o inversor está habilitado dos seguintes parâmetros:
 - a) Temperatura NTC;
 - b) Corrente de saída (Io);
 - c) Potência de saída (Po);
 - d) Temperatura do ar interno da potência;
 - e) Temperatura do ar interno do controle.
3. Número de vezes que foi iniciada a contagem de proteção de sobrecarga dos IGBT's.
4. Número de vezes que ocorreram as seguintes falhas:
 - a) Sobrecorrente na saída;
 - b) Curto-circuito barramento CC;

- c) Sobretensão no link;
- d) Subtensão no link CC;
- e) Sobretemperatura no dissipador;
- f) Sobrecarga do inversor;
- g) Sobretemperatura do ar interno;
- h) Sobretemperatura junção IGBT;
- i) Falha de dessaturação;
- j) Falta à terra;
- k) Falta de fase.

5. Novos parâmetros com contagem de horas que o inversor permaneceu:

- a) Habilitado;
- b) Em operação com frequência de saída (F_o) < 10Hz e corrente de saída (I_o) > 0.5 x Corrente nominal efetiva;
- c) Com temperatura do NTC acima de 70 °C;
- d) Com temperatura interna (potência ou controle) acima de 70 °C.

3.3.1.3 Passo 3 - Justificativa da Importância

Nesta etapa é onde se justifica a escolha dos indicadores e a importância deles para aplicação. Logo, esta etapa pode ser acompanhada de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Indicadores e justificativas

Indicador	Justificativa
Número de vezes que o inversor foi energizado	Representa algumas particularidades da aplicação do cliente, por exemplo: se o inversor está em um local que costuma ter muita falta de energia ou se uma quebra foi precedida de um grande número de energizações, indicando oscilações na rede elétrica etc.
Valores médios da temperatura do NTC (dissipador)	Dá uma ideia sobre a dissipação do calor no inversor, valores médios de temperatura elevados podem indicar problemas no ventilador, temperatura ambiente elevada, alta corrente de saída, acúmulo de sujeira no dissipador.

Indicador	Justificativa
Valores médios da corrente de saída (I_o)	A corrente de saída do inversor é um dos parâmetros fundamentais para análise de inversores de frequência, pois inúmeras falhas estão associadas aos valores altos da mesma. Além de indicar o motivo de falhas específicas quando temos um aumento repentino na corrente média de operação, ela representa fatores de projeto, por exemplo: um cliente possui um inversor projetado para funcionar com 10A, porém sua corrente de operação está muito próxima desse valor, para evitar futuros problemas pode-se sugerir uma troca para uma mecânica que supra melhor a necessidade do mesmo.
Valores médios da potência de saída (P_o)	Por correlacionar corrente e tensão de saída, pode indicar desbalanceamento entre as mesmas, além disso a potência de saída é um parâmetro de dimensionamento de projeto, podendo indicar falhas de projeto.
Valores médios da temperatura do ar interno do controle	Pode indicar temperaturas altas no circuito interno do controle, associado aos mesmos indicativos de valores médios altos no dissipador.
Valores médios da temperatura do ar interno da potência	Pode indicar temperaturas altas no ar interno, associado aos mesmos indicativos de valores médios altos no dissipador.
Número de vezes que foi iniciada a contagem de proteção de sobrecarga dos IGBT's	Os IGBT's são protegidos contra correntes acima do especificado pela mecânica do inversor, quando o inversor opera acima da corrente nominal inicia-se uma contagem de sobrecarga que pode levar o inversor a falhar. Este indicativo é importante para complementar os valores médios da corrente, pois podemos ter aplicações que apesar de não apresentar correntes médias muito elevadas, possui ciclos de sobrecarga relativamente rápidos, podendo prejudicar o inversor. Além disso, pode-se verificar se uma quebra foi precedida de muitos inícios de contagem em um curto espaço de tempo, indicando uso abusivo do equipamento.
Número de falhas por sobrecorrente de saída	Essa falha é gerada normalmente por número de carga muito alta ou rampa de aceleração muito rápida. Grande quantidade de falhas associadas a este parâmetro pode-se levar a identificar necessidade de reparametrização do inversor ou até mesmo necessidade de troca da mecânica para a aplicação do cliente. Em caso de quebras, pode indicar que o inversor não estava adequado ao projeto.
Número de falhas por curto-circuito do barramento CC	Resultado de curto-circuito entre duas fases do motor, cabos de ligação de frenagem reostática ou do módulo IGBT. Indicativo de falhas elétricas na instalação.

Indicador	Justificativa
Número de falhas por sobretensão no link	Resultante de sobretensão no circuito intermediário, seja por alimentação muito alta (acima do permitido pela mecânica do inversor), cargas elevadas, erro de parametrização. Indicativo de erro na alimentação do circuito elétrico, necessidade de reparametrização ou uso inconsistente com a mecânica escolhida para o projeto.
Número de falhas por subtensão no link	Resultante de subtensão no circuito intermediário, seja por alimentação muito baixa (abaixo do permitido pela mecânica do inversor), falta de fase na entrada, falha no circuito de pré-carga, erro de parametrização. Indicativo de falhas no circuito elétrico, necessidade de reparametrização ou uso inconsistente com a mecânica escolhida para o projeto.
Número de falhas por sobretemperatura no dissipador	Complementar aos valores médios da temperatura do NTC, possuindo as mesmas justificativas, porém com agravante de que a temperatura foi tão estressada que a proteção precisou ser acionada para evitar problemas maiores ao inversor.
Número de falhas por sobrecarga do inversor	Complementar aos valores médios da corrente de saída, porém com agravante de que a corrente de saída foi tão estressada que a proteção precisou ser acionada para evitar problemas maiores ao inversor.
Número de falhas por sobretemperatura do ar interno	Complementar aos valores médios da temperatura do ar interno, possuindo as mesmas justificativas, porém com agravante de que a temperatura foi tão estressada que a proteção precisou ser acionada para evitar problemas maiores ao inversor.
Número de falhas por sobretemperatura da junção do IGBT	Mesma justificativa dos valores médios altos da temperatura do ar interno, porém com agravante de que a temperatura foi tão estressada que a proteção precisou ser acionada para evitar problemas maiores ao inversor. Por ser específica do IGBT, pode ainda indicar falha específica no componente e serve como complemento para a funcionalidade de vida útil do IGBT. Grandes números associados a esta falha podem nos indicar que o IGBT deve estar sendo bastante estressado e, portanto, apresentando grandes saltos no gasto da sua vida útil.
Número de falhas por dessaturação	Mesma justificativa do número de falhas por curto-circuito do barramento CC, porém as falhas por dessaturação são específicas para cada braço (U, V e W). Logo, pode indicar o agravamento das falhas por curto-circuito do barramento, pois mais de um braço do inversor pode ter sido curto-circuitado ao mesmo tempo.
Número de falhas por falta à terra	Ocorre quando tem-se sobrecorrente para o terra, podendo indicar curto para o terra, capacitância dos cabos do motor elevada podendo ocorrer picos de corrente na saída. Logo, podemos identificar falhas na instalação do circuito elétrico.

Indicador	Justificativa
Número de falhas por falta de fase	Ocorre por falta de fase na entrada, seja por desequilíbrio na tensão de entrada ou até mesmo inexistência de uma fase na rede de alimentação. Indica falhas no circuito elétrico.
Contador de tempo do inversor habilitado	Habilitado aqui significa que o inversor está operando, ou seja, em modo "run". Este indicador por mais simples que pareça é fundamental para relativizar os valores obtidos pelos outros indicadores. Quando ocorrem 5 falhas por sobrecarga em um tempo de operação de 100 horas não é algo relevante, porém em 1 hora pode ser considerado um grande perigo.
Contador de tempo de operação com frequência de saída (Fo) <10Hz e corrente de saída (Io) >0,5.Inom	Este é um indicador que representa operação forçada do inversor. Muito tempo nessas condições pode indicar que o inversor está operando no seu limite, podendo indicar necessidade de alterações no projeto para evitar quebras.
Contador de tempo com temperatura do NTC acima de 70 °C	Indicador complementar às temperaturas médias da temperatura do NTC. Muito tempo nessas condições também pode representar que o inversor está operando nos seus limites, falhas de componentes ou falha na dissipação de calor.
Contador de tempo com temperatura interna (potência ou controle) acima de 70 °C	Indicador complementar às temperaturas médias do ar interno da potência e controle, podendo representar os mesmos problemas associados a temperaturas altas no NTC, porém diferenciando as áreas afetadas.

A partir das justificativas, pode-se observar que muitas vezes elas podem indicar problemas parecidos. Porém, é importante diferenciá-los pois, de acordo com as condições físicas, um ou outro componente pode estar sendo mais afetado, indicando possível motivo específico de quebra, necessidade de melhora de determinada parte do projeto e etc.

Outro fato relevante é que muitos indicadores são complementares entre si. Muitas vezes, indicadores sozinhos podem não representar um fato relevante. Por isso, quanto mais correlação entre eles, maior é a fundamentação na identificação de possíveis problemas, além de possibilitar um estudo mais aprofundado no futuro para atuações preditivas.

Muitas justificativas passam também pela proposta de integração entre geração de indicadores e a plataforma WMFM porque visualizar apenas um valor em um momento instantâneo pode dificultar muitas análises e até mesmo impossibilitá-las. Mas, com a possibilidade de visualizar dados online durante todo o histórico de operação, essa integração torna-se pertinente.

3.3.1.4 Passo 4 - Definição das Fórmulas e Normatizações e Passo 5 - Planejamento de Medição

Em geral, as fórmulas utilizadas para geração dos indicadores de desempenho são bem triviais por se tratar de um projeto em que busca começar o levantamento de dados acerca da utilização dos inversores.

Para os indicadores sobre número de vezes são utilizados somatórios, mudando apenas a variável lida para cada condição, estes valores não possuem unidade de medição; os valores médios, como o próprio nome já diz, serão utilizadas médias, divididas em média diária, mensal, anual de operação, deste modo é possível manter a resolução da média geral, a unidade de medição será dada pela grandeza do parâmetro medido; os contadores de tempo são somatórios de tempo, também mudando apenas a variável lida para cada condição, os contadores de tempo possuem formato XX:YY:ZZ, onde X é as horas, Y os minutos e Z os segundos.

Todas as medições, bem como o acesso aos parâmetros serão feitas pelo próprio firmware, pois todos os indicadores são baseados em informações que já estão disponíveis na programação ou medição do produto, necessitando apenas tratamento para ser utilizado como um indicador. O período de amostragem utilizado nos indicadores é 10 segundos, com exceção dos contadores de tempo que tem amostragem a cada segundo.

3.3.1.5 Passos 6,7 e 8 - Averiguar Consistência, Análise de Viabilidade, Acordo de Uso

Conforme já explicado, os indicadores serão usados para análise de projeto e, posteriormente, para técnicas preditivas de manutenção, por se tratarem de indicadores de um produto vendido pela própria empresa, onde os dados utilizados são de propriedade da empresa e já estão incluídos no produto, além de ter sido uma ideia da gerência de pesquisa e desenvolvimento do produto. Considera-se que o projeto está de acordo com a consistência organizacional, é viável e não necessita de acordos de uso.

4 DESENVOLVIMENTO DOS SOFTWARES

4.1 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DO MÓDULO IGBT

4.1.1 Definições Iniciais

Para a implementação do algoritmo em firmware precisamos fazer algumas considerações e adaptações acerca do estudo apresentado na seção 3.1.

Decidiu-se dividir o estudo em dois monitoramentos, o monitoramento para T_j máximo e para o *ripple* de T_j , a primeira definição é estipular as condições para cada um dos monitoramentos. Iniciaremos a abordagem apresentando o método de monitoramento para T_j máximo.

4.1.1.1 Métodos 1: Monitoramento da Temperatura de Junção Máxima

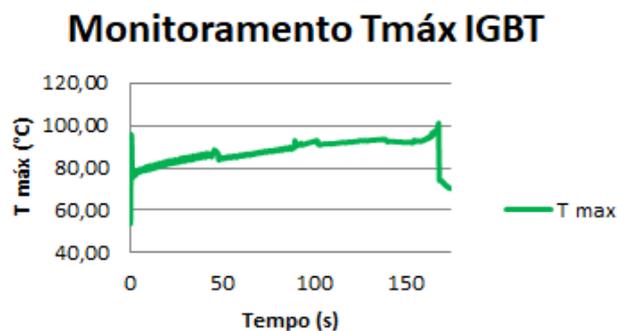
O método de monitoramento da temperatura de junção máxima busca verificar as variações positivas macro da temperatura de junção, ou seja, ao início da operação do inversor tem-se a temperatura inicial, definida neste momento como temperatura mínima. Ao decorrer das iterações deve-se continuar observando a temperatura de junção atualizando os valores máximos e mínimos.

O método de monitoramento é interrompido quando identifica-se uma reversão de tendência. Uma reversão de tendência para o firmware pode ocorrer por dois motivos:

1. Quando $T_j < T_{j_{max}} - 5 \text{ °C}$ e não possui-se *ripple*, pois neste condição pode-se ter uma variação maior que os 5 °C , mas que não significa uma reversão de tendência em $T_{j_{max}}$;
2. Quando $T_j < T_{j_{max}} - 5 \text{ °C}$ por dez iterações seguidas (cerca de 2 segundos) mesmo com a presença do *ripple*. Essa condição inicialmente não havia sido projetada, porém com as simulações e testes do algoritmo, notou-se que nos acionamentos do inversor se tem um pico grande de $T_{j_{max}}$ e, caso o estado do *ripple* fosse mantido pós acionamento, o algoritmo acabava perdendo outra variação de $T_{j_{max}}$, que deveria ser levada em conta, por não reconhecer uma reversão de tendência pós acionamento.

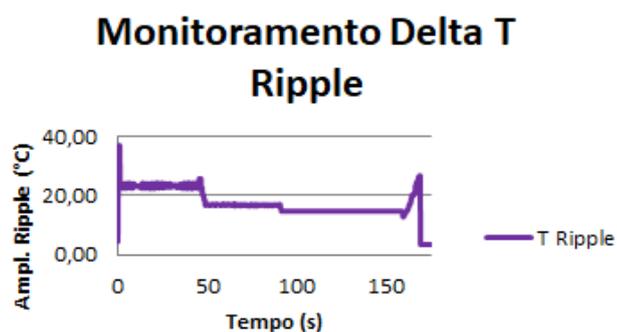
Para exemplificar a necessidade da segunda condição de reversão de tendência, pode-se observar o exemplo abaixo. Através das figuras 18, 19 e 20, é possível observar que durante o acionamento tem-se um pico em $T_{j_{max}}$, porém o exemplo se mantém em estado de *ripple* pós acionamento (frequência $< 15 \text{ Hz}$ e amplitude de $T_{j_{ripple}} > 15 \text{ °C}$).

Figura 18 – Gráfico de $T_{j_{max}}$ para exemplificar nova regra de reversão.



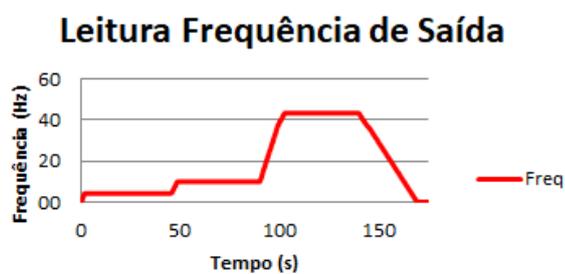
Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Gráfico de $T_{j_{ripple}}$ para exemplificar nova regra de reversão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Gráfico da Frequência para exemplificar nova regra de reversão.



Fonte: Autoria própria.

Logo, utilizando apenas a primeira regra de reversão foi identificado apenas uma variação para $\Delta T_{j_{max}}$ (Figura 21), dada pelo ponto de reversão 90.61 e deixando de fora o valor máximo 101.23 do monitoramento.

Figura 21 – Resultado dos ciclos da variação de $T_{j_{max}}$ utilizando apenas a primeira regra de reversão.

Valor Máximo	Valor Mínimo	Delta T	Curva foi Ascendente?	Qual T Indicou Reversão?
95.83999634	53.29999924	42.5399971	SIM	90.61000061

Fonte: Autoria própria.

Após a correção, incluindo a segunda regra de reversão o resultado alcançado foi o esperado, dois ciclos de variação para $T_{j_{max}}$, conforme apresenta a Figura 22.

Figura 22 – Resultado dos ciclos da variação de $T_{j_{max}}$ após a inclusão da segunda regra de reversão.

Valor Máximo	Valor Mínimo	Delta T	Curva foi Ascendente?	Qual T Indicou Reversão?
95.83999634	53.29999924	42.5399971	SIM	77.01999664
101.2300034	76.550003	24.6800003	SIM	73.79000092

Fonte: Autoria própria.

Então, após a identificação da reversão de tendência, é calculada a diferença de temperatura $\Delta T_{j_{max}}$ para cálculo do número máximo de ciclos associado. Para a implementação em firmware, as temperaturas foram divididas em faixas para armazenamento das temperaturas em contadores. Os contadores estipulados para $\Delta T_{j_{max}}$ são expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação entre contadores e faixas de ΔT_j máxima

Contador	Faixa de ΔT_j máxima
25	15...25 °C
30	25.1...30 °C
35	30.1...35 °C
40	35.1...40 °C
45	40.1...45 °C
55	45.1...55 °C
65	55.1...65 °C
75	65.1...75 °C
85	75.1...85 °C
95	85.1...95 °C
105	>95 °C

Além disso, precisa-se estipular o fator de correção aplicado. Por simplificação será utilizado o fator de correção 0.33066, isso se deve ao fato de que o período de monitoramento de $\Delta T_{j_{max}}$ em geral é > 60 segundos, porém pela figura 8 só temos o fator de correção para períodos até 60 segundos e este valor é uma boa aproximação para valores maiores.

4.1.1.2 Método 2: Monitoramento do *Ripple* da Temperatura de Junção

Já para o método de monitoramento do *ripple* por experimentos sabe-se que ele ocorre em baixas frequências de saída e em altas correntes, por isso ele será monitorado quando frequência de saída do inversor for < 15 Hz e a amplitude do *ripple* > 15 °C.

Aqui, como temos diferentes fatores de correção para a faixa de 0 até 15 Hz e, portanto, o fator de correção será dividido em 2 grupos. Para os casos até 5 Hz de frequência de saída usaremos o fator de correção 1.830284, que é o fator de correção para um Ton de 0.2 (frequência de 5 Hz, visto que $T = \frac{1}{f}$) e, para os casos de 5 até 15 Hz o fator de correção será de 2.544806, fator para Ton de 0.06667 (frequência de 15 Hz).

Para a amplitude do *ripple* também teremos a divisão por faixas de temperatura, de maneira análoga ao que se tem para $\Delta T_{j_{max}}$, porém com faixas menores, pois elas não atingem o mesmo patamar das temperaturas de junção máxima (Tabela 3).

Tabela 3 – Relação entre contadores e faixas de ΔT ripple

Contador	Faixa de ΔT ripple
20	15...20 °C
22.5	20.1...22.5 °C
25	22.51...25 °C
28	25.1...28 °C
32	28.1...32 °C
36	32.1...36 °C
40	36.1...40 °C
45	40.1...45 °C
50	$>45^{\circ}\text{C}$

4.1.1.3 Resumo das Informações Relevantes dos Métodos de Monitoramento

Resumindo as informações importantes, temos para o fator de correção a Tabela 4.

Tabela 4 – Resumindo o fator de correção

Método	F_o [Hz]	Ton [s]	Fator de Correção
Tj máxima	Qualquer	60	0.33066
<i>ripple</i> de Tj	0 até 5 Hz	0.2	1.830284
<i>ripple</i> de Tj	5 até 15 Hz	0.06667	2.544806

E, o total de ciclos esperado é dado pela Tabela 5.

Tabela 5 – Resumindo o total de ciclos esperado

Método	Nome do Contador	Total de Ciclos Associado
Tj máximo	tciclos25	N_of_cycles($\Delta t = 25$).0.33066
Tj máximo	tciclos30	N_of_cycles($\Delta t = 30$).0.33066
Tj máximo	tciclos35	N_of_cycles($\Delta t = 35$).0.33066
Tj máximo	tciclos40	N_of_cycles($\Delta t = 40$).0.33066
Tj máximo	tciclos45	N_of_cycles($\Delta t = 45$).0.33066
Tj máximo	tciclos55	N_of_cycles($\Delta t = 55$).0.33066
Tj máximo	tciclos65	N_of_cycles($\Delta t = 65$).0.33066
Tj máximo	tciclos75	N_of_cycles($\Delta t = 75$).0.33066
Tj máximo	tciclos85	N_of_cycles($\Delta t = 85$).0.33066
Tj máximo	tciclos95	N_of_cycles($\Delta t = 95$).0.33066
Tj máximo	tciclos105	N_of_cycles($\Delta t = 105$).0.33066
Tj Ripple (5 Hz)	rciclos20,2	N_of_cycles($\Delta t = 20$).1.830284
Tj Ripple (5 Hz)	rciclos22.5,2	N_of_cycles($\Delta t = 22.5$).1.830284
Tj Ripple (5 Hz)	rciclos25,2	N_of_cycles($\Delta t = 25$).1.830284
Tj Ripple (5 Hz)	rciclos28,2	N_of_cycles($\Delta t = 28$).1.830284
Tj Ripple (5 Hz)	rciclos32,2	N_of_cycles($\Delta t = 32$).1.830284
Tj Ripple (5 Hz)	rciclos36,2	N_of_cycles($\Delta t = 36$).1.830284
Tj Ripple (5 Hz)	rciclos40,2	N_of_cycles($\Delta t = 40$).1.830284
Tj Ripple (5 Hz)	rciclos45,2	N_of_cycles($\Delta t = 45$).1.830284
Tj Ripple (5 Hz)	rciclos50,2	N_of_cycles($\Delta t = 50$).1.830284
Tj Ripple (15 Hz)	rciclos20,7	N_of_cycles($\Delta t = 20$).2.544806
Tj Ripple (15 Hz)	rciclos22.5,7	N_of_cycles($\Delta t = 22.5$).2.544806
Tj Ripple (15 Hz)	rciclos25,7	N_of_cycles($\Delta t = 25$).2.544806
Tj Ripple (15 Hz)	rciclos28,7	N_of_cycles($\Delta t = 28$).2.544806
Tj Ripple (15 Hz)	rciclos32,7	N_of_cycles($\Delta t = 32$).2.544806
Tj Ripple (15 Hz)	rciclos36,7	N_of_cycles($\Delta t = 36$).2.544806
Tj Ripple (15 Hz)	rciclos40,7	N_of_cycles($\Delta t = 40$).2.544806
Tj Ripple (15 Hz)	rciclos45,7	N_of_cycles($\Delta t = 45$).2.544806
Tj Ripple (15 Hz)	rciclos50,7	N_of_cycles($\Delta t = 50$).2.544806

4.1.1.4 Definição dos Valores do Número de Ciclos

A figura 7 demonstrou o número de ciclos em relação a ΔT_j , conforme apresentado por 1 temos duas exponenciais que aproximam as curvas, uma para $\Delta T_j < 45^\circ\text{C}$

e outra para $\Delta T_j > 45^\circ\text{C}$. Porém é necessário calcular os coeficientes x_1 , x_2 , y_1 e y_2 para realizar os cálculos dos gastos.

Antes disso, é possível verificar que de acordo com a temperatura de junção máxima da aplicação, as curvas possuem diferentes valores, nas aplicações de drives seriados de baixa tensão ficou definida que a curva de referência utilizada será a de 125°C , pois dificilmente a temperatura de junção nessas aplicações ultrapassa este patamar de temperatura.

Para isso, utilizou-se a ferramenta “Datathief” com ela através da imagem das curvas disponibilizadas pelos fornecedores consegue-se definir alguns pontos de operação. Com os pontos de operação levantados, com a ferramenta de linha de tendência do excel, é possível levantar os coeficientes.

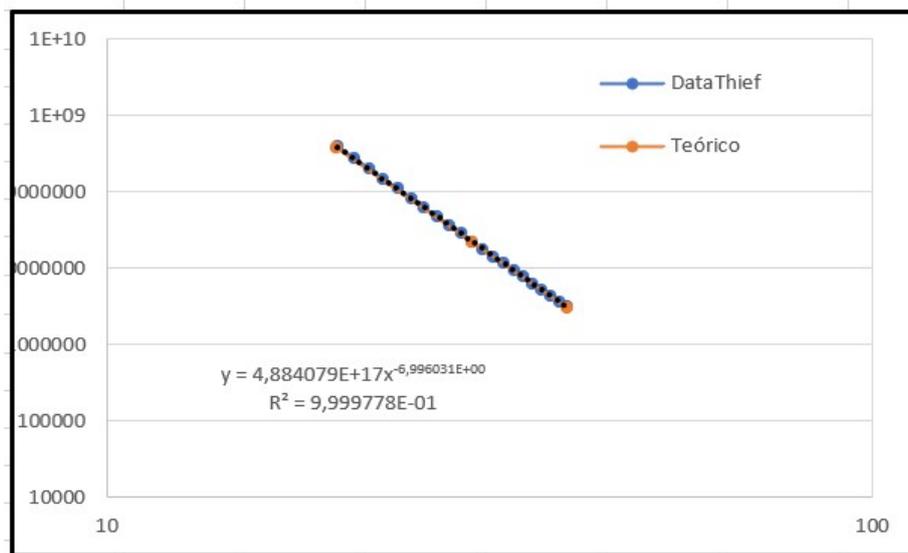
Abaixo, tem-se o ajuste realizado para uma determinada curva de um dos fornecedores do módulo IGBT utilizado pela WEG. O campo “No Ciclos - teórico” é o ponto estipulado pela ferramenta e o “No Ciclos - calculado” é dado pelos coeficientes gerados pelo excel. Para os valores de $\Delta T_j < 45^\circ\text{C}$ (figuras 23 e 24) temos:

Figura 23 – Dados do número de ciclos estipulado para $\Delta T_j < 45^\circ\text{C}$.

delta T	No Ciclos - teórico	No Ciclos - calculado	Diferença
20	380000000	386132625,89	-1,61%
30	220000000	22635838,74	-2,89%
40	3000000	3024971,71	-0,83%
	Mult factor	4,88E+17	
	Power factor	-6,996031	

Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Comparação gráfica para $\Delta T_j < 45^\circ\text{C}$.



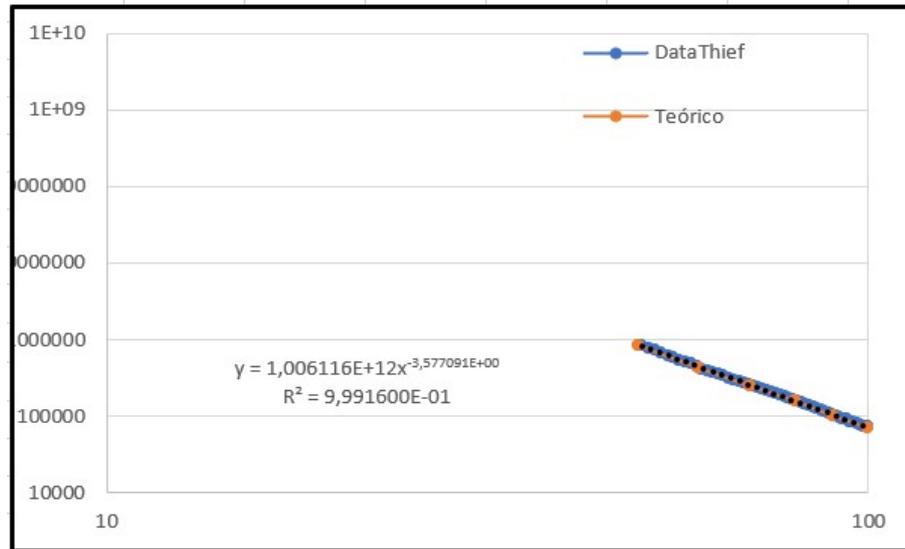
Fonte: Autoria própria.

Para os valores de $\Delta T_j > 45^\circ\text{C}$ (figuras 25 e 26) temos:

Figura 25 – Dados do número de ciclos estipulado para $\Delta T_j > 45^\circ\text{C}$.

delta T	No Ciclos - teórico	No Ciclos - calculado	Diferença
50	850000	841933,41	0,95%
60	430000	438570,30	-1,99%
70	250000	252676,27	-1,07%
80	160000	156719,12	2,05%
90	100000	102835,90	-2,84%
100	70000	70544,97	-0,78%
	Mult factor	1,01E+12	
	Power factor	-3,577091	

Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Comparação gráfica para $\Delta T_j > 45^\circ\text{C}$.

Fonte: Autoria própria.

Logo, voltando a fórmula 1, temos os coeficientes $x_1 = 4.88 \times 10^{17}$, $y_1 = -6.996$, $x_2 = 1.01 \times 10^{12}$ e $y_2 = -3.577$ para o modelo de IGBT estudado acima. Este processo foi repetido para todos os módulos IGBT's utilizados pela empresa e cadastrado no banco de dados os valores de referência de cada mecânica dos inversores para acesso via firmware.

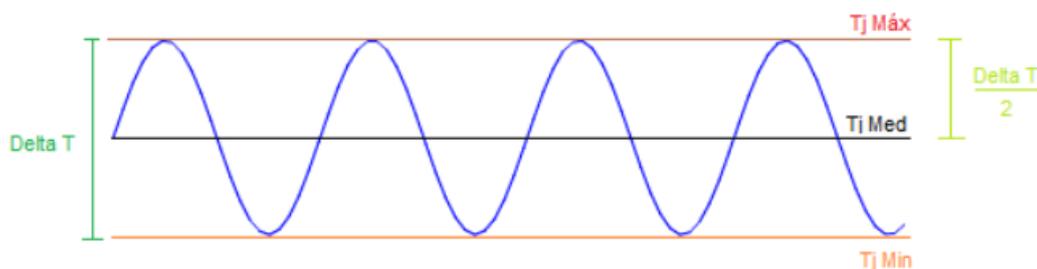
4.1.1.5 Temperatura de Junção

Uma das principais diferenças entre o estudo realizado e a implementação em firmware é que em firmware não temos a temperatura de junção instantânea tal qual a figura 7, internamente em firmware a temperatura de junção é calculada e dada por:

$$T_{jmax} = T_{jmed} + \frac{\Delta T}{2}. \quad (3)$$

Pois o perfil da temperatura de junção do IGBT tem a característica ilustrada na Figura 27.

Figura 27 – Exemplo de leitura da temperatura do IGBT



Fonte: Autoria própria.

Então, a partir da equação 3, é possível acessar diretamente a amplitude *ripple*, portanto para o método de monitoramento de *ripple* não precisamos monitorar valores máximos e mínimos, somente verificar quanto tempo ele permaneceu em determinada amplitude, pois com a frequência de saída tem-se o período de cada ciclo e com o tempo total entre as iterações de chamada da função tem-se quantos ciclos e, conseqüentemente, quantos incrementos devem ser dados nos contadores. Para o método da temperatura de junção máxima continua-se monitorando os pontos máximos e mínimos para cálculo da variação e incremento nos devidos contadores.

4.1.1.6 Definição do Cálculo do Gasto do IGBT

Para calcular o gasto da % da vida útil do IGBT, deve-se levar em conta o número de ciclos nos contadores em relação ao total esperado para aquela condição e somar os pequenos incrementos ao longo de todo o ciclo de operação do produto, logo a fórmula do cálculo é dada por:

$$Gasto(\%) = \frac{N_{ciclos}}{Total_{ciclos}} \cdot 100 \quad (4)$$

4.1.2 Criação da Função de Vida Útil do Módulo IGBT

Inicialmente foi feito o levantamento dos parâmetros básicos necessários para implementação da função no firmware do produto, os parâmetros de leitura são:

1. **Estado do inversor:** um dos requisitos para iniciar o monitoramento da vida útil do módulo IGBT é o inversor estar em modo "run", ou seja, o motor acoplado ao inversor está girando e sendo controlado pelo inversor.
2. **Estado da função:** o outro requisito para início do monitoramento da vida útil é a função estar habilitada, por padrão ela virá habilitada e somente a engenharia terá acesso ao parâmetro para desabilitá-la em caso de alguma necessidade especial.

3. **Temperatura de junção máxima** do módulo IGBT instantânea, para o método de monitoramento da temperatura de junção máxima.
4. **Amplitude da temperatura de ripple** da junção do módulo IGBT instantânea, para o método de monitoramento do *ripple* da temperatura de junção.
5. **Frequência de saída do inversor**, para verificação de possível estado do *ripple*, faixa de frequência do *ripple* (menor que 5 Hz ou entre 5 e 15 Hz) e cálculo dos incrementos nos contadores do *ripple* com o auxílio do tempo entre as iterações.

Já os parâmetros de escrita necessários são:

1. Porcentagem de utilização do módulo IGBT.
2. Tempo de monitoramento ativo da função.
3. Tempo estimado de vida útil do módulo IGBT (provisório).

Além da utilização do IGBT, deseja-se também estimar em quanto tempo o módulo chegará ao seu desgaste total. Por enquanto, este cálculo será realizado via firmware, pois através de um contador de tempo em que a função ficou habilitada e o seu gasto atual, é possível calcular em quanto tempo de **operação** o módulo chegará ao 100%. No entanto, no futuro espera-se que este cálculo seja realizado pela própria nuvem, porque a mesma possui métodos mais eficazes de realização deste cálculo, cruzando outras informações, tais como o tempo que o inversor fica em funcionamento por dia.

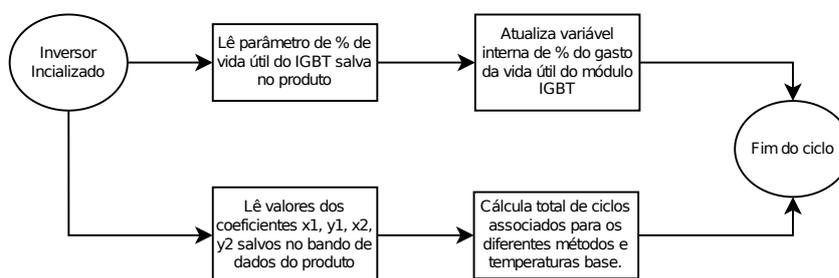
Com essas informações, foi realizado o desenvolvimento do algoritmo em firmware através da linguagem de programação C. Ao ligar o inversor, tem-se a rotina de inicialização da função, onde algumas informações necessárias são salvas em variáveis internas. É importante salvar os valores fundamentais em variáveis internas, pois evita-se a operação de leitura de parâmetro em toda iteração, melhorando o desempenho do algoritmo. Outra justificativa é que o firmware possui rotinas de otimização de escrita de parâmetros, logo como estamos trabalhando com incrementos pequenos. Algumas vezes o valor pode não ser atualizado no momento da escrita e, portanto, mantê-los em uma variável interna melhora a precisão conforme ocorre as iterações.

Após a inicialização, o algoritmo segue seu fluxo normal de operação até o momento em que o inversor é desligado ou a função é desabilitada (aqui chamaremos de fluxo interrompido), o fluxograma base de inicialização e operação do algoritmo pode ser visto nas seções a seguir.

4.1.2.1 Fluxograma de Inicialização

O fluxograma do algoritmo de inicialização da funcionalidade de vida útil do módulo IGBT é apresentado na Figura 28

Figura 28 – Fluxograma de inicialização da função de estimativa de vida útil do módulo IGBT.

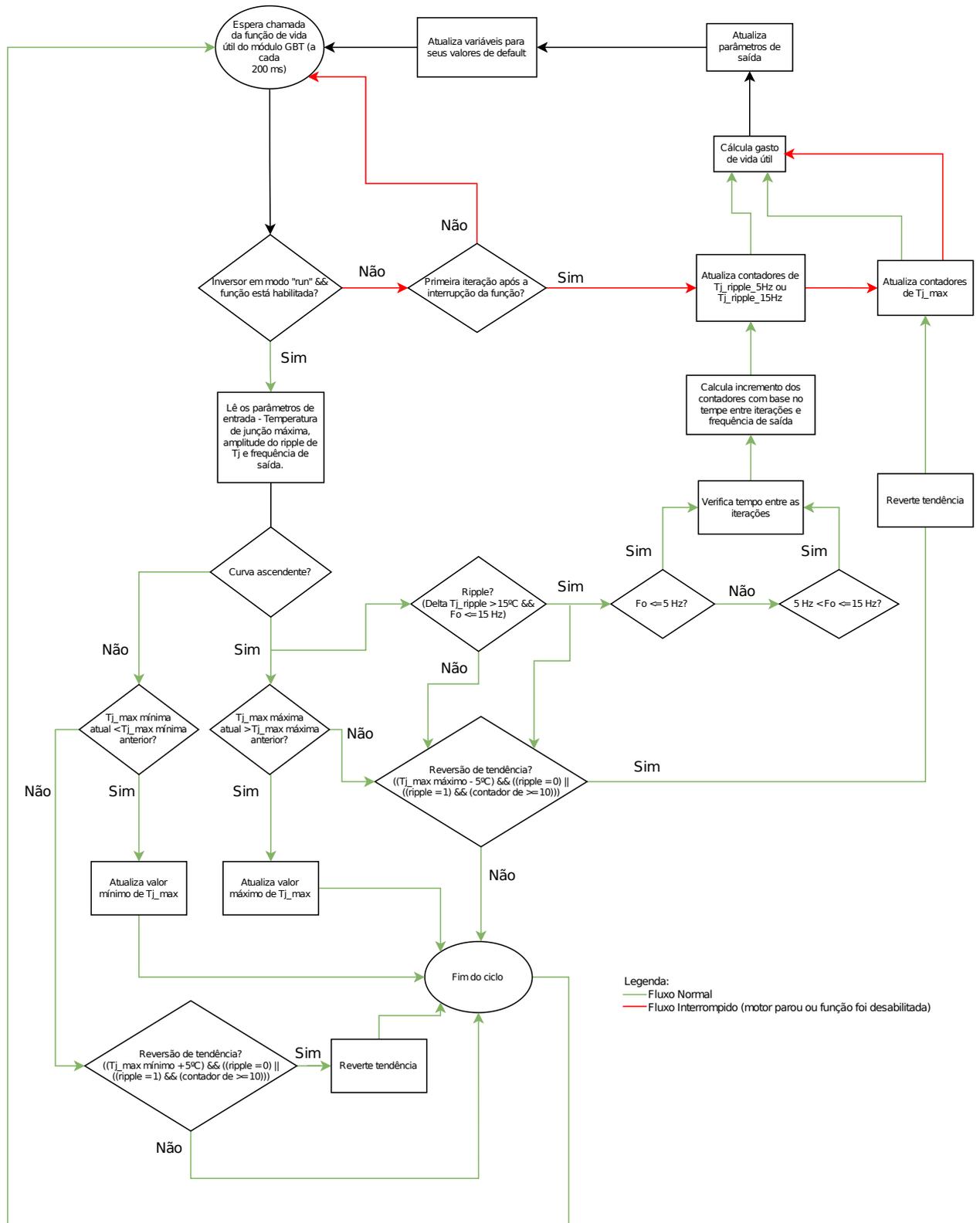


Fonte: Autoria própria.

4.1.2.2 Fluxograma de Operação

Na Figura 29 é apresentado o fluxograma de operação do algoritmo.

Figura 29 – Fluxograma de operação da função de estimativa de vida útil do módulo IGBT.



Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Resultados e Análise Exploratória

4.1.3.1 Validação do Algoritmo

Para validar os resultados do algoritmo, foram realizadas diversas simulações, com diferentes comportamentos possíveis e alguns praticamente impossíveis de acontecer em uma aplicação real, mas que são importantes para dar robustez à implementação. A fase final da validação se deu com o levantamento de curvas de uma operação real, para isso foi utilizado o *setup* de um dinamômetro para aplicação de carga (Figura 32), um motor de 100 cv (Figura 30) e um inversor de frequência WEG para controle da velocidade de rotação (Figura 31).

Figura 30 – Motor utilizado para levantamento de curvas de operação do inversor de frequência.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Inversor de frequência utilizado para levantamento de curvas de operação.



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Painel para aplicação de carga utilizado no levantamento de curvas de operação.



Fonte: Autoria própria.

Através do software proprietário da WEG, o *WEG Programming Suite* (WPS), programou-se, com a utilização da linguagem ladder (Figura 33 e Figura 34), o inversor para variar a velocidade através de diferentes *setpoints* de velocidade de rotação, possibilitando variações completas de velocidade e carga.

Figura 33 – Diagrama ladder para variação do setpoint de velocidade de rotação do motor - 1.

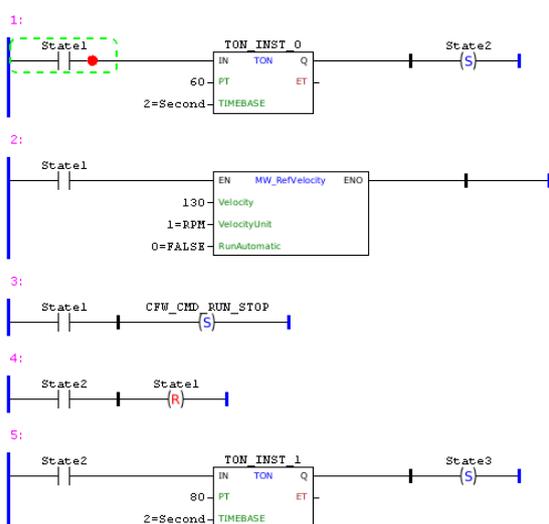
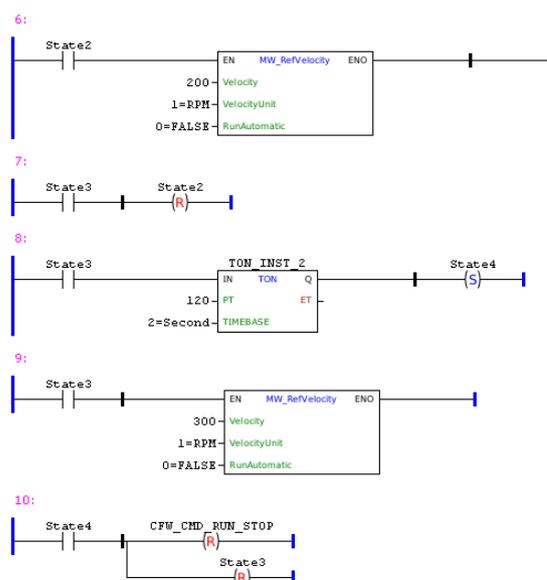


Figura 34 – Diagrama ladder para variação do setpoint de velocidade de rotação do motor - 2.



Fonte: Autoria Própria.

Ainda, através do WPS é possível monitorar as variáveis desejadas do processo e acompanhar o gráfico de tendência (Figura 35). Ao final da simulação, pode-se expor-

tar a curva de tendência para arquivos .txt com os valores das variáveis monitoradas durante o processo. Após o tratamento dos arquivos foi gerada uma tabela no formato .xml, facilitando a visualização dos dados obtidos (Figura 36).

Figura 35 – Gráfico de tendência gerado pelo WPS.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Recorte da tabela de dados exemplo em .xml.

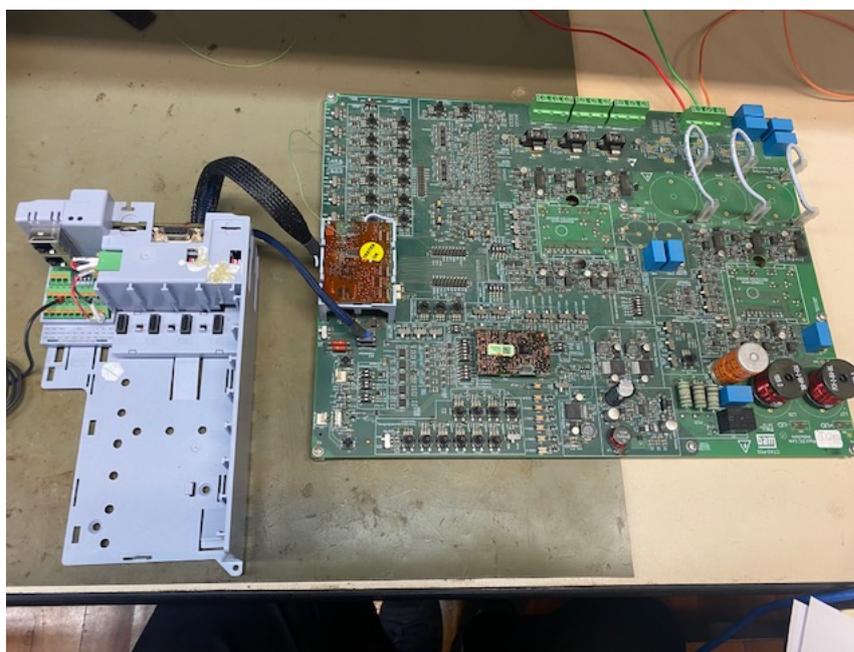
T_Máx Junc. IGBT (°C)	Ampl. Tj_ripple (°C)	Frequência (Hz)	Corrente (A)	Tempo sim. (s)
38,47	13,74	0,1	103,3	3,52
78,82	13,74	0,8	103,3	3,63
78,82	13,74	1,0	166,6	3,71
79,15	47,14	1,0	166,6	3,89
73,61	47,14	1,4	159,0	3,97
73,61	47,14	1,4	159,0	4,07
68,97	31,09	1,9	139,1	4,25
56,93	31,09	2,6	107,0	4,35
56,93	31,09	2,6	107,0	4,43
58,99	31,09	3,1	91,6	4,54
58,99	22,85	3,1	91,6	4,62
58,99	22,85	3,1	91,6	4,72
62,37	22,85	3,8	102,1	4,80
62,37	22,85	3,8	102,1	4,88
59,56	22,32	4,3	108,8	4,97
59,56	22,32	4,3	108,8	5,07
58,91	22,32	4,3	101,0	5,15
58,91	22,32	4,3	101,0	5,23
58,91	22,32	4,3	100,7	5,31
58,79	20,83	4,3	100,7	5,38
60,02	20,83	4,3	99,7	5,57
60,55	20,83	4,3	99,2	5,75
60,55	22,15	4,3	99,2	5,83
60,73	22,15	4,3	100,3	6,11
60,25	22,92	4,3	100,3	6,21

Fonte: Autoria própria.

Com as curvas obtidas, foram realizados os testes do algoritmo utilizando uma CTA. A CTA é uma placa de testes que simula o funcionamento do inversor, possibilitando ao desenvolvedor alterar parâmetros através dos seus botões, potenciômetros e chaves. Porém, a função mais interessante dela é a possibilidade de depuração do algoritmo, resultando em análises aprofundadas da solução. A placa de testes pode ser visualizada na Figura 37.

Outro fato relevante é a capacidade de forçar valores de entrada nas variáveis de interesse, ao invés da obtenção deles pelo próprio firmware do produto. Com isso, é possível simular inúmeras possibilidades para os parâmetros de entrada da função. A combinação desses fatores proporcionam robustez e confiança no algoritmo, justificando o levantamento preliminar das curvas para teste efetivo na CTA.

Figura 37 – Placa de testes utilizada para validação de algoritmos.



Fonte: Autoria própria.

A seguir são apresentadas quatro simulações interessantes realizadas na última fase de validação do algoritmo. As três primeiras simulações combinadas formarão a quarta, o objetivo é formalizar que as análises independentes de um ciclo de operação liga e desliga do inversor chegam ao mesmo resultado quando tem-se um grande ciclo de operação com vários acionamentos e desacionamentos do mesmo (aplicação real).

Conforme ressaltado, as simulações serão feitas através dos dados levantados em aplicações reais, cada iteração da função assume novos valores nas entradas, o intervalo entre as iterações (ou período de amostragem) é de aproximadamente 170 ms.

Para entendimento completo da solução, os passos apresentados ao decorrer das próximas seções serão:

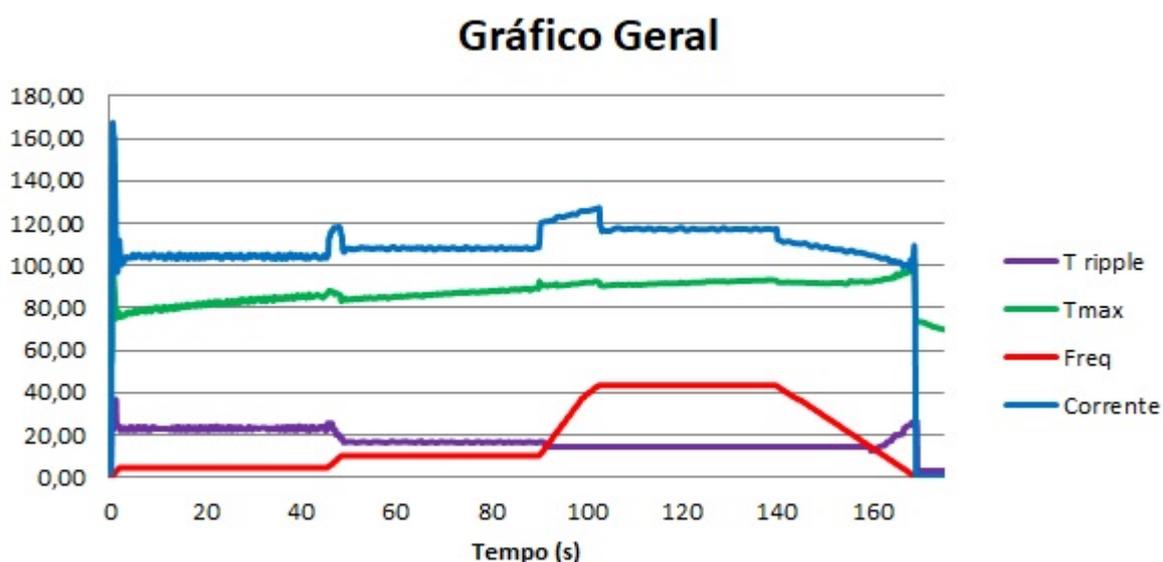
1. Gráficos dos valores de entrada da função com as respectivas análises empíricas do monitoramento de $T_{j_{max}}$ e da amplitude do *ripple*.
2. Valores dos contadores e gasto da vida útil retornado pela depuração do firmware ao final do ciclo.
3. Comparação dos resultados.

Primeiramente, serão apresentados os gráficos dos valores de entrada da função, e em seguida, os valores dos contadores e o gasto retornado pela depuração do firmware ao final do ciclo.

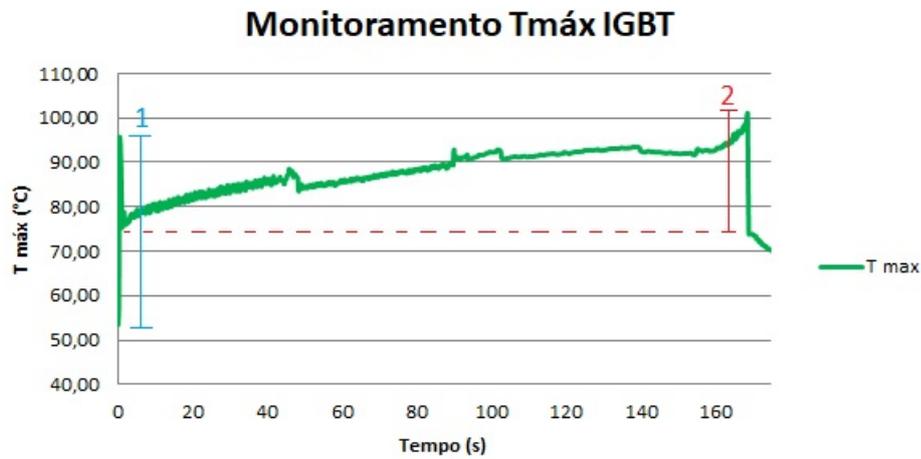
4.1.3.1.1 Simulação 1

Com a tabela de dados é possível visualizar o gráfico de evolução dos parâmetros de entrada da função. O perfil da simulação 1 já foi apresentado ao longo deste documento para a justificativa de necessidade da segunda regra de reversão, e agora ela será expandida para análise completa dos gastos da vida útil do módulo. Os gráficos de interesse para análise da simulação 1 está expostos nas figuras 38, 39, 40 e 41.

Figura 38 – Gráfico geral com os parâmetros de interesses monitorados - Simulação 1.



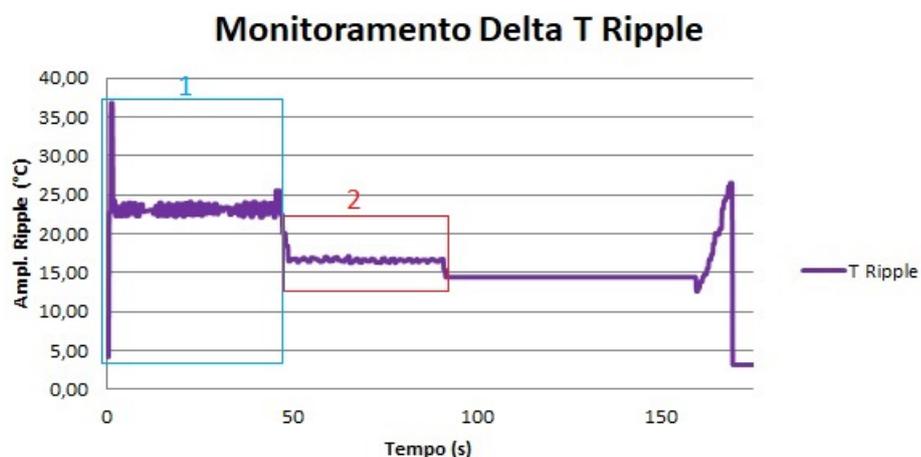
Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Gráfico de T_{jmax} ampliado - Simulação 1.

Fonte: Autoria própria.

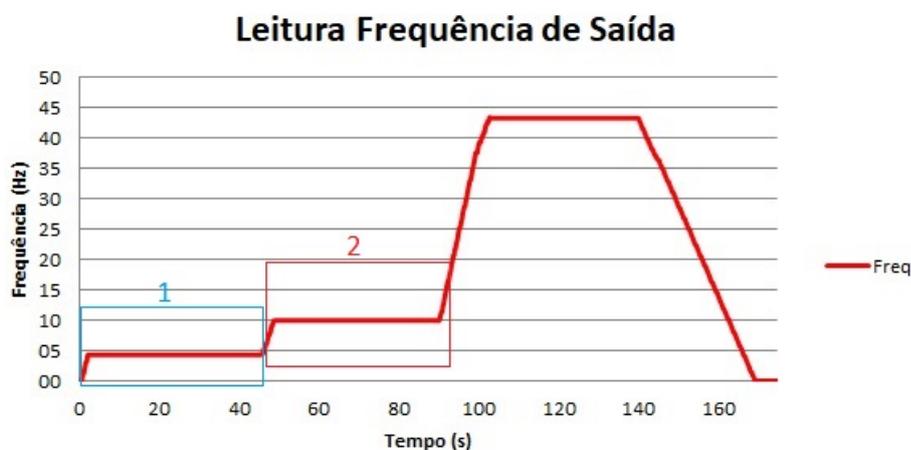
Através da análise da imagem é possível notar que, para o método de monitoramento de T_{jmax} , devem ser encontrados dois incrementos nos contadores:

1. $T_{jmax}i1 = 53.3 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_{jmax}f1 = 95.84 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T_{jmax}1 = 42.54 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow$ 1 incremento em tciclos45.
2. $T_{jmax}i2 = 76.55 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_{jmax}f2 = 101.23 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T_{jmax}2 = 24.68 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow$ 1 incremento em tciclos25.

Figura 40 – Gráfico da amplitude do *ripple* ampliado - Simulação 1.

Fonte: Autoria própria.

Figura 41 – Gráfico da frequência de saída ampliado - Simulação 1.



Fonte: Autoria própria.

Já para o método de monitoramento do *ripple*, os incrementos devem ser:

1. ≈ 45.7 segundos $\rightarrow 4.3$ Hz $\rightarrow 197$ ciclos $\rightarrow 73\%$ do tempo com $25\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{ripple}}$
 $\geq 22.5\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 144$ ciclos em rrciclos25,2 $\rightarrow 27\%$ do tempo com $22.5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{ripple}}$
 $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 53$ ciclos em rrciclos22.5,2.
2. ≈ 45.5 segundos $\rightarrow 10.0$ Hz $\rightarrow 455$ ciclos $\rightarrow 100\%$ do tempo com $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{ripple}}$
 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 455$ ciclos em rrciclos20,7.

Na análise manual, descartamos os transitórios do *ripple*, tanto de acionamento quanto da mudança do setpoint de velocidade de rotação (alteração da frequência de saída), devido a sua baixa influência por conta do tempo em que permanece nestas condições. Porém, ele não pode ser descartado e aparecerá no resultado da análise do gasto da vida útil por depuração do firmware.

Agrupando as análises empíricas para os diferentes métodos, temos o resultado esperado para o gasto da vida útil do módulo IGBT (Figura 42).

Figura 42 – Valor do gasto esperado da vida útil do módulo IGBT através da análise manual - Simulação 1.

Utilização do IGBT					
tciclos25 [0]	1	55536740,5609	0,33066	18363778,63	0,0000054%
tciclos45 [4]	1	1302232,1614	0,33066	430596,0865	0,0002322%
rciclos22_5,2 [1]	53	108827298,0178	1,830284	199184862,3	0,0000266%
rciclos25,2 [2]	144	55536740,5609	1,830284	101648007,7	0,0001417%
rciclos20,7 [0]	455	230856495,5386	2,544806	587484995	0,0000774%
% de utilização IGBT (incremento no períodos)					0,0004834%



Fonte: Autoria própria.

Os valores retornados pela depuração do algoritmo em firmware são apresentados na Figura 43.

Figura 43 – Valor dos contadores, gasto por grupo de contadores e gasto total da vida útil do módulo IGBT pela depuração do algoritmo em firmware - Simulação 1.

Expression	Type	Value
countTemp	float [11]	0x1fffe6e0 <countTemp>
countTemp[0]	float	1
countTemp[1]	float	0
countTemp[2]	float	0
countTemp[3]	float	0
countTemp[4]	float	1
countTemp[5]	float	0
countTemp[6]	float	0
countTemp[7]	float	0
countTemp[8]	float	0
countTemp[9]	float	0
countTemp[10]	float	0
total_tciclos	float	0.00023776092
countRipple5hz	float [9]	0x1fffe724 <countRipple5hz>
countRipple5hz[0]	float	0
countRipple5hz[1]	float	54.0086403
countRipple5hz[2]	float	145.516968
countRipple5hz[3]	float	2.19528103
countRipple5hz[4]	float	0
countRipple5hz[5]	float	0
countRipple5hz[6]	float	1.07111621
countRipple5hz[7]	float	0
countRipple5hz[8]	float	0
total_rciclos_5hz	float	0.00019359478
countRipple15hz	float [9]	0x1fffe748 <countRipple15hz>
countRipple15hz[0]	float	458.175842
countRipple15hz[1]	float	11.5345278
countRipple15hz[2]	float	4.75074816
countRipple15hz[3]	float	4.78640223
countRipple15hz[4]	float	0
countRipple15hz[5]	float	0
countRipple15hz[6]	float	0
countRipple15hz[7]	float	0
countRipple15hz[8]	float	0
total_rciclos_15hz	float	9.05971174e-05
total_spend	float	0.00052195281

Fonte: Autoria própria.

Utilizando a tabela auxiliar, vista na Figura 42, o resultado pode ser verificado através da Figura 44. Uma observação importante é que, apesar de nos contadores haver gastos decimais, quando é calculado o desgaste do módulo, leva-se em conta apenas a parte inteira pois um gasto decimal não representa um ciclo completo de variação na temperatura observada.

Figura 44 – Gasto da vida útil do módulo IGBT pela depuração do algoritmo em firmware - Simulação 1.

Utilização do IGBT					
tciclos25 [0]	1	55536740,5609	0,33066	18363778,63	0,0000054%
tciclos45 [4]	1	1302232,1614	0,33066	430596,0865	0,0002322%
rciclos22.5,2 [1]	54	108827298,0178	1,830284	199184862,3	0,0000271%
rciclos25,2 [2]	145	55536740,5609	1,830284	101648007,7	0,0001426%
rciclos28,2 [3]	2	26935667,5003	1,830284	49299921,26	0,0000041%
rciclos40,2 [6]	1	2762438,8239	1,830284	5056047,58	0,0000198%
rciclos20,7 [0]	458	230856495,5386	2,544806	587484995	0,0000780%
rciclos22.5,7 [1]	11	108827298,0178	2,544806	276944361	0,0000040%
rciclos25,7 [2]	4	55536740,5609	2,544806	141330230,6	0,0000028%
rciclos28,7 [3]	4	26935667,5003	2,544806	68546048,27	0,0000058%
% de utilização IGBT (incremento no períodos)					0,0005219%



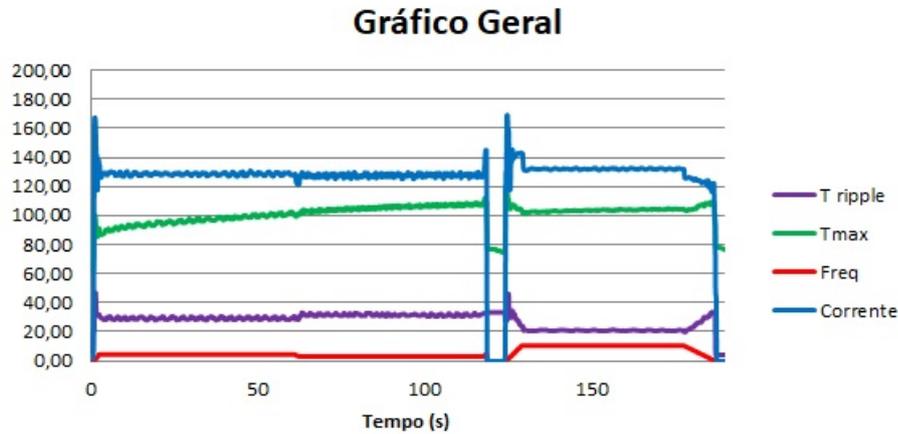
Fonte: Autoria própria.

Logo, é possível observar que os cálculos estão sendo realizados corretamente. O gasto retornado pelo firmware convergiu para o resultado da análise manual, apenas com uma pequena diferença dada pelos contadores do *ripple* nos estados transitórios e devido ao tempo entre iterações que não é fixo em 170 ms, ele sofre pequenas variações devido á rotina de tarefas executadas pelo firmware.

4.1.3.1.2 Simulação 2

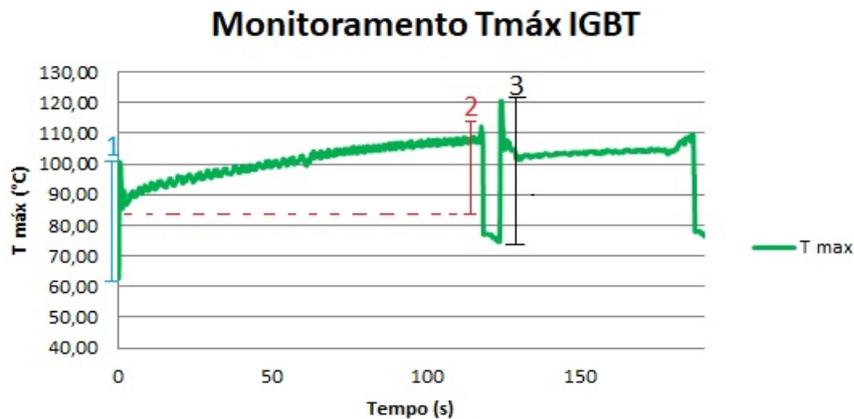
A simulação 2 é similar ao que pode ser visto durante a simulação 1, porém a frequência de saída foi mantida menor que 15 Hz e acrescentou-se um desligamento do inversor durante o ciclo de análise, o gráfico geral é apresentado na Figura 45.

Figura 45 – Gráfico geral com os parâmetros de interesses monitorados - Simulação 2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Gráfico de $T_{j_{max}}$ ampliado - Simulação 2.



Fonte: Autoria própria.

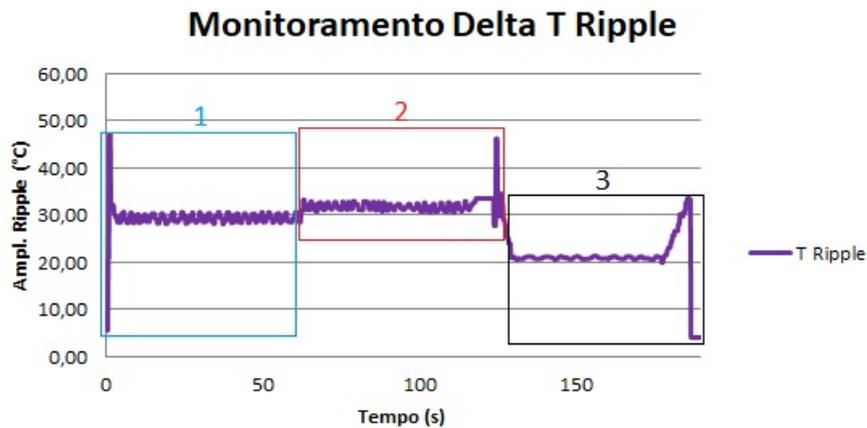
Para esta simulação os incrementos dos contadores pelo método de monitoramento de $T_{j_{max}}$ (Figura 46) devem ser:

1. $T_{j_{max}i1} = 62.98 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_{j_{max}f1} = 100.88 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T_{j_{max}1} = 37.9 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 1 \text{ incremento em tciclos40.}$
2. $T_{j_{max}i2} = 87.02 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_{j_{max}f2} = 112.49 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T_{j_{max}2} = 25.47 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 1 \text{ incremento em tciclos30.}$

3. $T_{j_{max}i3} = 85.87 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_{j_{max}f3} = 120.81 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \Delta T_{j_{max}3} = 34.94 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 1 \text{ incremento em tciclos35.}$

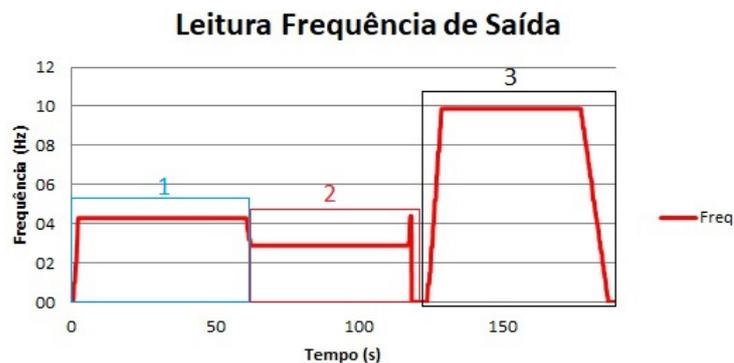
No ciclo final, após os 130 segundos, tem-se mais uma variação positiva de temperatura da temperatura de junção máxima do módulo, porém a amplitude dela foi $< 15 \text{ } ^\circ\text{C}$, portanto não é contado como um ciclo válido para a presente análise.

Figura 47 – Gráfico da amplitude do *ripple* ampliado - Simulação 2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Gráfico da frequência de saída ampliado - Simulação 2.



Fonte: Autoria própria.

Através das figuras 47 e 48, é possível verificar os incrementos simplificados esperados devido ao *ripple*:

1. $\approx 60 \text{ segundos} \rightarrow 4.3 \text{ Hz} \rightarrow 258 \text{ ciclos} \rightarrow 100\% \text{ do tempo com } 32 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \Delta T_{j_{ripple}} \geq 28 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 258 \text{ ciclos em rciclos32,2.}$

2. ≈ 60 segundos $\rightarrow 2.9$ Hz $\rightarrow 174$ ciclos $\rightarrow 60.5\%$ do tempo com $32\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{ripple}} \leq 28\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 105$ ciclos em rciclos32,2 $\rightarrow 39.5\%$ do tempo com $36\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{ripple}} \leq 32\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 69$ ciclos em rciclos36,2.
3. ≈ 50 segundos $\rightarrow 10$ Hz $\rightarrow 500$ ciclos $\rightarrow 100\%$ do tempo com $22.5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{ripple}} \leq 20\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 500$ ciclos em rciclos22,5,7.

O gasto aproximado esperado é dado pela Figura 49.

Figura 49 – Valor do gasto esperado da vida útil do módulo IGBT através da análise manual - Simulação 2.

Utilização do IGBT					
tciclos30 [1]	1	17338649,1154	0,33066	5733197,717	0,0000174%
tciclos35 [2]	1	6479866,0930	0,33066	2142632,522	0,0000467%
tciclos40 [3]	1	2762438,8239	0,33066	913428,0215	0,0001095%
rciclos32,2 [4]	363	11482973,9662	1,830284	21017103,52	0,0017272%
rciclos36,2 [5]	69	5413150,8279	1,830284	9907603,35	0,0006964%
rciclos22,5,7 [1]	500	108827298,0178	2,544806	276944361	0,0001805%
% de utilização IGBT (incremento no períodos)					0,0027777%



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 50 tem-se o resultado obtido por firmware, novamente o resultado converge para o esperado pela análise manual.

Figura 50 – Gasto da vida útil do módulo IGBT pela depuração do algoritmo em firmware - Simulação 2.

Utilização do IGBT					
tciclos30 [1]	1	17338649,1154	0,33066	5733197,717	0,0000174%
tciclos35 [2]	1	6479866,0930	0,33066	2142632,522	0,0000467%
tciclos40 [3]	1	2762438,8239	0,33066	913428,0215	0,0001095%
rciclos28,2 [3]	3	26935667,5003	1,830284	49299921,26	0,0000061%
rciclos32,2 [4]	366	11482973,9662	1,830284	21017103,52	0,0017414%
rciclos36,2 [5]	72	5413150,8279	1,830284	9907603,35	0,0007267%
rciclos50,2 [8]	1	1037259,9102	1,830284	1898480,217	0,0000527%
rciclos20,7 [0]	6	230856495,5386	2,544806	587484995	0,0000010%
rciclos22,5,7 [1]	488	108827298,0178	2,544806	276944361	0,0001762%
rciclos25,7 [2]	18	55536740,5609	2,544806	141330230,6	0,0000127%
rciclos28,7 [3]	16	26935667,5003	2,544806	68546048,27	0,0000233%
rciclos32,7 [4]	3	11482973,9662	2,544806	29221941,05	0,0000103%
rciclos36,7 [5]	2	5413150,8279	2,544806	13775418,71	0,0000145%
% de utilização IGBT (incremento no períodos)					0,0029386%



Fonte: Autoria própria.

4.1.3.1.3 Simulação 3

A simulação 3 segue praticamente os mesmos padrões das simulações 1 e 2, porém incluindo um desligamento do inversor a cada mudança no setpoint de velocidade. Prezando a objetividade esta simulação, será apresentada de maneira direta, apenas representando os ciclos com o gasto retornado pelo firmware em cada um dos ciclos e o resultado final obtido, porque os resultados serão interessantes para analisar a simulação 4 como um somatório das demais (1, 2 e 3).

Figura 51 – Gráfico de T_{jmax} ampliado - Simulação 3.

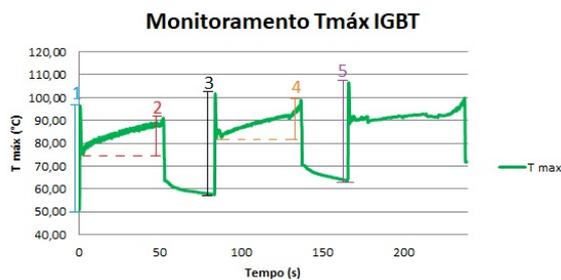


Figura 52 – Avaliação da variação da temperatura para o método de T_j máximo.

Valor Máximo	Valor Mínimo	Delta T	Curva foi Ascendente?	Qual T Indicou Reversão?
96.37000275	59.430000	36.9400024	SIM	76.48000336
91.09999847	75.559998	15.5400009	SIM	73.76999664
101.5400009	81.260002	20.2799988	SIM	85.30999756
98.98999786	82.73000336	16.2599945	SIM	87.62000275
106.6399994	64.62000275	42.0199966	SIM	91.80999756
99.91999817	89.19000244	10.7299957	SIM	72

Fonte: Autoria Própria.

Figura 53 – Gráfico da amplitude do ripple ampliado - Simulação 3.

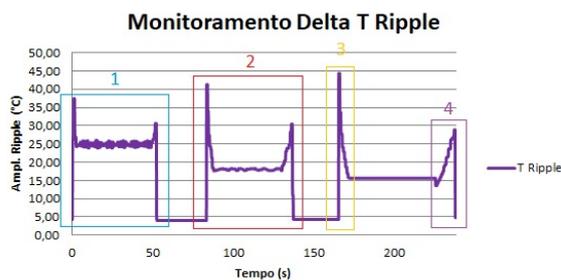
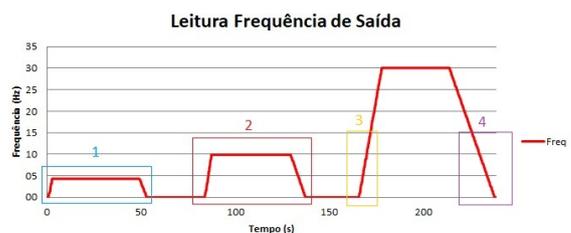


Figura 54 – Gráfico da frequência de saída ampliado - Simulação 3.



Fonte: Autoria Própria.

Através das imagens 53 e 54 é interessante observar que no último ciclo o incremento dos contadores do ripple aparece no estado transitório, pois as condições de frequência e amplitude são verdadeiras. Logo para cada etapa sinalizada nas imagens, tem-se os incrementos mostrados nas figuras 55, 56 e 57.

Figura 55 – Incrementos do *ripple* resultantes da etapa 1 - Simulação 3.

Expression	Type	Value
countRipple5hz	float [9]	0x1fffe688 <countRipple5
countRipple5hz[0]	float	0
countRipple5hz[1]	float	0
countRipple5hz[2]	float	116.222916
countRipple5hz[3]	float	95.7439728
countRipple5hz[4]	float	0.597643316
countRipple5hz[5]	float	0
countRipple5hz[6]	float	1.36118937
countRipple5hz[7]	float	0
countRipple5hz[8]	float	0

Expression	Type	Value
countRipple15hz	float [9]	0x1fffe6ac <countRipple1
countRipple15hz[0]	float	0
countRipple15hz[1]	float	0
countRipple15hz[2]	float	0
countRipple15hz[3]	float	0
countRipple15hz[4]	float	0
countRipple15hz[5]	float	0
countRipple15hz[6]	float	0
countRipple15hz[7]	float	0
countRipple15hz[8]	float	0

Figura 56 – Incrementos do *ripple* resultantes da etapa 2 - Simulação 3.

Expression	Type	Value
countRipple5hz	float [9]	0x1fffe688 <countRipple5
countRipple5hz[0]	float	0
countRipple5hz[1]	float	0
countRipple5hz[2]	float	9.34828281
countRipple5hz[3]	float	2.67680311
countRipple5hz[4]	float	1.54718506
countRipple5hz[5]	float	1.15840268
countRipple5hz[6]	float	0
countRipple5hz[7]	float	0.607720196
countRipple5hz[8]	float	0

Expression	Type	Value
countRipple15hz	float [9]	0x1fffe6ac <countRipple1
countRipple15hz[0]	float	442.635498
countRipple15hz[1]	float	9.85904789
countRipple15hz[2]	float	9.70666409
countRipple15hz[3]	float	0
countRipple15hz[4]	float	0
countRipple15hz[5]	float	0
countRipple15hz[6]	float	0
countRipple15hz[7]	float	0
countRipple15hz[8]	float	0

Fonte: Autoria Própria.

Figura 57 – Incrementos do *ripple* resultantes da etapa 3 e 4 - Simulação 3.

Expression	Type	Value
countRipple5hz	float [9]	0x1fffe688 <countRipple
countRipple5hz[0]	float	0
countRipple5hz[1]	float	0.829999983
countRipple5hz[2]	float	5.69156742
countRipple5hz[3]	float	7.18818235
countRipple5hz[4]	float	0.134203941
countRipple5hz[5]	float	1.77973306
countRipple5hz[6]	float	0
countRipple5hz[7]	float	0.51961118
countRipple5hz[8]	float	0

Expression	Type	Value
countRipple15hz	float [9]	0x1fffe6ac <countRipple
countRipple15hz[0]	float	64.32798
countRipple15hz[1]	float	13.6095142
countRipple15hz[2]	float	10.0215044
countRipple15hz[3]	float	0.858960748
countRipple15hz[4]	float	0
countRipple15hz[5]	float	0
countRipple15hz[6]	float	0
countRipple15hz[7]	float	0
countRipple15hz[8]	float	0

Fonte: Autoria própria.

Por fim, o gasto total é apresentado na Figura 58.

Figura 58 – Gasto da vida útil do módulo IGBT pela depuração do algoritmo em firmware - Simulação 3.

Utilização do IGBT					
tciclos25 [0]	3	55536740,5609	0,33066	18363778,63	0,0000163%
tciclos40 [3]	1	2762438,8239	0,33066	913428,0215	0,0001095%
tciclos45 [4]	1	1302232,1614	0,33066	430596,0865	0,0002322%
rciclos25,2 [2]	131	55536740,5609	1,830284	101648007,7	0,0001289%
rciclos28,2 [3]	105	26935667,5003	1,830284	49299921,26	0,0002130%
rciclos32,2 [4]	2	11482973,9662	1,830284	21017103,52	0,0000095%
rciclos36,2 [5]	3	5413150,8279	1,830284	9907603,35	0,0000303%
rciclos40,2 [6]	1	2762438,8239	1,830284	5056047,58	0,0000198%
rciclos45,2 [7]	1	1302232,1614	1,830284	2383454,689	0,0000420%
rciclos20,7 [0]	508	230856495,5386	2,544806	587484995	0,0000865%
rciclos22.5,7 [1]	23	108827298,0178	2,544806	276944361	0,0000083%
rciclos25,7 [2]	19	55536740,5609	2,544806	141330230,6	0,0000134%
% de utilização IGBT (incremento no períodos)					0,0009097%

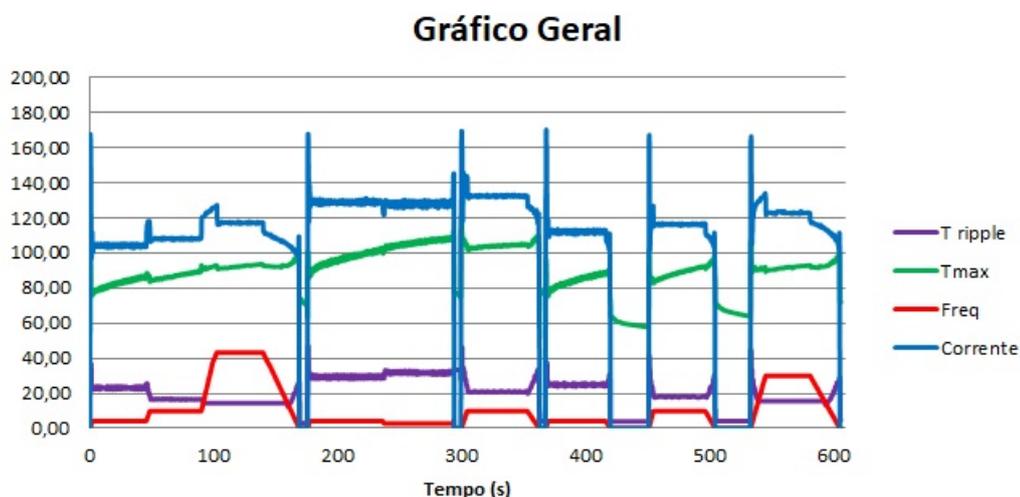


Fonte: Autoria própria.

4.1.3.1.4 Simulação 4

De acordo com o que já foi introduzido, a simulação 4 é o conjunto das três simulações anteriores, o objetivo aqui foi validar que as simulações independentes somadas apresentavam o mesmo resultado delas juntas, servindo como forma de validação e facilitando a última análise, que seria bem complexa sem a explicação das demais isoladas. O gráfico geral da simulação 4 é apresentado na Figura 59

Figura 59 – Gráfico geral com os parâmetros de interesses monitorados - Simulação 4.



Fonte: Autoria própria.

O gasto retornado ao final da simulação foi de 0.004164%, valor muito próximo do encontrado no somatório das simulações anteriores $Sim_4 \approx Sim_1 + Sim_2 + Sim_3 = 0.0005219\% + 0.0029386\% + 0.000909\% = 0.0043695\%$. O resultado apresenta um pequeno erro de 4% devido ao tempo de chamada da função em firmware ser variável em torno dos 170 ms, o que acaba afetando o resultado.

É interessante observar aqui que os IGBT's usados pela WEG apresentam excelente qualidade e projetados com sobra para as aplicações normais de drives de baixa tensão. Na simulação 4 foi criado um perfil bastante forçado e praticamente inexistente nas aplicações reais. Em 10 minutos de operação, o gasto foi somente de 0.004164%. Se o inversor repetisse este ciclo a cada 10 minutos durante toda sua vida, o módulo IGBT se desgastaria em ≈ 240153 minutos ou 166 dias de operação.

De fato, os resultados obtidos corresponderam com as expectativas, o algoritmo se mostrou robusto e implementado conforme a especificação. A única sugestão de melhoria seria não utilizar os contadores para aproximar faixas de temperatura, pois elas acabam gerando um erro acumulado significativo, visto que as temperaturas reais tendem a ser aproximadas para temperaturas maiores, o que não é recomendado quando se tem funções exponenciais, demonstrados na Figura 7.

4.1.3.2 Integração com a Plataforma WMFM

Após a validação do algoritmo com a utilização da placa de testes, foi feito o teste de integração da função com o módulo de desenvolvedor da plataforma WMFM, utilizada para verificações internas da equipe de pesquisa e desenvolvimento. Para

isso, utilizou-se o sistema real apresentado no levantamento das curvas de operação (na seção 4.1.3.1) em conjunto com um gateway para publicação em nuvem através do envio de dados .json com o protocolo de comunicação MQTT.

Inicialmente é necessário realizar o cadastro do inversor utilizado em uma planta na plataforma WMFM e configurar o gateway com a utilização da plataforma WPS, gerando o arquivo de configuração para a publicação dos dados.

O arquivo é dividido em duas partes. A primeira é o cabeçalho, onde estão as informações do inversor cadastrado na planta, do gateway configurado pelo WPS e da conexão MQTT.

A segunda, é a parte de configuração dos parâmetros enviados:

1. **sampleTime**: tempo de amostragem dos dados.
2. **publishTime**: tempo de publicação dos dados.
3. **regAddr**: número de cadastro do parâmetro no banco de dados do inversor.
4. **dataProp**: propriedade que será utilizada na publicação do dado. Conforme os itens acima, tem-se tempos diferentes de amostragem e publicação. Essa propriedade é como será tratada as amostras no momento da publicação, por exemplo, média das amostras, valor máximo das amostras, valor instantâneo, etc.
5. **dataDecimal**: número de casas decimais do dado publicado.
6. **description**: descrição do dado publicado.
7. **dataType**: tipo do dado publicado, tipicamente é o tipo do dado já cadastrado no banco de dados do produto.

A seguir, são demonstrados dois recortes do arquivo de configuração (Figura 60 e Figura 61).

Figura 60 – Recorte do arquivo de configuração para publicação dos dados em nuvem.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<service revision="1" deviceName="cfv000_mec_carga" serialNumber="423" alternateApiAddress="https://mfm-develop.wnology.io">
<optional_config plantName="PF I - METALURGICO" gatewayName="DRIVE-SCAN-2D:7E1AE" brokerSelected="" primaryDns="" secondaryDns="" connectionMode="Standalone"/>
<connection_config mqttEnableConfig="true" mqttBrokerUrl="" mqttBrokerPort="" mqttMinPubInterval="" mqttClientId="">
<recipe>
<recipe_config enableConfig="true" sampleTime="30" publishTime="300"/>
<recipe_data regAddr="" dataProp="DSCAN_DATA_AVG" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC9" description="" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_UINT16"/>
<recipe_data regAddr="" dataProp="DSCAN_DATA_AVG" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC9" description="" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_UINT16"/>
<recipe_data regAddr="" dataProp="DSCAN_DATA_MIN" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC9" description="" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_UINT16"/>
```

Fonte: Autoria própria.

Figura 61 – Recorte do arquivo de configuração para publicação dos dados do IGBT em nuvem.

```

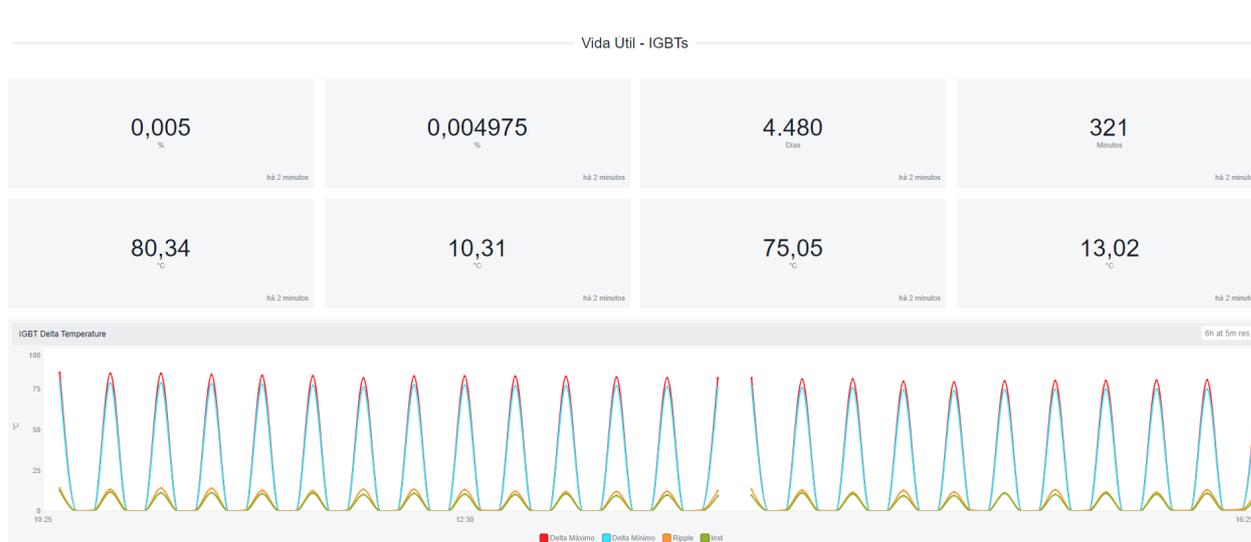
<recipe_data negAddr=" " dataProp="DSCAN_DATA_INST" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC2" description="IgbtDeltaMax" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_UINT16"/>
<recipe_data negAddr=" " dataProp="DSCAN_DATA_INST" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC2" description="IgbtDeltaMin" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_UINT16"/>
<recipe_data negAddr=" " dataProp="DSCAN_DATA_INST" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC2" description="IgbtDeltaRipple" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_UINT16"/>
<recipe_data negAddr=" " dataProp="DSCAN_DATA_INST" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC1" description="IgbtDaystoReplace" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_UINT32"/>
<recipe_data negAddr=" " dataProp="DSCAN_DATA_INST" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC2" description="IgbtDeltaInst" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_UINT16"/>
<recipe_data negAddr=" " dataProp="DSCAN_DATA_INST" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC9" description="IgbtLifeEnabled" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_INT32"/>
<recipe_data negAddr=" " dataProp="DSCAN_DATA_INST" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC9" description="IgbtLifeInternal" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_FLOAT"/>
<recipe_data negAddr=" " dataProp="DSCAN_DATA_INST" dataDecimal="DSCAN_DATA_FORMAT_DEC9" description="IgbtLifePercentage" dataType="DSCAN_DATA_FORMAT_FLOAT"/>
</recipe>
</service>

```

Fonte: Autoria própria.

Com o arquivo configurado, foi estabelecida a conexão física entre o inversor e o gateway. Após 320 minutos de operação o resultado dos dados obtidos em nuvem pode ser visualizado na Figura 62.

Figura 62 – Telas com os dados da função da estimativa de vida útil do módulo IGBT na plataforma WMFM.



Fonte: Autoria própria.

Portanto, o objetivo desta etapa, que era estabelecer a comunicação entre o inversor e a nuvem, foi um sucesso. No entanto, as telas e os dados de temperatura que estão sendo publicados ainda precisam ser refinados para facilitar a análise da funcionalidade.

4.2 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DOS CAPACITORES

4.2.1 Definições Iniciais

Com o LTspice e o software de vida útil dos capacitores da EPCOS/TKD, ambos apresentados na Seção 3.2, a primeira etapa do projeto envolveu o levantamento da

vida útil quando o inversor opera com 100% da corrente nominal de normal duty para todos os modelos estudados. Os valores foram cadastrados no banco de dados dos inversores. Um exemplo pode ser visto na Figura 63, por motivos de sigilo de projeto os demais modelos e valores não serão demonstrados neste projeto.

Figura 63 – Levantamento da vida útil dos capacitores na condição de 100% da corrente nominal ND.

Inversor	Série	Tensão	Cap	Dimensão	CSC Code	ΔT_{cap} ND	Air speed	T Sim EPCOS	Série	Branch	Vida útil
CFW*	B	400 V	470 μ F	30x45 mm		5.0 °C	0 m/s	55.0 °C	2	1	250 kh
CFW		400 V									
CFW*		400 V									
CFW		400 V									

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, foi levantada a vida útil do capacitor, estudado para diferentes condições de corrente de saída, por exemplo 110% de $I_{nom_{ND}}$, 80% de $I_{nom_{ND}}$, 60% de $I_{nom_{ND}}$, etc. O objetivo desta etapa foi encontrar algum valor médio do incremento ou decréscimo da vida útil de acordo com a diminuição ou aumento da corrente de operação em relação a corrente nominal ND.

Neste projeto, abordaremos apenas um modelo de capacitor, para os demais a análise é análoga. Para o modelo específico estudado, notou-se que a cada redução de 20% da corrente de saída em relação a nominal ND, temos um **aumento** de 60 kh na vida útil. A recíproca é verdadeira para aumentos, ocorrendo, no entanto, a **diminuição** de 60 kh, seguindo a regra de proporção.

O cálculo do incremento ou decréscimo, a partir da corrente de operação lida, é dado pela relação:

$$\text{Incremento kh} = \left(1 - \frac{I_o}{I_{nom_{ND}}}\right) \cdot 300 \quad (5)$$

Com a relação calculada, tem-se o total de kh:

$$\text{Total Horas} = \text{Incremento} + \text{Horas Cadastradas} \quad (6)$$

As horas cadastradas são o valor de vida útil na condição de operação com corrente nominal ND. Utilizando o valor exposto na Figura 63, e supondo o exemplo de $I_o = 0.8 I_{nom_{ND}}$, o Incremento é $0,2 \cdot 300 = 60$ kh (Equação 5). Por conseguinte, o total de horas é $60 + 250 = 300$ kh (Equação 6).

Realizando o ajuste proporcional entre a quantidade de horas cadastradas, as horas reais para a condição momentânea e o tempo de amostragem em horas ($t_{A_{kh}}$), tem-se o gasto real.

$$\text{Tempo Gasto (kh)} = \frac{\text{Horas Cadastradas}}{\text{Total Horas}} \cdot t_{A_{kh}} \quad (7)$$

E a porcentagem gasta da vida útil é:

$$\%Gasto = \frac{\text{Tempo Gasto (kh)}}{\text{Horas Cadastradas (kh)}} \cdot 100 \quad (8)$$

4.2.2 Criação da Função de Vida Útil dos Capacitores

Seguindo o padrão da função de vida útil do módulo IGBT, primeiramente definem-se os parâmetros de leitura:

1. **Estado do inversor:** um dos requisitos para iniciar o monitoramento da vida útil dos capacitores é o inversor estar em modo "run", ou seja, o motor acoplado ao inversor está girando e sendo controlado pelo inversor.
2. **Estado da função:** o outro requisito para início do monitoramento da vida útil é a função estar habilitada, por padrão ela virá habilitada e somente a engenharia terá acesso ao parâmetro para desabilitá-la em caso de alguma necessidade especial.
3. **Número base de horas da vida útil dos capacitores:** cadastrada no banco de dados, lembrando que esta é dada para operações em 100% da corrente nominal ND.
4. **Corrente nominal ND:** para cálculo dos ajustes do gasto da vida útil.
5. **Corrente de saída do inversor:** também para os cálculos de ajuste do gasto da vida útil.

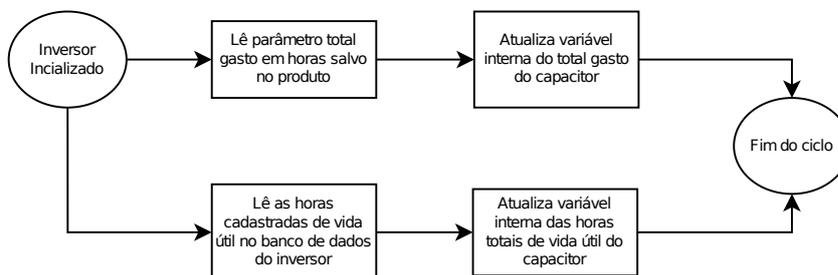
Já os parâmetros de escrita necessários são:

1. Porcentagem de utilização dos capacitores.
2. Total gasto em horas.

4.2.2.1 Fluxograma de Inicialização

O fluxograma de inicialização da função de vida útil dos capacitores é apresentado na Figura 64.

Figura 64 – Fluxograma de inicialização da função de estimativa de vida útil dos capacitores.

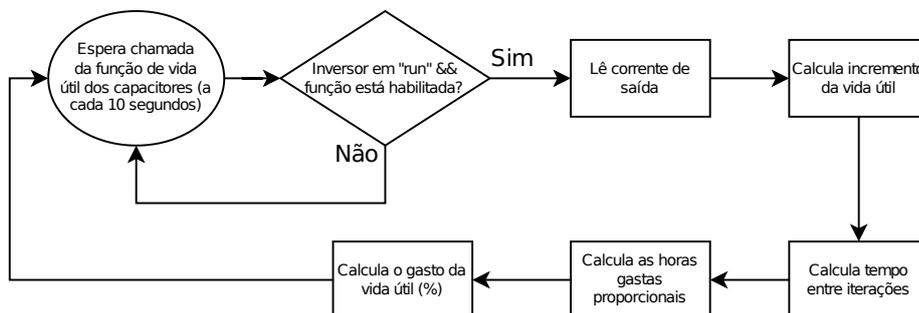


Fonte: Autoria própria.

4.2.2.2 Fluxograma de Operação

O fluxograma de operação do algoritmo é dado pela Figura 65.

Figura 65 – Fluxograma de operação da função de estimativa de vida útil dos capacitores.



Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Resultados e Análise Exploratória

Novamente, para a validação do algoritmo foi utilizada a placa de testes (CTA). Como essa função é mais simples, será demonstrada uma simulação com três iterações e comparado o valor resultante com o valor esperado. Nesta funcionalidade, foi utilizado um tempo de amostragem de 10 segundos, pois os cálculos não dependem de uma frequência de atualização rápida e aqui estamos interessados em uma corrente macro de operação. Os transitórios não são de muita relevância devido à sua curta duração de tempo.

Para o teste realizado, a corrente nominal ND de operação do inversor é de 10 A e a vida útil para esta condição de operação cadastrada no banco de dados é de 250 kh. Durante a simulação, a corrente de saída (I_o) se manteve em ≈ 8.11 A.

O tempo de amostragem da função é de ≈ 10 segundos. Logo, a cada iteração o gasto esperado é:

$$\text{Incremento kh} = \left(1 - \frac{8.11}{10.0}\right) \cdot 300 = 56.7 \quad (9)$$

$$\text{Tempo de Vida Útil do Capacitor Atual} = 250 + 56.7 = 306.7 \quad (10)$$

Antes de calcular o gasto total, é importante transformar os 10 segundos em kh. Portanto, 10 segundos ≈ 0.000002777 kh.

$$\text{Total Gasto} = \frac{250}{306.7} \times 0.000002777 = 2.2636 \times 10^{-6} \quad (11)$$

$$\% \text{Gasto} = \frac{2.2636 \times 10^{-6}}{250} \times 100 = 9.054 \times 10^{-7} \quad (12)$$

Ao final das três iterações o resultado esperado é 2.716×10^{-6} . Os valores retornados pelo firmware durante cada iteração podem ser vistos nas figuras 66, 67 e 68.

Figura 66 – Simulação do gasto da vida útil dos capacitores - Iteração 1.

Name	Type	Value
outputCurrent	volatile float	8.11119652
increase_kh	float	56.6640968
actual_cap_lifetime_kh	float	306.664093
time_between_it_ms	uint32_t	10019
time_between_it_hr	float	0.00278227613
hours_spent	float	0.00226817885

Expression	Type	Value
total_spent	float	2.26817883e-06

Expression	Type	Value
use_percent	float	9.07271499e-07

Fonte: Autoria própria.

Figura 67 – Simulação do gasto da vida útil dos capacitores - Iteração 2.

Name	Type	Value
outputCurrent	volatile float	8.11119652
increse_kh	float	56.6640968
actual_cap_lifetime_kh	float	306.664093
time_between_it_ms	uint32_t	10017
time_between_it_hr	float	0.00278172083
hours_spent	float	0.00226772623

Expression	Type	Value
total_spent	float	4.53590474e-06

Expression	Type	Value
use_percent	float	1.81436189e-06

Fonte: Autoria própria.

Figura 68 – Simulação do gasto da vida útil dos capacitores - Iteração 3.

Name	Type	Value
outputCurrent	volatile float	8.11119652
increse_kh	float	56.6640968
actual_cap_lifetime_kh	float	306.664093
time_between_it_ms	uint32_t	10016
time_between_it_hr	float	0.00278144307
hours_spent	float	0.00226749969

Expression	Type	Value
total_spent	float	6.80340418e-06

Expression	Type	Value
use_percent	float	2.72136162e-06

Fonte: Autoria própria.

O resultado final ocorreu de acordo com o esperado pela análise manual ($2.716 \times 10^{-6} \approx 2.721 \times 10^{-6}$). Houve uma insignificante diferença esperada devido ao tempo de amostragem variável em torno dos 10 segundos, conforme explicado na vida útil do módulo IGBT, e a corrente de saída um pouco maior, validando o algoritmo implementado para o modelo de inversor analisado. Por questão de tempo, a função de vida útil dos capacitores não foi integrada com a plataforma WMFM, ficando como trabalho futuro.

Durante os testes executados, o algoritmo se comportou conforme o esperado pela especificação. Como sugestão, seria melhor não achar um valor médio para os incrementos da vida útil, pois ele acaba gerando erro acumulado se o inversor operar em faixas de corrente que possuem uma diferença grande em relação ao valor médio. Portanto, o correto seria conseguir cadastrar no banco de dados os diferentes incrementos, de acordo com as correntes de saída, podendo até mesmo ser em faixas de

20% e aproximar por proporcionalidade os intervalos. Dessa forma, uma aproximação melhor poderia ser realizada. Contudo, haveria um grande custo em termos de armazenamento do banco de dados.

Outro ponto a ser relatado é que esta funcionalidade, até o presente momento, não foi integrada com a plataforma WMFM, por ela ter sido desenvolvida na parte final do projeto e do estágio do autor, não teve-se tempo hábil para realizar este passo.

4.3 INDICADORES DE DESEMPENHO

4.3.1 Passos 9, 10, 11, 12 - Prepara, implanta, libera e verifica IDs

Nesta seção serão abordados os passos 9, 10, 11 e 12 do FramePI, onde são tratados todo o processo de criação da funcionalidade e seus respectivos testes e liberação para acompanhamento online. Cada indicador tem sua particularidade e, por isso, cada seção a seguir abordará um indicador. A verificação online dos indicadores é dada pela integração com a plataforma em nuvem WMFM da WEG, que já foi apresentada durante a Seção 4.1.3.2.

Os indicadores de desempenho também possuem uma rotina de inicialização. Nela, é executado o processo de armazenamento dos valores escritos nos parâmetros de cada indicador, após a última desenergização, em variáveis internas.

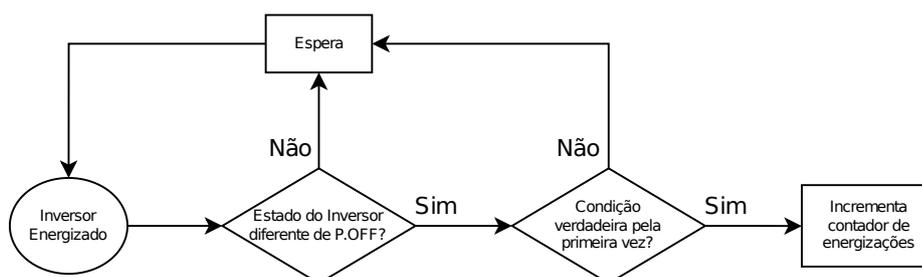
4.3.2 Número de Energizações do Inversor

Esta funcionalidade é bastante simples. O único parâmetro de leitura é o estado do inversor, quando o inversor não está energizado pelo controle e pela potência ele se mantém no estado *P.OFF*, então quando o inversor sai desse estado, é uma energização.

4.3.2.1 Fluxograma de Operação

A Figura 69 apresenta o fluxograma de operação deste indicador.

Figura 69 – Fluxograma de operação do indicador de contagem das energizações.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2.2 Resultados e Análise Exploratória

Os testes desta funcionalidade são limitados e ocorrem de forma visual. Um dos testes mais interessantes que pode ser realizado é manter o inversor alimentado pelo controle (IHM) e desligar a potência (alimentação do inversor pelos conectores R, S e T). Ao ligar novamente a potência, o contador deve ser incrementado. Este processo é demonstrado nas figuras 70, 71 e 72.

Figura 70 – Energizações pré desligar a alimentação da potência.



Figura 71 – Inversor alimentado pelo controle e potência desligada.



Fonte: Autoria Própria.

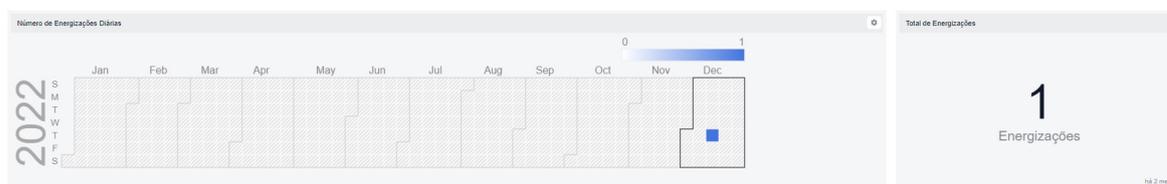
Figura 72 – Número de energizações do inversor pós realimentar a potência.



Fonte: Autoria própria.

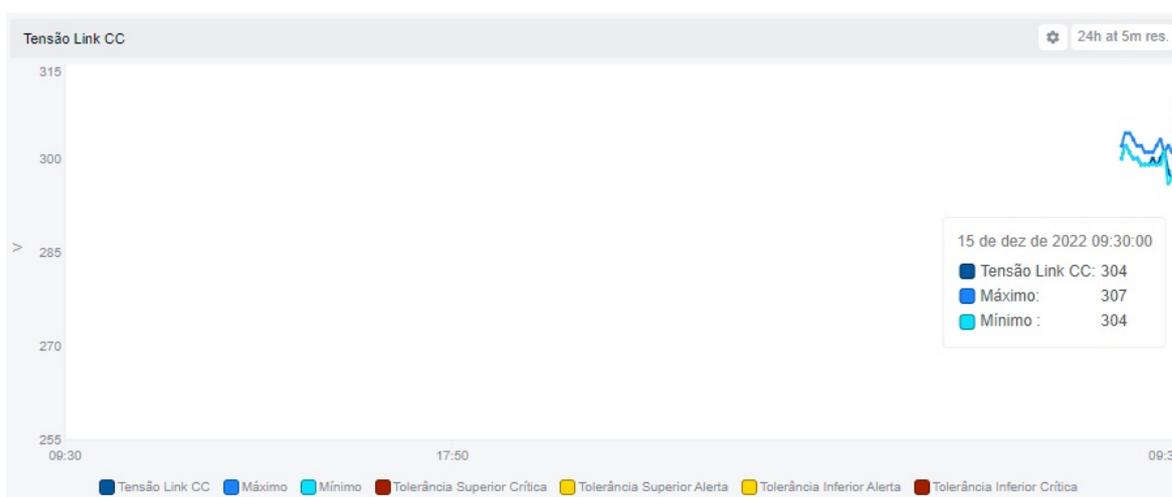
Os indicadores de desempenho foram integrados com a plataforma WMFM, de maneira análoga ao apresentado na Seção 4.1.3.2. Portanto, um teste interessante pode ser realizado analisando a tensão no link CC, disponível na plataforma também.

Figura 73 – Número de energizações do inversor pré desligar a potência - WMFM.



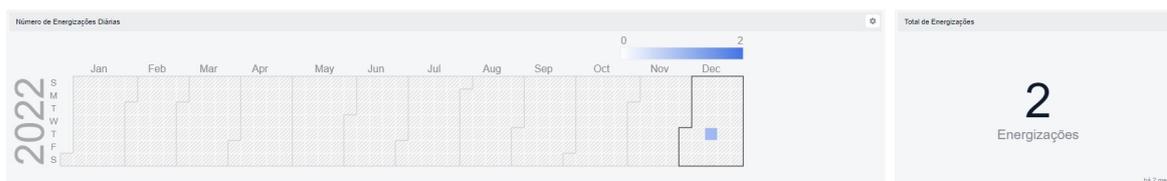
Fonte: Autoria própria.

Figura 74 – Tensão no link CC 1 - WMFM.



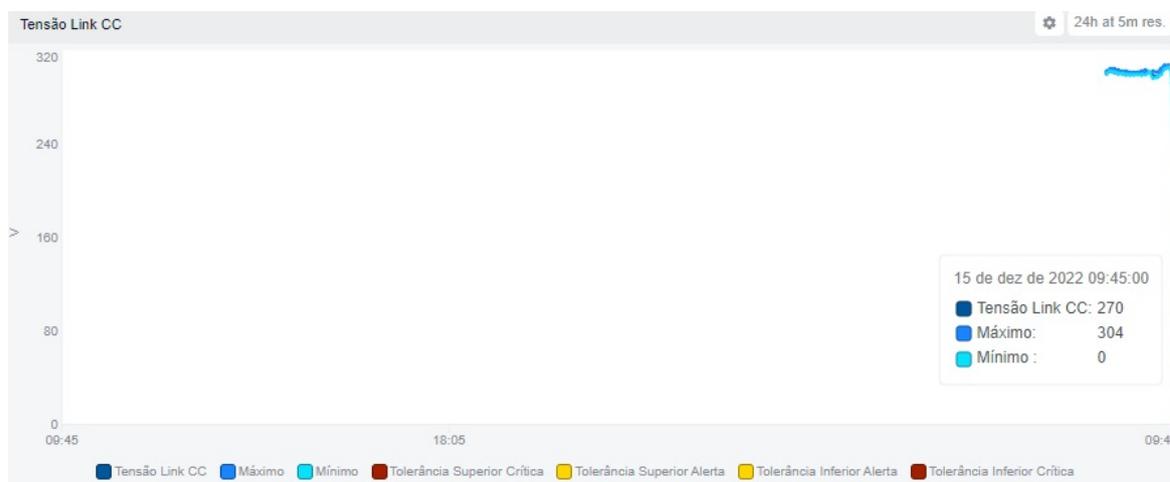
Fonte: Autoria própria.

Figura 75 – Número de energizações do inversor pós realimentar a potência - WMFM.



Fonte: Autoria própria.

Figura 76 – Tensão no link CC 2 - WMFM.



Fonte: Autoria própria.

Observando a figura 76, é possível notar que a tensão no link CC atinge o valor zero e, depois, volta para o valor normal de operação, indicando que o inversor foi desenergizado e energizado em seguida. Por isso, é identificada uma nova energização, observada na diferença entre as imagens 73 e 75. Logo, através dos testes realizados, é possível verificar que ele se comporta conforme o esperado.

4.3.3 Temperaturas Médias de Operação

Os cálculos de média a longo prazo são complexos. A equação 13 mostra a fórmula da média para uma determinada temperatura.

$$F(N) = \frac{T_{med} \cdot N + T_{atual}}{N + 1} \quad (13)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (f(N)) = T_{med} \quad (14)$$

Portanto, ao passar do tempo a T_{atual} perde influência sobre o valor médio total (Equação 14). Logo, o grande objetivo é limitar o valor de N para que a resolução não seja perdida.

Para contornar o problema, pensou-se em acompanhar o valor médio tendo em base um valor médio diário, mensal e anual. O valor médio diário é a média das temperaturas amostradas ao longo de um dia de utilização do inversor, considerando que um dia tem 86400 segundos. Trabalhando com uma amostra a cada 10 segundos, ao final de um dia de utilização do inversor, o valor médio diário seria o valor médio dado pelas 8640 amostras coletadas.

Ao final das 8640 amostras, o valor médio diário é descarregado para o valor médio mensal e a média diária é reiniciada para acompanhar um novo dia. Aqui consideraremos um mês tendo 30 dias, então ao final de 30 amostras no valor médio mensal ou 30 dias de utilização do inversor, descarrega-se a média mensal para a média anual e reinicia-se o valor médio mensal para acompanhamento de um novo mês. Dessa forma conseguimos descarregar os contadores de modo que os valores atuais não percam a influência por causa da falta de resolução.

O exemplo do cálculo da média para a temperatura do NTC pode ser visto na Figura 77.

Figura 77 – Exemplo de cálculo da temperatura média.

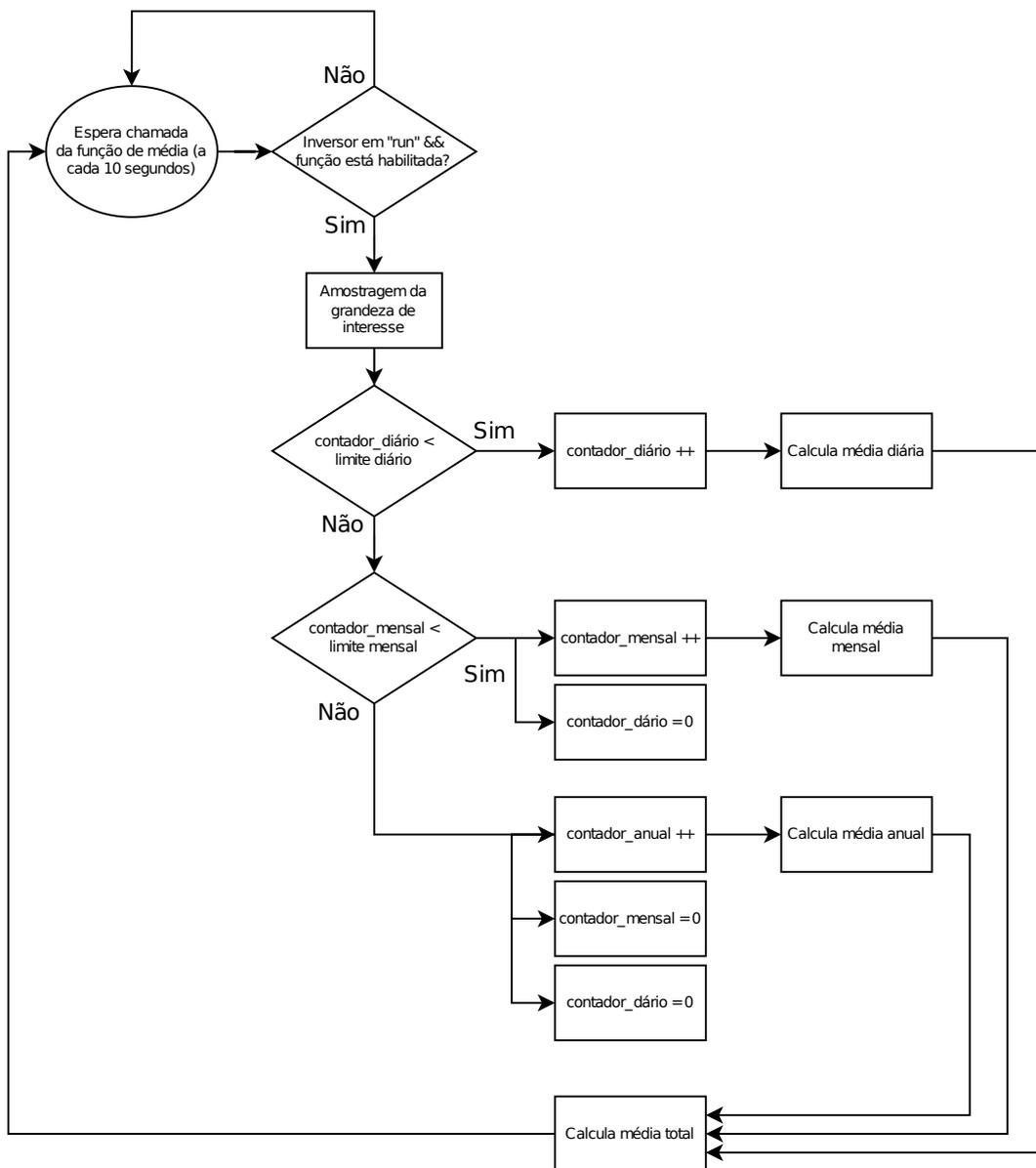
Média Diária	Contador Diário (fastcount)	Média Mensal	Contador Mensal (dischargeCount)	Média Anual	Contador Anual (slowDischargeCount)
37.56	5400 amostras (15 horas)	43.12	7 amostras (7 dias)	47.45	36 amostras (36 meses)
Tempo Total de Operação = 36 meses 7 dias e 15 horas					
Cálculo de meses amostrados = $36 + 7/30 + 15/(24*30) = 36.25417$					
Cálculo da média = $(47.45*36 + 43.12*0.23333 + 37.56*0.02083) / (36.25417) = 47.41645$					

Fonte: Autoria própria.

4.3.3.1 Fluxograma de Operação

Como os cálculos serão os mesmos para todas as temperaturas médias, alterando apenas o parâmetro lido na entrada, será apresentado apenas um fluxograma de operação (Figura 78) e os resultados para uma das grandezas de interesse.

Figura 78 – Fluxograma de operação da função das temperaturas médias de operação.



Fonte: Autoria própria.

4.3.3.2 Resultados e Análise Exploratória

O primeiro teste interessante realizado desta funcionalidade, ocorreu usando a placa de testes, forçando os valores de entrada conforme a Figura 77, para verificar se os cálculos da temperatura estavam sendo executados corretamente pelo firmware.

O resultado do teste pode ser visto na Figura 79.

Figura 79 – Teste das temperaturas médias - Simulação 1.

Expression	Type	Value
fastCount	uint32_t	5400
dischargeCount	uint32_t	7
slowDischargeCount	uint32_t	36
dailyAvgTempNTC	float	37.5600014
monthlyAvgTempNTC	float	43.1199989
annualAvgTempNTC	float	47.4500008
avgTempNTC	float	47.4164505

Fonte: Autoria própria.

Comparando o resultado obtido no teste em firmware (Figura 79) e o resultado esperado pelo exemplo de cálculo (Figura 77), pode-se concluir que os cálculos realizados em firmware estão corretos, pois o resultado obtido experimentalmente foi validado pelo cálculo matemático.

Outro teste interessante realizado, seguiu a mesma lógica dos testes realizados para temperatura de vida útil do módulo IGBT. Foi criada uma tabela de dados de temperatura em Excel, com 9874 valores, usados como entrada da função. Pelo excel o valor médio dos 9784 valores foi ≈ 50.4366 (Figura 80).

Figura 80 – Recorte da tabela de dados e valor médio gerado pelo Excel.

Valor	Média
53.30	53.30
58.27	55.785
95.84	69.13667
95.31	75.68
90.73	78.69
83.55	79.5
75.37	78.91
76.51	78.61
76.51	78.37667
78.84	78.423
76.44	78.24273
76.62	78.1075
75.94	77.94077
77.02	77.875
76.65	77.79333
Média Final	50.4366231

Fonte: Autoria própria.

O resultado retornado pelo firmware é apresentado na Figura 81.

Figura 81 – Resultado por firmware da simulação 2.

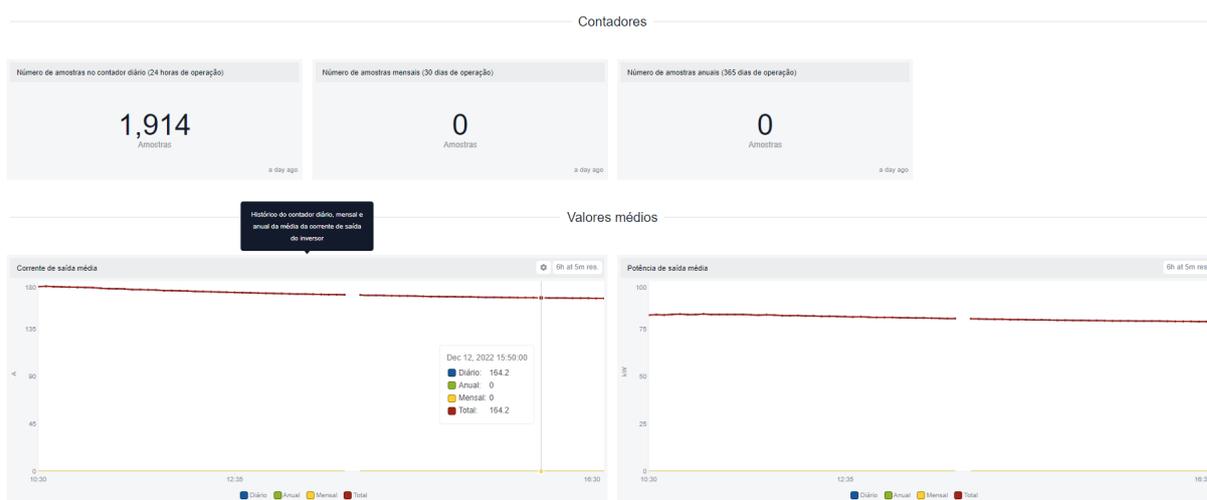
Expression	Type	Value
fastCount	uint32_t	1144
dischargeCount	uint32_t	1
slowDischargeCount	uint32_t	0
dailyAvgTempNTC	float	50.4495659
monthlyAvgTempNTC	float	50.4348259
annualAvgTempNTC	float	0
avgTempNTC	float	50.4365501

Fonte: Autoria própria.

O resultado obtido foi conforme o esperado. Como o número de valores é maior que 8640, esperava-se 1 descarregamento no contador *dischargeCount* e 1144 valores no *fastCount*. Além disso, o resultado final obtido de ≈ 50.4365 , é muito próximo do esperado. O pequeno erro ocorre por causa dos tratamentos de números *float* pelo firmware, que acaba realizando algumas aproximações durante os cálculos devido a resolução dos valores.

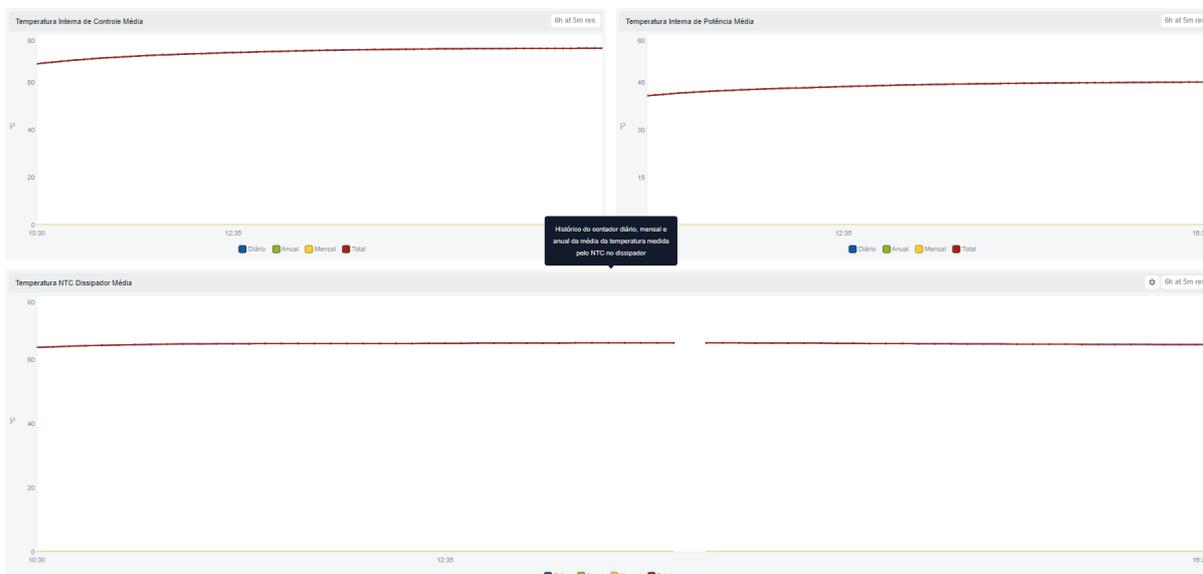
Os indicadores de temperatura média também foram integrados com a plataforma WMFM para as verificações futuras da implementação. As telas com os indicadores durante um pequeno teste podem ser observadas nas figuras 82 e 83.

Figura 82 – Indicador de temperaturas médias - integração com o módulo WMFM (1).



Fonte: Autoria própria.

Figura 83 – Indicador de temperaturas médias - integração com o módulo WMFM (2).



Fonte: Autoria própria.

4.3.4 Número de Contagem da Proteção de Sobrecarga

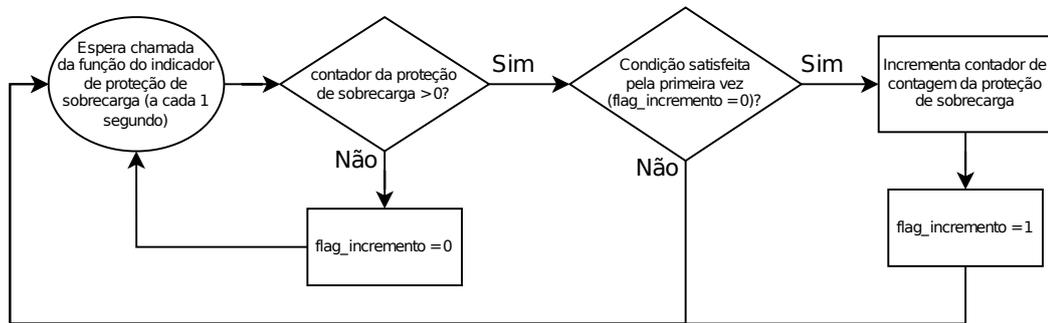
O objetivo dessa função é saber quantas vezes foi iniciada a contagem de sobrecarga dos IGBT's. A contagem inicia-se quando a corrente de saída ultrapassa em 2.5% a corrente nominal efetiva do inversor. Caso a corrente não volte a ser abaixada, após certo tempo é gerado um alarme e, mais tarde, ocorre uma falha, interrompendo o funcionamento do drive para evitar danos ao IGBT.

No firmware existe uma função que realiza esta proteção da sobrecarga, para a verificação de quantas vezes iniciou-se a contagem da proteção de sobrecarga. Basta verificar o contador da função existente e, quando este satisfizer a condição > 0 , é porque a contagem foi iniciada e o contador do indicador deve ser incrementado unitariamente, aguardando que o contador volte para 0 e satisfaça novamente a condição para realizar outro incremento. Este indicador é conferido a cada segundo.

4.3.4.1 Fluxograma de Operação

O fluxograma de operação do indicador de contagem da proteção de sobrecarga é apresentado na Figura 84.

Figura 84 – Fluxograma de operação da função do indicador de contagem da proteção de sobrecarga.



Fonte: Autoria própria.

4.3.4.2 Resultados e Análise Exploratória

Os testes desta funcionalidade também são limitados. Aqui será demonstrado um teste realizado em laboratório com dinamômetro para aplicação de carga, porém com um sistema bem menor do que o apresentado no teste da vida útil do módulo IGBT.

Conforme apresentado nesta seção, o início do contador de proteção de sobrecarga começa quando a corrente de saída ultrapassa em 2.5% a corrente nominal efetiva do inversor. O inversor utilizado no teste possui $I_{nom_{ef}} = 9.5$ A. Então, para correntes de saída > 9.74 A, a contagem de sobrecarga deve ser iniciada e o contador do indicador deve ser incrementado.

As condições pré-teste podem ser verificadas nas Figuras 85 e 86.

Figura 85 – Valor do indicador de proteção de sobrecarga pré teste.



Figura 86 – Corrente nominal efetiva do inversor utilizado para teste.



Fonte: Autoria Própria.

Ao iniciar o teste, a corrente de saída foi aumentada para 10.4 A e, após um tempo, retornada para 8.1 A (figuras 87 e 88).

Figura 87 – Corrente de saída do inversor durante o teste - 1.



Figura 88 – Corrente de saída do inversor durante o teste - 2.



Fonte: Autoria Própria.

Com isso, esperava-se que ao final do teste, o indicador de início de proteção de sobrecarga deveria ser incrementado, totalizando 2. O que de fato ocorreu, conforme demonstra a Figura 89.

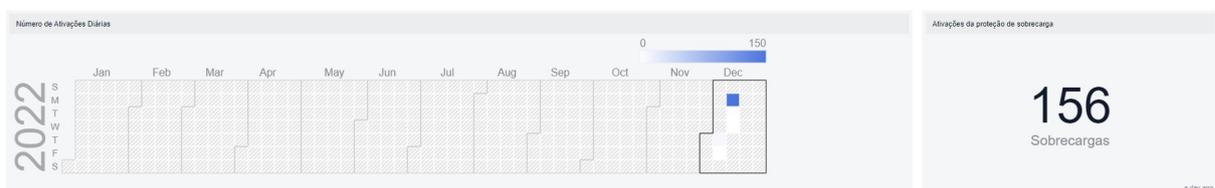
Figura 89 – Valor do indicador de proteção de sobrecarga pós teste.



Fonte: Autoria própria.

A tela do indicador na plataforma WMFM pode ser vista através da Figura 90.

Figura 90 – Indicador de início da contagem da proteção de sobrecarga - integração com o módulo WMFM.



Fonte: Autoria própria.

4.3.5 Contadores de Falhas

Na programação do firmware, existe uma funcionalidade que gera o *log* das falhas do inversor, de acordo com o número da falha gerada. Basicamente, todas as falhas são associadas a um ou mais código de falha. Portanto, quando uma falha é gerada, se ela for uma falha de interesse para os indicadores, é realizado o incremento do devido contador.

As falhas de interesse e seus respectivos códigos são:

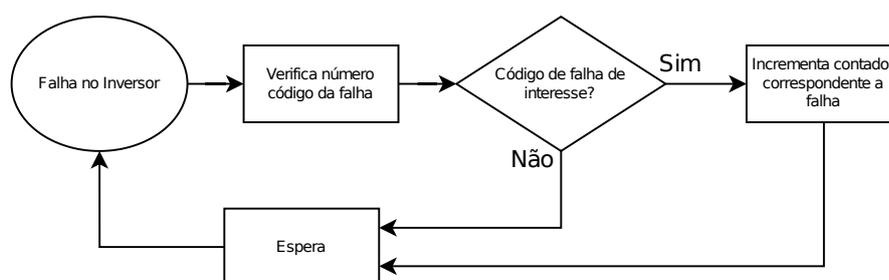
1. **Sobrecorrente na saída** - código de falha número 71;
2. **Curto-circuito barramento CC** - código de falha número 70;
3. **Sobretensão no link** - código de falha número 22;

4. **Subtensão no link CC** - código de falha número 21;
5. **Sobretensão no dissipador** - código de falha número 53 (fase U), 54 (fase V), 55 (fase W);
6. **Sobrecarga do inversor** - código de falha número 48;
7. **Sobretensão do ar interno** - códigos de falha números 153 (Potência) e 155 (Controle);
8. **Sobretensão junção IGBT** - código de falha número 61;
9. **Falha de dessaturação** - códigos de falha números 30 (fase U), 34 (fase V) e 38 (fase W);
10. **Falta à terra** - código de falha número 74;
11. **Falta de fase** - código de falha número 6.

4.3.5.1 Fluxograma de Operação

O fluxograma de operação do indicador de contagem das falhas de interesse é dado pela Figura 91.

Figura 91 – Fluxograma de operação da função do indicador de contagem das falhas de interesse.



Fonte: Autoria própria.

4.3.5.2 Resultados e Análise Exploratória

Para teste dos indicadores dos contadores de falha, foi utilizada uma função auxiliar. Através dela, é possível forçar o número da falha desejada. Com isso, pode-se gerar as falhas de interesse e verificar o devido incremento dos indicadores.

O fluxo do teste pode ser verificado nas figuras 92 a 95. Primeiro é exposto os indicadores do número de falhas antes do teste, depois é demonstrada a geração das falhas e, por fim, verifica-se o devido incremento dos contadores.

Figura 92 – Valor do indicador do número de falhas por dessaturação pré teste.



Figura 93 – Processo de forçar falha - 1.

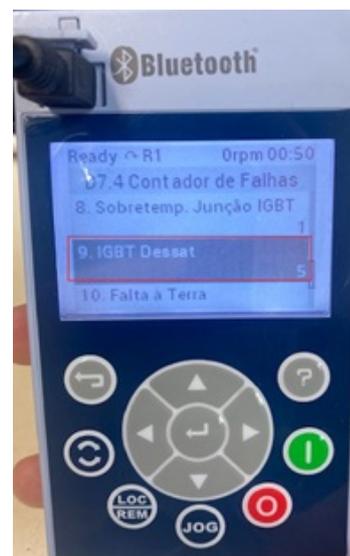


Fonte: Autoria Própria.

Figura 94 – Processo de forçar falha - 2.



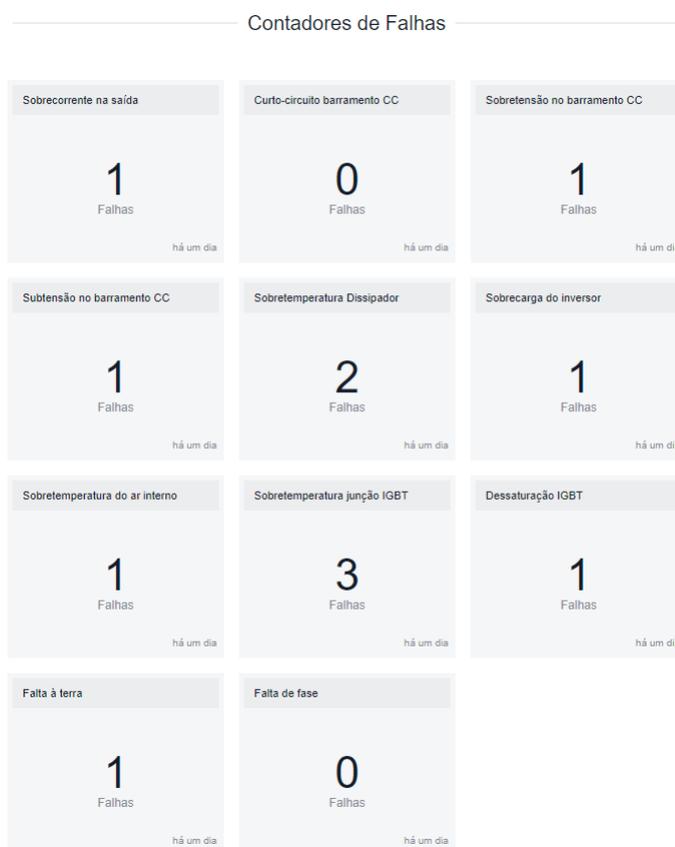
Figura 95 – Valor do indicador do número de falhas por dessaturação pós teste.



Fonte: Autoria Própria.

Este processo foi repetido várias vezes, para todos os indicadores e, o resultado para todos os testes foi alcançado satisfatoriamente. A integração com o módulo WMFM também foi realizada e a tela dos indicadores de falha pode ser visualizada na Figura 96.

Figura 96 – Indicador dos contadores de falha - integração com o módulo WMFM.



Fonte: Autoria própria.

4.3.6 Contadores de Tempo

Os últimos indicadores desenvolvidos neste projeto tratam-se do número de horas que o inversor permaneceu nas condições de operação tratadas como relevantes para indicar características de uso do inversor. Para o devido funcionamento dos indicadores, usa-se uma função de alta prioridade responsável por realizar o incremento de todos os contadores de tempo utilizados no inversor. Esta funcionalidade é chamada a cada segundo e, então, verifica-se as condições verdadeiras para realizar o incremento de tempo.

Portanto, todos os contadores de tempo de operação possuem o mesmo fluxograma, mudando apenas a verificação da condição para incremento.

4.3.6.1 Fluxograma de Operação

A Figura 97 ilustra o fluxograma usado para todos os contadores de tempo.

Figura 97 – Fluxograma geral de operação dos contadores de tempo.

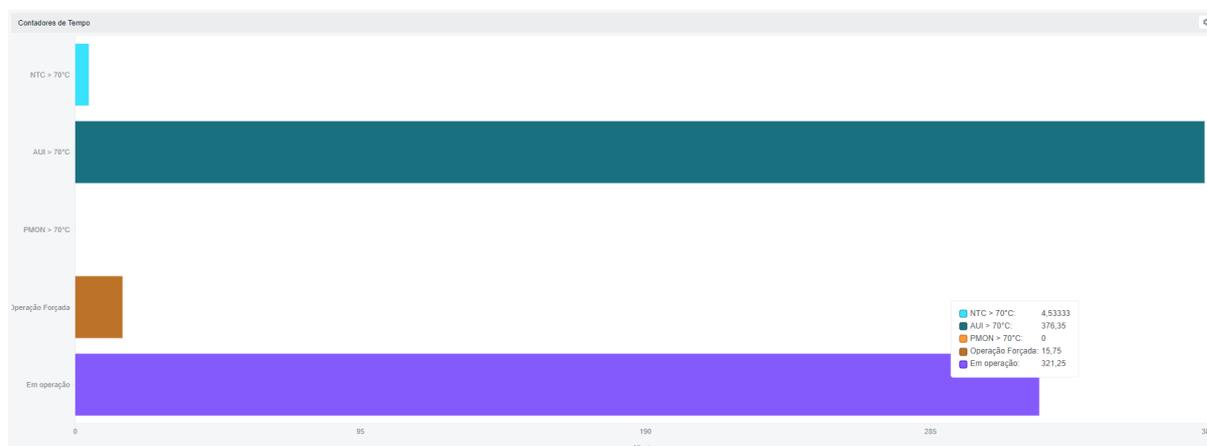


Fonte: Autoria própria.

4.3.6.2 Resultados e Análise Exploratória

Estes testes são bem triviais e basicamente só dependem da amostragem do parâmetro e um laço condicional para incremento dos contadores. Portanto, é interessante analisar um teste e seu significado diretamente com o inversor conectado na plataforma WMFM. Os valores dos indicadores de tempo obtidos durante o teste da funcionalidade são ilustrados na Figura 98.

Figura 98 – Teste dos indicadores de tempo integrados com a plataforma WMFM.



Fonte: Autoria própria.

Neste teste, o inversor foi mantido habilitado (estado de operação *run*) por 321.25 minutos, onde, deste tempo, a grande maioria foi em operação leve, com corrente de saída relativamente baixa perto do que o inversor pode operar. A operação foi forçada somente durante 15.75 minutos, apesar de o ventilador do inversor ter sido mantido desligado durante todo o teste. Para um inversor saudável, esperava-se que os contadores de temperatura não ultrapassassem por muito tempo o valor de 70 °C,

pois o local em que o inversor estava não possuía elevadas temperaturas e a operação do mesmo, conforme mencionado, foi leve.

Observando os contadores relacionados à temperatura, de fato os valores corresponderam à expectativa. A temperatura do ar interno da potência (na Figura 98 identificado por PMON) não ultrapassou nenhuma vez o valor de 70 °C. Já a temperatura do dissipador (na Figura 98 identificado por NTC) ultrapassou o valor de 70 °C por apenas 4.5 minutos. A única temperatura que manteve-se por muito tempo acima do valor esperado foi a da temperatura do ar interno do controle (376 minutos). Porém, ela foi forçada propositalmente para demonstrar que o inversor não necessita estar operando para identificar temperaturas acima do limite, até porque isto pode ser um indicativo de falha na dissipação do calor e, conseqüentemente, falha ou obstrução dos ventiladores.

5 CONCLUSÃO

Durante este projeto de fim de curso, foram apresentados diversos assuntos que envolvem muito conhecimento agregado. Inicialmente, foram apresentados alguns conceitos que servem como nivelamento conceitual para entender o presente trabalho, onde foram explicados a importância dos inversores de frequência, que possibilitou a obtenção de velocidades variáveis no eixo dos motores, garantindo ganhos importantes para a indústria através da redução dos custos e maior produtividade; os módulos IGBT's e sua fundamental participação no processo controle da velocidade dos motores; e, por fim, os capacitores, como responsável por estabilizar a tensão no link CC e compensar flutuações de potência entre a fonte de entrada e a carga de saída.

Foram discutidas várias tecnologias e aplicações da Indústria 4.0, visando aumentar a produtividade e eficiência dos processos por meio da automação e tecnologia da informação. A manutenção preditiva e indicadores de desempenho foram abordados como importantes para a economia da empresa e segurança dos funcionários, permitindo a identificação rápida de falhas e pontos fracos dos equipamentos, resultando em melhorias constantes nos produtos.

Após esta parte introdutória, o foco voltou-se para o estudo das funcionalidades. Para o módulo IGBT, verificou-se que as causas térmicas são o principal motivo de estresse em componentes eletrônicos, convergindo para a análise que, de maneira geral, as falhas no módulo se dão principalmente por estresse térmico, devido aos diferentes coeficientes de expansão dos materiais presentes no mesmo.

Em seguida, foi detalhado o estudo e a modelagem matemática que envolve o problema, sendo possível observar que a vida útil do módulo é aproximada pela amplitude, quantidade e duração dos ciclos de temperatura ao qual ele é submetido. Para abordar todas as variações de temperatura, apresentou-se a divisão do monitoramento em dois métodos de obtenção e tratamento das temperaturas. Além disso, mostrou-se as simplificações realizadas para o desenvolvimento do algoritmo, visando sempre realizar boas aproximações, mas sem causar grande prejuízo em questão de memória e processamento do inversor.

Na parte do desenvolvimento de software, foram apresentados os fluxogramas de algoritmo, o teste da funcionalidade, aplicando conceitos interessantes de validação e robustez, expandido a solução para perfis complexos de curvas de temperatura, onde foi possível observar que o algoritmo apresentou excelentes resultados, mostrando-se bem desenvolvido para a especificação proposta.

A outra funcionalidade de vida útil, a dos capacitores, foi motivada devido a este ser o componente de maior responsabilidade nas falhas de sistemas eletrônicos de potência. Diferentemente da estimativa da vida útil do módulo IGBT, este estudo foi feito através de uma ferramenta que já realiza o cálculo estimado para as condições de

operação. Apesar de o software facilitar a parte matemática do problema, a obtenção dos valores necessários para chegar a um resultado próximo do real é bastante complexa e envolveu várias etapas que foram feitas em conjunto com a equipe de hardware de pesquisa e desenvolvimento, passando pela modelagem do circuito dos inversores, transformadas de Fourier, experimento para levantamento das temperaturas próximas aos capacitores, etc.

Ao final deste complexo processo, foi possível obter regras gerais para incremento e decremento da vida útil dos capacitores, com base na relação entre a corrente de saída instantânea e a corrente nominal ND do inversor. Por fim, com as regras gerais, foi demonstrado um exemplo específico, envolvendo o seu desenvolvimento em firmware e testes feitos até o momento.

A última funcionalidade apresentada foi a de desenvolvimento de alguns indicadores de desempenho. Ao contrário das funções de estimativa de vida útil, que já possuem alguns estudos e modelos para aplicação dos conceitos de manutenção preditiva, esta funcionalidade é apresentada como uma busca por informações, antes bem restritas em inversores de frequência. Portanto, os indicadores levantados surgem, em primeiro momento, como um auxílio a equipe de assistência técnica e aos desenvolvedores. Através dos indicadores e histórico de evolução dos mesmos, espera-se descobrir indicativos de causa de falhas em campo ou de projeto.

O processo de desenvolvimento dos indicadores foi fundamentado no método FramePI e, apesar da geração dos mesmos não ser de grande complexidade, ao longo do projeto foi demonstrada a importância de cada indicador, os motivos pelos quais eles são complementares entre si e a relevância das informações obtidas através deles. Por último, foi apresentada a parte de desenvolvimento dos algoritmos com seus fluxogramas de operação e os testes realizados

Outra parte fundamental do projeto foi a integração com a plataforma em nuvem da WEG, o WEG Motion Fleet Management. Ela é extremamente relevante, primeiramente devido a sua importância futura para validação das funcionalidades de estimativa de vida útil e, principalmente, para verificação do histórico dos indicadores de desempenho, pois muitas vezes um recorte momentâneo de um indicador pode não indicar nada, mas o seu histórico pode representar algo muito relevante. Essa ferramenta também é capaz de armazenar dados históricos (*big data*) para possíveis trabalhos futuros de reconhecimento de padrões.

Para os trabalhos futuros, cada funcionalidade tem sua particularidade e algo que pode ser melhorado. A funcionalidade de vida útil do módulo IGBT pode ser mais precisa com a eliminação ou diminuição das aproximações por contadores das faixas de temperatura de variação. Além disso, é necessário um bom tempo de validação da funcionalidade. O ideal seria conseguir acompanhar o desgaste completo de um módulo e fazer a comparação entre o resultado real e a estimada pelo estudo, realizando

possíveis correções e melhorias.

Já para a funcionalidade dos capacitores, tem-se um bom trabalho pela frente. A aproximação do desgaste por apenas um valor médio não é a maneira ideal, apesar de representar uma boa aproximação. O correto seria contabilizar o desgaste estimado para cada faixa de operação, proporcionando um resultado mais próximo da realidade. Outro ponto que precisa ser realizado é a integração com o módulo WMFM, para facilitar as avaliações de desempenho da funcionalidade.

Para os indicadores de desempenho, a principal sugestão é realizar o acompanhamento dos mesmos e realizar estudos de correlação entre eles, para conseguir chegar a resultados mais concretos da real relevância de cada indicador. Através da geração de dados, utilização de inteligência artificial e métodos de predição de falhas, é possível que sejam alcançados resultados muito mais interessantes no futuro.

REFERÊNCIAS

- ALI, Zainab H; ALI, Hesham A; BADAWY, Mahmoud M. Internet of Things (IoT): definitions, challenges and recent research directions. **International Journal of Computer Applications**, Foundation of Computer Science, v. 128, n. 1, p. 37–47, 2015.
- ANDRADE, Robson Braga de. **Indústria 4.0 para melhorar a competitividade brasileira**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://exame.com/bussola/industria-4-0-para-melhorar-a-competitividade-brasileira/>. Acesso em: 25 janeiro 2023.
- BYRNE, Colman; ELEKTRONIKINDUSTRIE, Zentralverband Elektrotechnik und. Handbook for robustness validation of automotive electrical/electronic modules. **ZVEI**, 2008.
- GALÉ, Mohammed Tizzo. Aplicabilidade de análise de fluidos como manutenção preditiva em maquinário agrícola com estudo de casos visando economia em manutenção corretiva. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
- GUEDES, Josefina Aparecida Soares; CÁSSIA FONSECA, Rita de; ROCIO STRAUHS, Faimara do. Uso de indicadores e métricas para avaliação da qualidade da informação. **Brazilian Journal of Information Science: research trends**, v. 15, e02121–e02121, 2021.
- KHANNA, Vinod Kumar. **Insulated gate bipolar transistor IGBT theory and design**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- KIM, Sang-Hun; KIM, Seok-Min; PARK, Sungmin; LEE, Kyo-Beum. Switch Open-Fault Detection for a Three-Phase Hybrid Active Neutral-Point-Clamped Rectifier. **Electronics**, MDPI, v. 9, n. 9, p. 1437, 2020.
- MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8913–8923, 2019.
- MARTIN PROVENCHER. **Rumo à manutenção preditiva de ativos de mineração**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.osisoft.pt/blog/moving-toward-mining-asset-predictive-maintenance>. Acesso em: 29 de fevereiro 2022.

MASCHERONI, José M; LICHTBLAU, Marcos; GERARDI, Denise; WEG, Automação. Guia de aplicação de inversores de frequência. **Santa Catarina: WEG Automação, 238p**, 2005.

MEHL, Ewaldo LM. Capacitores Eletrolíticos de Alumínio: Alguns cuidados e considerações práticas. **Internal publication of Federal University of Paraná**, 2000.

MELL, Peter; GRANCE, Tim *et al.* The NIST definition of cloud computing. Computer Security Division, Information Technology Laboratory, National . . . , 2011.

MURDOCH, W James; SINGH, Chandan; KUMBIER, Karl; ABBASI-ASL, Reza; YU, Bin. Interpretable machine learning: definitions, methods, and applications. **arXiv preprint arXiv:1901.04592**, 2019.

PARLER, Sam G; DUBILIER, PC. Deriving life multipliers for electrolytic capacitors. **IEEE Power Electronics Society Newsletter**, v. 16, n. 1, p. 11–12, 2004.

RAINERI, Ricardo. Asset life and pricing the use of electricity transmission infrastructure in Chile. **Energy policy**, Elsevier, v. 38, n. 1, p. 30–41, 2010.

SACOMANO, José Benedito; GONÇALVES, Rodrigo Franco; BONILLA, Silvia Helena; SILVA, Márcia Terra da; SÁTYRO, Walter Cardoso. **Indústria 4.0**. [S.l.]: Editora Blucher, 2018.

SAGIROGLU, Seref; SINANC, Duygu. Big data: A review. *In*: IEEE. 2013 international conference on collaboration technologies and systems (CTS). [S.l.: s.n.], 2013. P. 42–47.

VARISCO, Martina; JOHNSON, Charlotta; MEJVIK, Jacob; SCHIRALDI, Massimiliano M; ZHU, Li. KPIs for Manufacturing Operations Management: driving the ISO22400 standard towards practical applicability. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier, v. 51, n. 11, p. 7–12, 2018.

WANG, Chenyuan; HE, Yigang; WANG, Chuankun; LI, Lie; WU, Xiaoxin. Multi-chip IGBT module failure monitoring based on module transconductance with temperature calibration. **Electronics**, MDPI, v. 9, n. 10, p. 1559, 2020.

WANG, Huai; BLAABJERG, Frede. Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters—An overview. **IEEE Transactions on industry Applications**, IEEE, v. 50, n. 5, p. 3569–3578, 2014.

WEG. **Site Institucional WEG**. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/>. Acesso em: 10 nov. 2022.