

Matheus Martins Ricardo

**ESTUDO SOBRE A AMPACIDADE DE CABOS ELÉTRICOS
UTILIZADOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica e Eletrônica da
Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica
Orientador: Prof. Erlon Cristian
Finardi, D. Eng.

Florianópolis
2018

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

Ricardo, Matheus Martins

Estudo sobre a ampacidade de cabos elétricos
utilizados em motores de indução trifásicos /
Matheus Martins Ricardo ; orientador, Erlon
Cristian Finardi, 2018.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

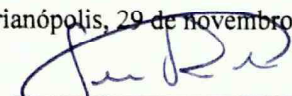
1. Engenharia Elétrica. 2. Engenharia Elétrica.
3. Ampacidade. 4. Cabos Elétricos. 5. Motor de
Indução Trifásico. I. Finardi, Erlon Cristian. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

Matheus Martins Ricardo

**ESTUDO SOBRE A AMPACIDADE DE CABOS ELÉTRICOS
UTILIZADOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

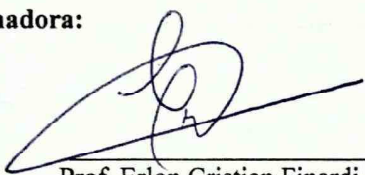
Esta Trabalho foi julgada adequada para obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pela Banca
Examinadora

Florianópolis, 29 de novembro de 2018.



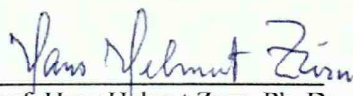
Prof. Jean Vianei Leite, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

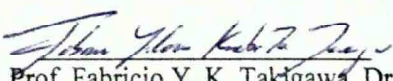


Prof. Erlon Cristian Finardi, Dr.
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Hans Helmet Zurn, Ph. D.
University of Waterloo



Prof. Fabricio Y. K. Takigawa, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a meus avós,
estrelas mais felizes do céu.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me abençoar com o dom da vida e colocar tantas pessoas especiais em meu caminho que me ajudaram nesta trajetória.

Agradeço a minha namorada Iasmin, por não me deixar desanimar mesmo diante de todas as dificuldades, por ser a melhor parceira de curso e de vida e estar sempre do meu lado. Se sobrevivemos a Engenharia Elétrica, nada nos separará!

Também agradeço a meus pais e minha irmã, que sempre me incentivaram e me motivaram a buscar uma educação de excelência, e proporcionaram todo o suporte necessário para a realização deste curso.

Aos amigos que formaram o grupo Atlético Thevenin, que fizeram com que essa caminhada fosse muito menos árdua através de todos os eventos de começo, meio e fim de semestre, além de várias noites de muitas risadas. Estarão para sempre em meu coração.

Aos moradores do “Apê”, pela amizade e parceria de todas as horas, tolerância nos fins de semestre e boas jantas para comemorar.

Ao professor Erlon, orientador deste trabalho, ao qual tive a honra de ser aluno de iniciação científica e que sempre demonstrou apoio em minhas decisões em todos os âmbitos da vida.

A WEG Equipamentos Elétricos S.A., que permitiu a realização deste trabalho, em especial ao Gustavo Kaiser, meu orientador de estágio e mentor deste trabalho, e ao Lucas, pela parceria no dia-a-dia de trabalho e diversos conselhos relacionados ao desenvolvimento da parte experimental.

“Insanidade é fazer a mesma coisa repetidamente e
esperar resultados diferentes.”
(Autor desconhecido)

RESUMO

Este trabalho descreve um estudo realizado sobre a capacidade de condução de corrente de cabos elétricos, também chamada na literatura de ampacidade, com foco na aplicação destes componentes em motores de indução trifásicos. A realização deste estudo é motivada pela necessidade do profissional de engenharia conhecer os fenômenos associados ao dimensionamento de cabos elétricos, bem como a importância destes componentes no projeto de um motor elétrico, máquina extremamente importante para a indústria. São discutidos os conceitos básicos de transferência de calor, apresentando seus modos através de revisão bibliográfica. Expõe-se diferentes características construtivas de cabos elétricos, relacionando sua influência na capacidade de condução de corrente. É mostrado e aplicado o equacionamento da NBR-11301 que define a ampacidade de cabos elétricos isolados, para métodos de instalação ao ar-livre. É descrito o experimento realizado para validar o equacionamento para um dos métodos de instalação calculado, bem como analisado seus resultados. Por fim, são elaborados experimentos em motores de indução trifásicos para verificar as temperaturas que seus cabos de ligação estão expostos, a fim de comparar com o obtido nos experimentos ao ar-livre. Também são fornecidos dados a respeito do estado atual do projeto de dimensionamento dos cabos elétricos em alguns motores indução trifásicos, onde são verificadas possibilidades de otimização.

Palavras-chave: Ampacidade. Motor de Indução Trifásico. Cabos elétricos. NBR-11301.

ABSTRACT

This work describes a study of the current conduction capacity of electric cables, also called in the literature as ampacity, focusing on the application of these components in three-phase induction motors. The realization of this study is motivated by the need of the engineering professional to know the phenomena associated with the sizing of electric cables, as well as the importance of these components in the project of an electric motor, an extremely important machine for the industry. The basic concepts of heat transfer are discussed, presenting their modes through bibliographic review. Different constructive characteristics of electric cables are presented, relating their influence on current carrying capacity. It is shown and applied the equation of NBR-11301 which defines the ampacity of insulated electric cables for outdoor installation methods. We describe the experiment performed to validate the equation for one of the calculated installation methods, as well as analyzing its results. Finally, experiments are carried out on three-phase induction motors to verify the temperatures that their connecting cables are exposed, to compare with that obtained in the open-air experiments. Data are also provided on the current design of the design of electric cables in some three-phase induction motors, where optimization possibilities are verified.

Keywords: Ampacity. Three-phase Induction Motor. Electric cables. NBR-11301.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cabo isolado com condutores de cobre.....	34
Figura 2 – Trecho de um catálogo da empresa Cofibam.....	37
Figura 3 – Motor de indução trifásico com rotor em gaiola.....	40
Figura 4 – Cabos de ligação na cabeça de bobina.....	41
Figura 5 – Elevação de temperatura no interior de um motor elétrico. .	43
Figura 6 – Trecho de um catálogo da empresa Tramar.....	49
Figura 7 – Ilustração do cabo elétrico isolado da empresa Tramar.....	50
Figura 8 – Disposição dos equipamentos no experimento realizado ao ar-livre.....	56
Figura 9 – Fixação dos sensores térmicos nos cabos elétricos.....	57
Figura 10 – Gráfico da elevação da temperatura do cabo de 20 AWG ao ar-livre.....	58
Figura 11 – Gráfico da elevação da temperatura do cabo de 14 AWG ao ar-livre.....	59
Figura 12 – Gráfico da elevação da temperatura do cabo de 2 AWG ao ar-livre.....	59
Figura 13 – Ilustração de uma ligação estrela e ligação triângulo de um MIT.....	63
Figura 14 – Localização dos sensores térmicos no motor elétrico.....	66
Figura 15 – Bancada utilizada para o procedimento experimental nos MIT.....	67
Figura 16 – Sensor do ponto Y e caixa de ligação do Motor 1.....	69
Figura 17 – Caixa de ligação com os sensores conectados do Motor 2.	71
Figura 18 – Sensores térmicos colocados no Motor 3 na cabeça de bobina.....	73
Figura 19 – Substituição dos cabos de ligação do Motor 3.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Formas de instalação e coeficientes para cálculo da resistência térmica externa segundo NBR-11301.	53
Quadro 2 – Condições do ensaio dos cabos elétricos ao ar-livre.	58
Quadro 3 – Resumo das temperaturas máximas obtidas no ensaio ao ar-livre.	60
Quadro 4 – Resultados das temperaturas obtidas no Motor 1.	69
Quadro 5 – Resultados das temperaturas obtidas no Motor 2.	71
Quadro 6 – Resultado das temperaturas obtidas no Motor 3.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de isolamento e suas temperaturas máximas associadas.....	46
Tabela 2 – Capacidade de condução de corrente dos cabos de EPR.....	54
Tabela 3 – Capacidade de condução de corrente dos cabos de Silicone.	54
Tabela 4 – Comparação entre os resultados experimentais e teóricos do ensaio ao ar-livre.....	61
Tabela 5 – Dados e características nominais dos motores ensaiados. ...	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	MOTIVAÇÃO	27
1.2	OBJETIVOS	28
1.2.1	Objetivo geral	28
1.2.2	Objetivos específicos	28
1.3	METODOLOGIA	29
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	29
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR....	31
2.1.1	Condução	31
2.1.2	Convecção	32
2.1.3	Radiação térmica.....	33
2.2	CABOS ELÉTRICOS.....	33
2.2.1	Capacidade de condução de corrente – Ampacidade.....	35
2.3	MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	39
2.3.1	Geração e dissipação das perdas do motor de indução trifásico	41
2.3.2	Sistema de isolamento de um motor elétrico de indução .	45
3	CABOS ELÉTRICOS INSTALADOS AO AR-LIVRE ..	49
3.1	EQUACIONAMENTO SEGUNDO A NBR-11301	50
3.2	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA NBR-11301	55
4	CABOS ELÉTRICOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	63
4.1	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS CABOS DE LIGAÇÃO.....	65
5	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica, sendo equipamentos de extrema importância para a economia. No Brasil, por exemplo, estima-se que cerca de trinta por cento de toda a energia gerada no país é destinada a atender essas máquinas na indústria (AGARELLI, 2015). Ao ser conectado à rede de alimentação, o motor drena uma corrente elétrica que é proporcional a potência que está consumindo, dada pela soma das perdas com a potência associada ao torque mecânico entregue no seu eixo. Essa corrente flui através dos cabos de alimentação da máquina, passando pelos terminais e pontes de ligação (quando existentes), pelos cabos de ligação, que são cabos elétricos isolados utilizados no interior da máquina, e pelos enrolamentos do motor. Cabos elétricos isolados possuem ainda muitas outras aplicações. Em geral, seu dimensionamento está associado a utilização de tabelas presentes em normas ou em catálogos de fabricantes. O presente trabalho foca em um estudo sobre a capacidade de condução de corrente, também chamada de ampacidade, de cabos elétricos isolados, com foco em sua aplicação no interior de motores de indução trifásicos, de forma a ajudar a compreender os fenômenos associados a esta aplicação.

1.1 MOTIVAÇÃO

Na vida profissional de um engenheiro eletricista, quando o mesmo precisa escolher um cabo elétrico para alguma aplicação, geralmente tem-se como posse o valor da corrente que irá percorrer o cabo. Com isso, após escolher o tipo de cabo conforme a aplicação desejada, seleciona-se a seção transversal através de uma tabela que associa a corrente que passa pelo cabo com a bitola, tabela essa presente em norma ou no catálogo do fabricante. Parte da motivação deste trabalho está em buscar entender os fenômenos associados que definem a capacidade de condução de corrente de um cabo, além de conseguir calcular o seu valor e confrontar com o que é informado em outras fontes.

Além disso, é interessante ressaltar que grande parte do custo de produção de um motor elétrico se concentra em seu estator bobinado, chegando a ser mais do que a metade do custo total do equipamento. Com isso, toda a otimização de dimensionamento relacionada a esta parte do motor torna-se bastante relevante para a indústria. Os cabos isolados utilizados para ligação do estator bobinado podem representar de 4 a 5 por cento no custo do mesmo. Visto esta importância, este estudo tem sua

justificativa assentada no interesse em obter informações relacionadas a capacidade de condução de corrente dos cabos na aplicação de motores elétricos, verificando o estado destes componentes em algumas máquinas industriais.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos a serem alcançados através do desenvolvimento deste trabalho serão apresentados na sequência.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral é estudar a capacidade de condução de corrente (ampacidade) de cabos elétricos isolados na aplicação em motores de indução trifásicos, através do desenvolvimento de experimentos e de comparação com a aplicação dos cabos ao ar-livre.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar as características construtivas, bem como sua influência na capacidade de condução de corrente, de diferentes tipos de cabos elétricos;
- Aplicar o equacionamento apresentado pela NBR 11301 (ABNT, 1990) para definição da capacidade de condução de corrente de cabos isolados, com foco nos cabos utilizados em motores elétricos, a fim de comparar com os valores fornecidos em catálogos dos fabricantes;
- Realizar testes com os valores calculados através da NBR 11301 e com os valores indicados por fornecedores de cabos buscando validar o método de cálculo;
- Desenvolver um experimento capaz de avaliar o comportamento térmico dos cabos elétricos isolados utilizados em motores de indução trifásicos;
- Comparar os resultados experimentais obtidos com cabos elétricos ao ar-livre e no interior de motores elétricos;
- Avaliar o estado do projeto atual do dimensionamento de cabos de ligação de três motores industriais.

1.3 METODOLOGIA

Levando em consideração os objetivos propostos anteriormente e almejando resultados satisfatórios, optou-se por buscar atingi-los da seguinte forma:

- Revisão bibliográfica para a realização de estudos na área de transferência de calor, motores elétricos, cabos e sua capacidade de condução de corrente, através da leitura de normas, livros e artigos científicos sobre os assuntos em questão;
- Consultar catálogos de fabricantes a fim de realizar cálculos de capacidade de condução de corrente utilizando a formulação proposta na NBR 11301;
- Realizar a validação experimental dos cálculos e dos valores de catálogo de capacidade de condução de corrente de cabos elétricos;
- Realizar testes para verificar o comportamento térmico dos cabos elétricos na aplicação em motores de indução trifásicos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto de cinco capítulos, os quais serão descritos a seguir. O primeiro capítulo traz uma breve introdução ao tema do trabalho, bem como apresenta a motivação para o seu desenvolvimento, os objetivos que se deseja alcançar e a metodologia utilizada. Em seguida, no segundo capítulo, é apresentada a fundamentação teórica do trabalho, onde expõe-se os fundamentos de transferência de calor e seus modos, define-se e caracteriza-se cabos elétricos e apresenta-se o motor de indução trifásico e suas características que influenciam no dimensionamento de seus cabos de ligação. Por sua vez, o terceiro capítulo trata do equacionamento proposto pela NBR-11301 para a definição da capacidade de condução de corrente de cabos elétricos instalados ao ar-livre, bem como do desenvolvimento de um experimento para validar os cálculos realizados. No quarto capítulo é discutida a aplicação de cabos elétricos isolados em motores de indução trifásicos, descrevendo os experimentos realizados a fim de observar o comportamento térmico destes componentes da máquina e de verificar possibilidades de otimização no projeto de seu dimensionamento. Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros na área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Conforme define Incropera (2008), transferência de calor (ou calor) é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios, haverá transferência de calor. Na engenharia, este assunto é de extrema importância. Identificar a presença e avaliar a intensidade dos efeitos da transferência de calor em qualquer equipamento pode ser essencial para garantir a vida útil e a segurança de usuários. Nos motores elétricos, os esforços voltados para a otimização da transferência de calor permitiram uma diminuição considerável no volume deste equipamento, consequentemente reduzindo o custo de fabricação da máquina. Nos cabos elétricos, ter controle sobre a temperatura de operação do condutor é essencial, visto que uma temperatura elevada degrada de forma intensa sua isolamento. Os processos de transferência de calor são chamados de *modos*, a saber: (i) condução; (ii) convecção; e (iii) radiação térmica. Os conceitos básicos de cada modo são aqui apresentados, para que se possa ter um melhor entendimento sobre os fenômenos presentes nos cabos elétricos e nos motores de indução trifásicos.

2.1.1 Condução

A condução ocorre quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, podendo este ser um sólido ou um fluido. Este modo pode ser visto como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre as partículas. Matematicamente, a condução é descrita pela lei de Fourier, cuja equação é fenomenológica, ou seja, foi desenvolvida a partir da observação de fenômenos ao invés de ter sido derivada a partir de princípios fundamentais. De forma genérica, a lei de Fourier pode ser descrita como (Incropera, 2008):

$$q_{cond}_n = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

Na Equação (1), q_{cond}_n é o fluxo térmico em uma direção n , T é a temperatura e k é uma constante ligada a condutividade térmica do material. A resolução desta equação diferencial pode depender de diversas condições de contorno, como temperatura nas extremidades,

além de variar com a forma geométrica do material, por exemplo. Como definido, para usar a lei de Fourier, a condutividade térmica do material em que a condução está em análise deve ser conhecida. Essa propriedade é classificada como uma propriedade de transporte, e fornece uma indicação da taxa na qual a energia é transferida pelo processo de condução. Em geral, os materiais bons condutores de eletricidade possuem uma elevada condutividade térmica, devido ao fato de que a transferência de calor é dada tanto pela vibração das moléculas quanto pelo movimento dos elétrons livres. Em isolantes, a condutividade térmica tende a ser menor, e pode ter um efeito sensível ao funcionamento de cabos elétricos, por exemplo.

2.1.2 Convecção

O termo convecção se refere à transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem a diferentes temperaturas. Este modo de transferência de calor abrange dois mecanismos: (i) devido ao movimento molecular aleatório (difusão); (ii) movimento global, ou macroscópico, do fluido. É comum usar o termo convecção para fazer referência ao transporte cumulativo de calor e o termo advecção para fazer referência ao transporte devido ao movimento global do fluido.

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. No caso da convecção natural, o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, que são originadas a partir de diferenças de densidades causadas por variações de temperatura no fluido. Um exemplo seria a transferência de calor que ocorre em um cabo elétrico instalado ao ar-livre, onde o aquecimento do cabo faz com que o ar que entra em contato direto com ele sofra um aumento de temperatura e, portanto, uma redução da densidade. Como ele fica mais leve do que o ar adjacente, as forças de empuxo induzem um movimento vertical no qual o ar quente perto do cabo ascende e é substituído pelo influxo do ar ambiente, mais frio. Este exemplo seria o oposto da convecção forçada, onde o escoamento é causado por meios externos, como um ventilador que poderia ser utilizado para provocar o resfriamento em um cabo elétrico.

Independentemente da natureza específica do processo de transferência de calor por convecção, a equação apropriada para a taxa de transferência de calor possui a forma:

$$q_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

onde q_{conv} , o fluxo de calor por convecção, é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície (T_s) e do fluido (T_∞). Essa expressão é conhecida como a lei do resfriamento de Newton, e o parâmetro h é chamado de coeficiente de transferência de calor por convecção. O valor de h é influenciado pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. Qualquer estudo da convecção no fundo se reduz a um estudo de procedimentos pelos quais o h pode ser determinado. Em geral, a determinação do coeficiente de convecção envolve números adimensionais e equações empíricas obtidas experimentalmente. Encontrar um valor para h é chamado de problema da convecção.

2.1.3 Radiação térmica

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não-nula. Ou seja, todo corpo emite radiação térmica. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção necessita da presença de um meio material, a radiação não o requer. Na verdade, a eficiência da transferência por radiação é maior no vácuo. Nas temperaturas e materiais em que será desenvolvido o trabalho apresentado, a radiação térmica possui uma parcela descartável de influência. Por isso, as teorias mais complexas e os equacionamentos associados não serão aqui apresentados.

2.2 CABOS ELÉTRICOS

Pode-se conceituar cabos elétricos através das definições apresentadas na norma NBR 5471 – Condutores elétricos. Este documento define fio como um produto metálico de seção transversal invariável e de comprimento muito maior do que a maior dimensão transversal, utilizado para transportar energia elétrica ou transmitir sinais elétricos. Por sua vez, cabo é definido como um conjunto de fios encordoados, isolados ou não entre si, podendo o conjunto ser isolado ou não.

Existem diversos tipos de cabos elétricos para atender diferentes aplicações, onde destacam-se duas formas de construção:

- **Cabos nus:** não possuem isolação ou cobertura e são constituídos de fios nus. São utilizados em larga escala nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica;
- **Cabos isolados:** constituídos de uma ou mais veias e, se existentes, do envoltório individual de cada veia, do envoltório do conjunto das veias e dos envoltórios de proteção do cabo, podendo ter também um ou mais condutores não isolados. As aplicações deste tipo de cabo são diversas, dentre as quais destacam-se as instalações elétricas residenciais e a utilização na ligação interna de motores elétricos. Pode-se ver um exemplo de cabo isolado na Figura 1.

Figura 1 – Cabo isolado com condutores de cobre.



Fonte: Elefio (2018).

Segundo Mamede Filho (2005), praticamente, só dois metais se destinam à fabricação de cabos elétricos, os quais estão descritos abaixo.

- **Condutores de alumínio:** dominam normalmente o mercado nas aplicações de redes e linhas aéreas de distribuição e transmissão de energia elétrica não localizadas próximas ao litoral, e em geral são cabos nus. Isto é devido a seu baixo custo, comparado aos condutores de cobre, a sua relação peso por área, e o excelente comportamento aos esforços mecânicos, quando encordoados com a alma de aço. Quanto à sua aplicação em cabos isolados, são comumente empregados nas redes de distribuição subterrâneas de grandes centros urbanos, tanto em média como em baixa tensão. Na indústria, sua aplicação é muito reduzida. O alumínio possui uma menor condutividade quando comparado ao cobre, e possui dificuldade de conexão quando o outro elemento a ser conectado é o cobre, pois na região de contato há uma acelerada deterioração do alumínio;
- **Condutores de cobre:** dominam praticamente o mercado nas aplicações de instalações elétricas e na indústria, como na ligação interna de motores elétricos. O fato de possuir elevada condutividade elétrica, aliada a uma boa resistência

a oxidação, torna o cobre o material mais adequado para essas aplicações.

Com relação aos isolantes, é relevante distinguir o termo isolamento de isolamento. Isolação refere-se ao qualitativo do material, ou seja, sua composição, enquanto isolamento tem um significado quantitativo, referindo-se a tensão para a qual o isolamento foi projetado.

Nas aplicações de instalações elétricas e de ligação interna de máquinas elétricas, encontram-se no mercado dois principais tipos de materiais para a isolamento:

- **Termoplásticos:** fabricadas à base de cloreto de polivinila, conhecido comumente como PVC. Este torna-se amolecido a partir da temperatura de 120°C, fazendo com que sua aplicação se restrinja a situações de temperatura não muito elevada, geralmente instalações residenciais;
- **Termofixos:** possuem a propriedade de não se tornarem maleáveis com uma elevação de temperatura após sua fabricação, podendo ser utilizados em situações onde é exigida uma temperatura maior no cabo. Existem vários tipos de termofixos utilizados, dentre os quais destacam-se o EPR, utilizado em diversos tipos de instalações elétricas, e o silicone, que além de maleável, suporta até 200°C mantendo sua estabilidade, e é utilizado no interior de máquinas elétricas que possuem elevada temperatura interna.

Sendo assim, para realizar a escolha de um cabo elétrico é necessário analisar o material condutor que será utilizado, o material de isolamento, de forma a atender a temperatura de operação e o nível de isolamento de tensão requerido, e a área de sua seção transversal, chamada de bitola. Essa última característica a ser escolhida é importante pelo fato de que ela influenciará diretamente no que chama-se de capacidade de condução de corrente, ou ampacidade, de um cabo elétrico.

2.2.1 Capacidade de condução de corrente – Ampacidade

A capacidade de condução de corrente de um cabo elétrico, ou ampacidade, é definida como a corrente máxima que o mesmo pode conduzir continuamente, em condições especificadas, sem que sua temperatura em regime permanente ultrapasse um valor limite. A circulação de uma corrente elétrica I (A) em qualquer material com uma resistência R (Ω) irá dissipar uma potência P (W), como segue:

$$P = R \times I^2 \quad (3)$$

Esta potência será dissipada na forma de calor, o que produzirá um aumento na temperatura do material. Em um cabo elétrico, a corrente circula por um material condutor que possui a seguinte resistência (R) associada a resistividade do material (ρ), ao comprimento do cabo (L) e a área de sua seção transversal (S):

$$R = \frac{\rho \times L}{S} \quad (4)$$

Dessa forma, conclui-se que para uma mesma corrente elétrica circulando em um cabo, quanto maior sua bitola, menor será sua resistência e, por consequência, menor será a potência dissipada no cabo. Isso faz com que cabos de maior área de seção transversal possuam uma maior capacidade de condução de corrente.

Sendo assim, pode-se concluir que a corrente que circula por um cabo elétrico deve ser igual ou inferior a sua ampacidade para que seja garantida uma durabilidade dos mesmos e de sua isolamento, tendo em vista os efeitos térmicos produzidos pela circulação de corrente.

Como a capacidade de condução de corrente de um condutor está relacionada com a temperatura máxima admissível, além das características construtivas, as condições de instalação de um cabo influenciarão diretamente no valor de sua ampacidade. Diferentes formas de instalação farão com que a potência dissipada no cabo passe por diferentes modos de transferência de calor, além de diferentes valores associados ao fluxo de calor para cada modo. A temperatura ambiente e a temperatura no condutor também influenciam esse processo e alteram a ampacidade dos cabos.

A norma brasileira NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão (ABNT, 2004) apresenta valores tabelados para capacidade de condução de corrente para cabos de isolamento de PVC e de EPR, para diferentes métodos de referência de instalação, na temperatura ambiente de referência de 30°C. Além disso, apresenta uma tabela de fator de correção para corrigir a ampacidade de um condutor para uma outra temperatura ambiente, onde o usuário deve multiplicar o valor de capacidade de condução de corrente fornecido pela norma por esse fator.

Muitos fabricantes indicam como referência para a obtenção dos valores de ampacidade de seus cabos a utilização da NBR 5410. O problema é que esta norma não apresenta nenhuma metodologia para a obtenção dos valores que estão tabelados, além de não fornecerem valores para outros tipos de isolamento, como o silicone. Também pode ser desejado obter uma temperatura no condutor abaixo do valor limite da isolamento, e

isso faz com que a corrente máxima permitida por condutor seja menor do que o valor apresentado, fato que a norma não cobre.

Quando não é indicada a norma como referência para os valores de capacidade de condução de corrente, os fornecedores de cabos elétricos isolados fornecem em seu catálogo valores para ampacidade de seus produtos. Como exemplo, a Cofibam, empresa certificada nacional e internacionalmente, apresenta em seu catálogo uma tabela, adaptada na Figura 2:

Figura 2 – Trecho de um catálogo da empresa Cofibam.

Código Cofibam	Seção (AWG)	Resistência Elétrica Máxima (Ω/km)	Isolação		Capacidade de Corrente (A) *
			Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	
0102.1048-04	20	34,60	0,84	2,67	24
0176.0021-04	18	21,80	0,84	2,90	32
0176.0022-04	16	13,70	0,84	3,16	42
0176.0023-04	14	8,61	0,84	3,55	56
0176.0024-04	12	5,53	0,84	4,01	74
0176.0014-04	10	3,48	1,26	5,50	98
0176.0013-04	8	2,18	1,26	6,67	136
0176.0012-04	6	1,39	1,68	8,58	182
0176.0011-04	4	0,873	1,68	9,92	245
0176.0010-04	2	0,554	1,68	11,85	327

* Cabos instalados ao ar livre / Temperatura ambiente 30°C

Fonte: Cofibam (2018).

O trecho é de um catálogo de cabos com isolação de silicone, para 200°C e 1 kV. Os valores de capacidade de corrente apresentados são válidos para cabos instalados ao ar livre e uma temperatura ambiente de 30°C. Para corrigir a ampacidade fornecida para temperaturas diferentes no cabo e no ambiente, o fornecedor sugere o uso da seguinte equação:

$$fcr = \sqrt{\frac{Tcabo_{op} - Tamb_{op}}{Tcabo_{ref} - Tamb_{ref}}} \quad (5)$$

Neste caso, fcr é o fator de correção que deve ser multiplicado pelo valor de capacidade de condução de corrente fornecido no catálogo, que corrige o valor apresentado para temperaturas no condutor ($Tcabo_{ref}$) e no ambiente ($Tamb_{ref}$) de referência para as temperaturas de operação, no cabo ($Tcabo_{op}$) e no ambiente ($Tamb_{op}$). Fazer uso de informações tabeladas, tanto fornecidas por fabricantes quanto apresentadas na NBR-5410, pode distanciar o engenheiro de compreender e analisar os fenômenos que levam a escolha de um cabo elétrico. Além disso, pode-se considerar a possibilidade de obter otimizações com relação ao dimensionamento, bem como obter valores mais precisos para condições

de instalação não informadas. Por exemplo, Neher e McGrath (1957) descreveram um método para estimar a temperatura em regime permanente de cabos elétricos para configurações de instalação comumente encontradas. Assim, estimando a temperatura dos cabos, pode-se então determinar a ampacidade do mesmo. Os autores descreveram cálculos bidimensionais em situações simétricas, que formam a base para a definição da capacidade de condução de corrente para muitas aplicações e para elaboração de normas.

A NBR 11301 – Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%) – fornece métodos para a obtenção da ampacidade de cabos isolados através de cálculos, válidos para todas as tensões alternadas, em tensões contínuas até 5kV, diretamente enterrados, em dutos, em canaletas ou em tubos de aço, bem como instalados ao ar. Esta norma brasileira foi baseada na IEC 60287, que por sua vez baseou-se no trabalho de Neher e McGrath para estabelecer o equacionamento.

Como base para qualquer situação, a NBR 11301 propõe a seguinte equação geral para determinar a ampacidade de um cabo elétrico:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R_{ca}T_1 + nR_{ca}(1 + \lambda_1)T_2 + nR_{ca}(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}} \quad (6)$$

Em que:

- I corrente no condutor (A);
- $\Delta\theta$ diferença de temperatura entre o condutor e o meio ambiente (°C);
- W_d perdas dielétricas na isolação (W/m);
- T_1 : resistência térmica da isolação (m·K/W);
- n : número de condutores do cabo, efetivamente carregados;
- T_2 : resistência térmica do acolchoamento entre a capa e, quando houver, a armação metálica (m·K/W);
- T_3 : resistência térmica da cobertura (m·K/W);
- T_4 : resistência térmica externa do cabo (m·K/W);
- R_{ca} resistência elétrica do condutor em corrente alternada na temperatura de operação (Ω/m);
- λ_1 relação entre as perdas na blindagem ou capa metálica (quando houver) e as perdas nos condutores;
- λ_2 : relação entre as perdas da armação metálica (quando houver) e as perdas nos condutores.

Para a obtenção dos termos presentes na equação que resulta na ampacidade de um condutor, a norma fornece outras equações que devem ser aplicadas, que variam com relação a forma de construção de um cabo elétrico, suas dimensões, o ambiente em que ele está instalado e seu material de isolamento. Com isso, cada cabo e sua aplicação devem ser analisados com cautela para que se obtenha cálculos precisos com relação a sua capacidade de condução de corrente.

2.3 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

O motor elétrico de indução é uma máquina de corrente alternada (CA) conectada a uma rede de alimentação em CA. Nas máquinas estudadas neste trabalho, a fonte de potência CA é trifásica, embora também possam ser monofásicas. O motor elétrico tem sua construção dividida em duas partes elementares, estator e o rotor, separados por um entreferro. No caso dos motores de indução trifásicos (MIT) a disposição dos enrolamentos no estator, que é conectado a fonte, produz um campo girante no entreferro da máquina. Isso induz (por isso, motor de indução) tensões nos condutores do rotor, como previsto na Lei de Faraday-Lenz. Com os enrolamentos do rotor em circuito fechado, correntes circulam na parte rotativa da máquina, produzindo um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo girante. Como os campos opostos se atraem, bem como o campo do estator é disposto de forma a ser rotativo, o rotor tende a acompanhar (sem alcançar) a rotação deste campo. Com isso, desenvolve-se no rotor um torque que faz com que ele gire, o que permite acionar uma carga acoplada a seu eixo (Chapman, 2013).

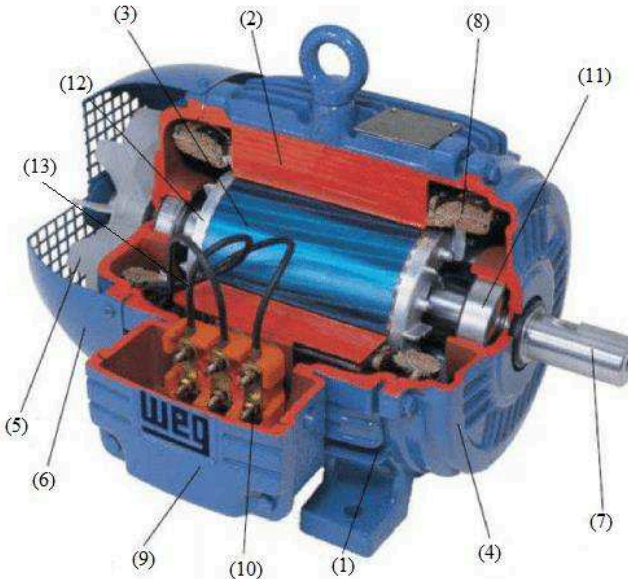
Os rotores dos motores de indução são construídos de duas diferentes maneiras de forma a possibilitar a circulação de corrente:

- **Rotor bobinado:** formado por um núcleo ferromagnético laminado sobre o qual são alojadas espiras colocadas em diversas ranhuras, ligadas a anéis coletores isolados montados no eixo, constituindo um enrolamento trifásico. Possuem maior custo de manutenção e custo inicial em relação ao rotor em gaiola, o que faz com que seu uso seja limitado a algumas aplicações;
- **Rotor em gaiola:** consiste em uma série de barras condutoras, geralmente de cobre ou alumínio, que são fundidas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto-circuito em ambas as extremidades por grandes anéis de curto-circuito. É o tipo de rotor mais utilizado pela

indústria, e os estudos de capacidade de condução de corrente de cabos elétricos serão retratados nele.

A Figura 3 mostra um corte de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola, do tipo TEFC¹. As principais partes destacadas na figura são: (1) carcaça; (2) núcleo de chapas - estator; (3) núcleo de chapas - rotor; (4) tampa; (5) ventilador; (6) tampa defletora; (7) eixo; (8) enrolamento trifásico; (9) caixa de ligação; (10) terminais; (11) rolamentos, (12) barras e anéis de curto-circuito e (13) cabos de ligação.

Figura 3 – Motor de indução trifásico com rotor em gaiola.



Fonte: Adaptado de Santos (2016).

A parte do enrolamento trifásico que não está inserida nas ranhuras das chapas do estator, visível na Figura 3 em (8), é chamada popularmente no meio da engenharia de cabeça de bobina. É na cabeça de bobina que é realizada a conexão entre os fios dos enrolamentos e os cabos de ligação (Figura 4), que são levados até a caixa de ligação para que o usuário realize a alimentação do motor elétrico.

¹ *Totally enclosed, fan-cooled* – totalmente fechado, refrigerado por ventilador.

Figura 4 – Cabos de ligação na cabeça de bobina.



Fonte: Feita pelo autor (2018).

Como a capacidade de condução de corrente de cabos elétricos está relacionada a temperatura máxima que o condutor pode atingir, faz-se necessário conhecer e compreender o ambiente em que os cabos de ligação estão instalados, as fontes e a forma de dissipação da energia térmica interior ao motor. Além disso, é importante conhecer as temperaturas limites dos outros materiais isolantes da máquina, a fim de evitar falhas causadas por temperaturas elevadas. Também é preciso definir a corrente que circulará em cada cabo de ligação, o que varia com a quantidade de cabos utilizados e o tipo de ligação realizado na bobinagem do motor.

2.3.1 Geração e dissipação das perdas do motor de indução trifásico

A potência útil fornecida na ponta do eixo de um motor de indução trifásico é sempre inferior a potência absorvida da fonte de alimentação. Ou seja, seu rendimento é sempre inferior a 100%. A diferença entre as duas potências representa as perdas, que são transformadas em energia térmica, as quais aquecem os enrolamentos e o ambiente interno do motor e devem ser dissipadas para fora do motor, impedindo uma elevação excessiva de temperatura.

Em um motor de indução trifásico, as perdas são as seguintes:

- **Perdas joule nos enrolamentos do estator:** São resultantes da circulação da corrente nos condutores dos enrolamentos que, possuindo uma resistência ôhmica, apresentam uma geração de potência $R \times I^2$, o que ocasiona o aquecimento dos condutores;
- **Perdas joule nos enrolamentos do rotor:** Da mesma forma que no estator, essas perdas estão associadas a circulação de corrente nos condutores do rotor, que surgem através da potência ativa transferida do enrolamento do estator ao rotor através do entreferro;
- **Perdas no ferro:** Consistem em perdas por histerese e perdas por correntes parasitas, ou correntes de Foucault, e se originam da variação de densidades do fluxo e das características intrínsecas das chapas magnéticas, tanto do estator (principalmente) quanto do rotor;
- **Perdas mecânicas:** São ocasionadas devido ao atrito nos mancais, e seu valor depende de vários fatores, desde o tipo de mancal até seu estado de lubrificação. Também ocorrem perdas em relação a potência consumida por circulação do ar e devido à ventilação, mas estes fenômenos ajudam na dissipação do calor e na limitação da elevação da temperatura, principal foco da abordagem deste assunto neste trabalho;
- **Perdas suplementares:** Ocorrem devido ao efeito pelicular em condutores submetidos a corrente alternada; a correntes parasitas que circulam na massa dos condutores, provenientes de variações do campo magnético nas regiões ocupadas por eles; a reação do induzido que modificam as distribuições de indução ao redor do entreferro das máquinas; a fluxos dispersos que podem alcançar peças estruturais (parafusos, suportes, entre outros), produzindo perdas adicionais.

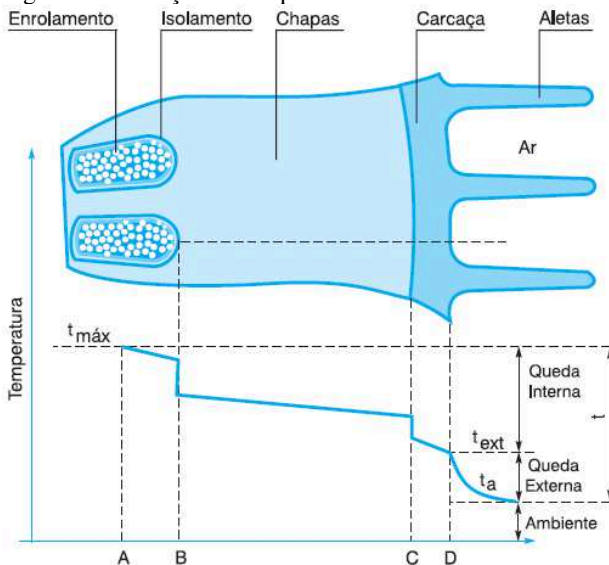
O calor gerado pelas perdas no interior de um motor fechado é dissipado para o ar ambiente através da superfície externa da carcaça, auxiliada pela convecção forçada gerada pelo ventilador montado no próprio eixo do motor. Uma boa dissipação depende:

- **Da eficiência do sistema de ventilação (quando existente):** Um sistema de ventilação bem projetado, além de ter um ventilador eficiente, que seja capaz de

movimentar uma vazão adequada de ar, deve direcionar esse ar de forma a varrer toda a superfície da carcaça, de forma a otimizar a transferência de calor;

- **Da área total de dissipação da carcaça:** A área total de dissipação deve ser a maior possível. Entretanto, um motor com uma carcaça muito grande, para obter maior área, seria mais caro, pesado e ocuparia muito espaço. Por isso, a área de dissipação disponível é limitada pela necessidade de se fabricar motores pequenos e leves. Para compensar isso, aumenta-se a área disponível por meio de aletas de resfriamento, fundidas com a carcaça, que tem como objetivo aumentar a taxa de transferência de calor entre a carcaça e o ar adjacente;
- **Da diferença de temperatura entre a superfície externa da carcaça e do ar ambiente:** Para que a diferença de temperatura entre a superfície externa e o ar ambiente seja a maior possível, é necessário que a queda interna de temperatura, mostrada na Figura 5, seja minimizada. Isto significa que deve haver uma boa transferência de calor do interior do motor até sua superfície externa.

Figura 5 – Elevação de temperatura no interior de um motor elétrico.



Fonte: WEG (2017).

Os projetos procuram aprimorar a transmissão de calor internamente, de modo que a temperatura do enrolamento fique pouco acima da temperatura externa da carcaça, onde realmente existe a dissipação das perdas. Sendo assim, deseja-se sempre limitar a elevação da temperatura do enrolamento com relação à temperatura ambiente. Esta diferença é comumente chamada de “elevação de temperatura” do motor e, como mostrado na Figura 5, é igual à soma da queda interna com a queda externa.

A queda interna de temperatura depende de diversos fatores, onde as temperaturas de pontos importantes do motor estão representadas na Figura 5 e explicadas a seguir:

- **A:** Ponto mais quente do enrolamento, no interior da ranhura, onde é gerado o calor proveniente das perdas Joule nos condutores do enrolamento do estator;
- **AB:** Queda de temperatura na transferência de calor por condução, do ponto mais quente até os fios externos. Como o ar parado é um péssimo condutor de calor, é importante que não haja vazios no interior da ranhura. Ou seja, para garantir uma boa condução de calor, as bobinas devem estar compactadas e a impregnação com verniz deve preencher o máximo possível os vazios;
- **B:** Queda de temperatura através do contato do isolamento da ranhura com os enrolamentos do estator de um lado, e com as chapas do núcleo do estator do outro. Para melhorar a condução de calor nesta parte, é necessário utilizar materiais modernos como isolante; realizar uma impregnação perfeita para melhorar o contato do lado interno, eliminando espaços vazios; possuir um bom alinhamento das chapas estampadas, o que melhora o contato externo, eliminando camadas de ar que prejudicam a transferência de calor por condução;
- **BC:** Queda de temperatura por condução através do material das chapas do núcleo do estator;
- **C:** Queda de temperatura através do contato entre o núcleo do estator e a carcaça da máquina. A condução de calor no contato será tanto melhor quanto mais perfeita for a união entre as duas partes, o que irá depender do alinhamento das chapas e da precisão da usinagem da carcaça. Superfícies irregulares deixam espaços vazios entre elas, resultando num mau contato e, portanto, má condução de calor;

- **CD:** Queda de temperatura por condução através da espessura da carcaça;
- **D:** Queda de temperatura por convecção entre a superfície da carcaça e o ar sobre ela. Como visto, muitos fatores influenciam a transferência de calor por convecção, como a geometria da superfície, a natureza do movimento e um conjunto de propriedades do fluido.

Conhecendo-se as formas de geração de calor no interior do motor e a forma com que esta energia é dissipada ao meio ambiente, adquire-se uma boa noção da importância dos materiais isolantes utilizados na construção das máquinas suportarem temperaturas elevadas.

2.3.2 Sistema de isolamento de um motor elétrico de indução

Como o motor de indução trifásico é uma máquina robusta e de construção simples, sua vida útil depende quase que exclusivamente da vida útil do sistema de isolamento dos enrolamentos. Este sistema é afetado por diversos fatores, como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é, sem dúvida, a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados. Isso se dá pelo fato de que, de acordo com Hamdi (1994), uma elevação de temperatura de 8 a 10 graus acima do limite da classe térmica na temperatura do sistema de isolamento pode reduzir a vida útil do isolante pela metade. Quando se fala em vida útil, refere-se ao envelhecimento gradual do isolante, que, devido a temperatura de trabalho, vai tornando-se ressecado e perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão a qual está submetido e produza um curto-circuito.

O limite de temperatura de trabalho em regime permanente depende do tipo de material utilizado. Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento são agrupados em classes térmicas, conforme a norma NBR IEC 60085 (ABNT, 2017). No que diz respeito às classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura, tem-se as definições apresentadas na norma NBR 17094-1 (ABNT, 2013). Os valores numéricos e a composição da temperatura admissível no ponto mais quente, que define a classe da máquina, são indicados na Tabela 1. Existem outras classes, não tão comuns na indústria, que foram omitidas. O método da resistência, utilizado para medir a variação de temperatura dos enrolamentos, consiste em realizar medições de resistência dos enrolamentos antes e depois da máquina estar em funcionamento em

condições nominais até seu equilíbrio térmico. Dessa forma, através da propriedade dos condutores de variar sua resistência conforme a temperatura é possível obter a temperatura média dos enrolamentos.

Tabela 1 – Classes de isolamento e suas temperaturas máximas associadas.

Classe de isolamento	B	F	H
Temperatura ambiente [°C]	40	40	40
ΔT = Elevação de temperatura [°C] (Método da resistência)	80	105	125
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	10	10	15
Temperatura do ponto mais quente	130	155	180

Fonte: ABNT (2013).

Nos motores de indução trifásicos, podem ser identificados diferentes materiais isolantes que compõe a máquina, formando um sistema de isolamento ao qual é atribuída sua classe adequada. É válido ressaltar que um material isolante que faz parte do sistema de isolamento da máquina não necessariamente necessita ser da mesma classe térmica do sistema de isolamento, pois a classe é atribuída ao sistema como um todo.

O fio circular esmaltado é um dos principais componentes do MIT de baixa tensão, pois é a corrente elétrica que circula através dele que cria o campo girante necessário para o funcionamento do motor. O esmalte utilizado no fio é o que garante o isolamento, tanto elétrico quanto mecânico, pois o fio é submetido a diversos esforços mecânicos de tração, abrasão e flexão durante sua inserção nas ranhuras. Além disso, ele deve ter suas propriedades resistentes a temperaturas elevadas, pois no interior do enrolamento tem-se temperatura de acordo com a classe e elevação de temperatura designada a máquina.

Os filmes e laminados isolantes tem função de isolar térmica e eletricamente partes da bobina do motor: entre a bobina e a ranhura (filme de fundo de ranhura); entre as fases; no fechamento da ranhura do estator. Também são utilizados vernizes e resinas de impregnação, que tem como principal função manter unidos entre si todos os fios esmaltados dos enrolamentos com todos os componentes do estator e preencher os espaços vazios dentro das ranhuras. Isso impede que os fios vibrem e danifiquem-se, assim como ajuda na transferência de calor de dentro dos enrolamentos para a superfície da carcaça.

Para conectar os fios dos enrolamentos ao meio externo ao motor, onde será feita a ligação da máquina à rede de alimentação, são utilizados

cabos elétricos isolados, chamados na aplicação de cabos de ligação. Os materiais da isolação dos cabos de ligação têm única e exclusivamente a função de isolar eletricamente o condutor do meio externo. É necessário que os materiais possuam rigidez dielétrica adequada aliada à flexibilidade, para permitir o fácil manuseio durante o processo de fabricação, instalação e manutenção do motor. Além disso, devem possuir temperatura de operação adequada de acordo com a classe da máquina.

Como visto neste trabalho de conclusão de curso (TCC), a temperatura máxima de operação do isolante é a base para o dimensionamento dos cabos elétricos isolados e, para a aplicação nos motores elétricos, isso não é diferente. Partindo das temperaturas das classes das máquinas, pode-se citar como materiais disponíveis no mercado o EPR (temperatura máxima de 125/150°C, aplicação com flexão/sem flexão) para classes B/F e o silicone (temperatura máxima de 200°C) para classe H. O foco deste trabalho será nos cabos de ligação destes dois tipos de materiais.

Como última parte a ser citada do sistema de isolamento de um MIT, tem-se os tubos flexíveis. Esses materiais tem a função de cobrir e isolar eletricamente as soldas das conexões entre os fios da bobina e o cabo de ligação e entre os fios. Eles são flexíveis para permitir que se moldem aos pontos de solda e à amarração da cabeça de bobina. São feitos de diferentes materiais, conforme a classe da máquina.

É clara a importância da escolha e dimensionamento dos materiais que compõem o sistema de isolamento da máquina. Com relação aos cabos de ligação, para definir o material de sua isolação, pode-se escolher conforme a classe térmica da máquina, visto que o cabo ficará em contato com os enrolamentos. Para dimensionar sua bitola, necessita-se saber qual a corrente que circulará pelo condutor, e avaliar qualitativa e quantitativamente o ambiente que o cabo está instalado, para que se possa fazer uso de cálculos teóricos como apresentado na NBR-11301 ou de catálogos de fabricantes.

É relevante mencionar a complexidade do ambiente de instalação do cabo, já que ele está exposto a diferentes regiões do MIT e cada região varia de acordo com o projeto eletromagnético e térmico de cada máquina, o que faz com que possuir valores seguros e otimizados para a ampacidade dos cabos de ligação seja um grande desafio.

3 CABOS ELÉTRICOS INSTALADOS AO AR-LIVRE

Um fabricante de motores elétricos, ao buscar no mercado cabos elétricos para serem utilizados como cabos de ligação, tem acesso a um catálogo com as informações conforme apresentado na Figura 2 ou na Figura 6. No trecho do catálogo mostrado na Figura 6, pode-se observar a nota que indica as condições em que o valor de capacidade de condução de corrente (*Current load*) são válidos: instalação ao ar-livre e temperatura ambiente de 30°C.

Figura 6 – Trecho de um catálogo da empresa Tramar.

AWG Size	Conductor Stranding	Thickness Insulation (mm)	Nominal Diameter (mm)	*Electrical Resistance (Ω/km)	**Current load (A)
20	11/0,25	0,76	2,55	34,6	16
18	17/0,25	0,76	2,85	21,8	21
16	28/0,25	0,76	3,15	13,7	26
14	44/0,25	0,76	3,50	8,61	34
12	43/0,32	0,76	4,10	5,53	48
10	68/0,32	1,15	5,40	3,48	66
8	108/0,32	1,15	6,60	2,18	87
6	170/0,32	1,52	8,40	1,39	120
4	273/0,32	1,52	9,15	0,873	170
2	418/0,32	1,52	11,60	0,554	227
1/0	663/0,32	2,03	15,00	0,349	285
2/0	836/0,32	2,03	15,90	0,276	509
3/0	1064/0,32	2,03	17,80	0,221	590
4/0	1344/0,32	2,03	19,60	0,175	683

* Electrical resistance at 20°C

**Maximum current capability to:

Outdoor installation

Room temperature: 30°C

Fonte: WEG (2018).

Observa-se que em ambos os casos apresentados os fabricantes fornecem as características construtivas básicas dos cabos. Com isso, através do equacionamento mostrado na NBR-11301, como na Equação 6, é possível calcular a capacidade de condução de corrente para diferentes formas de instalação previstas na norma. Como nos catálogos o método de instalação utilizado como referência é o de instalação ao ar-livre, pode-se desenvolver o equacionamento para esta situação, o que será descrito na seção 3.1 deste trabalho. Ainda, também será detalhada a realização de um experimento para se obter a validação na prática dos valores obtidos nos cálculos, optando-se por um dos métodos de instalação ao ar-livre. Serão utilizados para os estudos os cabos de EPR dos fabricantes Cofibam e Tramar, e os cabos de silicone do fabricante PanElectric. Os catálogos e amostras de cabos foram uma cortesia da empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A.

3.1 EQUACIONAMENTO SEGUNDO A NBR-11301

A equação utilizada para a obtenção da capacidade de condução de corrente de cabos isolados, presente na NBR-11301, é reapresentada por conveniência na Equação (7):

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R_{ca}T_1 + nR_{ca}(1 + \lambda_1)T_2 + nR_{ca}(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}} \quad (7)$$

Com base nas características construtivas dos cabos utilizados e na aplicação que será estudada, a Equação (7) pode ser bastante simplificada. Conforme indicado na NBR-11301, como as perdas dielétricas dependem da tensão, somente se tornam importantes a partir de certos níveis de tensão de acordo com o material da isolação em uso. Para isolação do tipo sólido, que é o caso dos cabos que estão sob estudo, a norma fala que as perdas dielétricas devem ser consideradas a partir de uma tensão de 38 kV. Como o estudo está sendo feito em máquinas de baixa tensão, tem-se que $W_d = 0$.

Observando a construção dos cabos que serão utilizados, como mostrado ilustrativamente na Figura 7 e retirada do catálogo da Tramar, vê-se que ele não possui armação metálica, capa ou cobertura, apresentando apenas uma camada de isolação. Sendo assim, as variáveis relacionadas a estas partes são nulas ($T_2 = T_3 = \lambda_1 = \lambda_2 = 0$). Além disso, possui apenas um condutor, fazendo com que $n = 1$ na Equação (7).

Figura 7 – Ilustração do cabo elétrico isolado da empresa Tramar.



Fonte: WEG (2018).

Sendo assim, realizando as substituições das variáveis analisadas, dá-se origem à Equação (8), que tem como resultado a ampacidade dos cabos elétricos que estão sendo estudados:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R_{ca} \times (T_1 + T_4)}} \quad (8)$$

De posse da equação a ser utilizada, devem ser analisados e obtidos os quatro valores necessários para obter o resultado de capacidade de condução de corrente.

A variação de temperatura entre o condutor e o ambiente ($\Delta\theta$) será considerada de acordo com o tipo de isolamento do cabo. A temperatura ambiente assumida nos cálculos é de 30°C, devido ao fato de que é a temperatura informada nos catálogos dos fabricantes. A temperatura no condutor irá variar com o tipo de isolamento do cabo: para cabos com isolamento de EPR, será considerada temperatura de 125°C, temperatura máxima para aplicação onde há flexão do cabo, condição em que a ampacidade obtida é menor; para cabos com isolamento de silicone, a temperatura máxima considerada será de acordo com o informado por cada fabricante utilizado como base: 180°C para cabos da PanElectric e 200°C para cabos da Cofibam.

A resistência elétrica do condutor em corrente alternada (R_{ca}) deve ser calculada como mostrado na Equação (9). Esta equação considera a propriedade dos condutores de elevarem sua resistência conforme aumento de temperatura, assim como os efeitos pelicular e de proximidade.

$$R_{ca} = R_{cc20} \left[1 + \alpha_{20} (\theta_c - 20) \right] (1 + Y_s + Y_p) \quad (9)$$

Em que:

R_{cc20} : resistência elétrica do condutor em corrente contínua a 20°C (Ω/m). Os valores máximos permitidos para este dado são informados pelo fabricante nos catálogos, como pode ser visto na Figura 2 ou na Figura 6, para as diferentes bitolas comerciais;

α_{20} : coeficiente de temperatura a 20°C para correção da resistividade por Kelvin. O valor do coeficiente para o cobre, condutor utilizado nos cabos estudados neste trabalho, informado no Anexo A da NBR-11301 é de 0.00393;

θ_c : temperatura de operação do condutor, em °C. Como se deseja obter o valor de capacidade de condução de corrente, a temperatura de operação do condutor considerada será a temperatura limite da isolamento. Ou seja, conforme exposto anteriormente, para cabos de EPR a temperatura considerada será de 125°C, enquanto para cabos de silicone será 180°C;

Y_s : fator de efeito pelicular. Como o efeito pelicular aumenta com a elevação da frequência, e neste trabalho trata-se de aplicações com frequências comerciais (60 Hz), este fator terá valor desprezível. Com isso, considera-se que $Y_s = 0$.

Y_p : fator de efeito proximidade para cabos com duas veias e para dois cabos unipolares. Neste trabalho, os cabos possuem uma única veia. Nos catálogos dos fabricantes, não há indícios de que a capacidade de condução de corrente informada é para dois cabos unipolares, e o

experimento será realizado com cabos isolados dispostos individualmente. Sendo assim, será considerado que $Y_p = 0$.

A resistência térmica da isolação (T_1) é calculada como na Equação (10). Esta equação vem ao encontro do que é obtido na solução da Equação de Fourier – Equação (1) para cilíndricos concêntricos demonstrado em Incropera (2008), o que é uma excelente representação do que ocorre entre o condutor e sua isolação.

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) \quad (10)$$

Em que:

ρ_1 : resistividade térmica da isolação (m·K/W). Como a NBR-11301 não informa os valores da resistividade térmica para EPR e Silicone, os valores utilizados nos cálculos tiveram que ser retirados de fontes externas, como sugerido pela própria norma no caso de haver possibilidade da utilização de valores mais precisos. Para os cabos com isolação de EPR, o valor utilizado foi de 3.5 (m·K/W), valor indicado na Tabela 5 do Anexo A da norma. Para os cabos com isolação de silicone, o valor utilizado foi de 5 (m·K/W), o mesmo indicado pela norma para o material borracha, devido à similaridade da composição dos materiais;

t_1 : espessura da isolação (mm). Como pode ser visto na Figura 2 ou na Figura 6, os valores nominais da espessura de isolação são fornecidos pelos fabricantes para todas as bitolas, e foram utilizados para a realização dos cálculos;

d_c : diâmetro do condutor (mm). De posse da espessura da isolação e do diâmetro externo nominal do cabo (presente nos catálogos dos fabricantes), é possível obter o diâmetro do condutor, subtraindo o diâmetro externo do dobro da espessura da isolação.

A resistência térmica externa (T_4) para cabos instalados ao ar-livre e protegidos da radiação solar é calculada através da Equação 11.

$$T_4 = \frac{1}{\pi \cdot D_e^* \cdot h \cdot \sqrt[4]{\Delta\theta_s}} \quad (11)$$

Em que:

D_e^* : diâmetro externo do cabo (m). Os dados de cada bitola estão nos catálogos dos fabricantes, geralmente em milímetros;

$h = E + \frac{Z}{(D_e^*)^g}$: coeficiente de dissipação de calor, em $\frac{W}{m^2 (K)^{5/4}}$.

Este coeficiente diz respeito a todos os modos de transferência de calor, assim como a efeitos de aquecimento mútuo em condições pré-estabelecidas (DE LEÓN; SEDAGHAT, 2014). E , Z e g são constantes

com os valores dependentes da forma de instalação do cabo. Seus valores podem ser obtidos na Tabela 6, Anexo A, da NBR-11301. O Quadro 1 apresenta três das formas de instalação que constam na norma e os valores que devem ser utilizados para os coeficientes em cada situação, enumerando as formas de instalação para comparações posteriores.

Quadro 1 – Formas de instalação e coeficientes para cálculo da resistência térmica externa segundo NBR-11301.

Instalação	Z	E	g	Forma de instalação
Cabo único ou duto com convecção livre (1)	0,21	3,94	0,60	
Três cabos em formação trifólio (2)	0,96	1,25	0,20	
Cabo único ou duto em parede vertical (3)	1,69	0,63	0,25	

Fonte: ABNT (1990).

$\Delta\theta_s$: diferença entre a temperatura da superfície do cabo e o meio ambiente, em Kelvin. A NBR-11301 descreve um método iterativo simples para obter $\sqrt[4]{\Delta\theta_s}$, como mostrado na Equação (12):

$$\sqrt[4]{\Delta\theta_{s(n+1)}} = \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{1 + \pi \cdot D_e^* \cdot h \cdot T_4 \cdot \sqrt[4]{\Delta\theta_{s(n)}}}} \quad (12)$$

Deve-se fazer o valor inicial de $\sqrt[4]{\Delta\theta_s} = 2$ e iterar até que:

$\sqrt[4]{\Delta\theta_{s(n+1)}} - \sqrt[4]{\Delta\theta_{s(n)}} \leq 0.001$. Para realizar este cálculo iterativo, foi utilizada a função de cálculo iterativo do Microsoft Excel.

Tendo em mãos um catálogo de fabricante de cabos elétricos provendo as informações necessárias, pode-se resolver as equações apresentadas e calcular a capacidade de condução de corrente de um cabo elétrico de qualquer seção transversal para uma determinada condição de

instalação. Utilizando como base as características construtivas e os valores de ampacidade presente nos catálogos do fabricante Cofibam, calculou-se a capacidade de condução de corrente para as três condições de instalação apresentadas no Quadro 1, comparando com os valores fornecidos em catálogo, enunciada como condição (ref.). Os cálculos foram feitos para os cabos de EPR (Tabela 2) e de silicone (Tabela 3).

Tabela 2 – Capacidade de condução de corrente dos cabos de EPR.

Bitola	I (1) (A)	I (2) (A)	I (3) (A)	I (ref.) (A)
20 AWG	21.64	18.72	14.21	16
18 AWG	28.19	24.48	18.62	21
16 AWG	36.77	32.07	24.44	28
14 AWG	48.48	42.54	32.51	39
12 AWG	61.60	54.38	41.72	52
10 AWG	87.05	78.52	61.57	71
8 AWG	119.68	108.62	85.64	90
6 AWG	159.20	146.12	117.12	130
4 AWG	213.08	196.06	157.82	174
2 AWG	288.99	266.55	215.77	232

Fonte: Elaborado pelo autor, com informações do catálogo Cofibam (2018).

Tabela 3 – Capacidade de condução de corrente dos cabos de Silicone.

Bitola	I (1) (A)	I (2) (A)	I (3) (A)	I (ref.) (A)
20 AWG	27.21	23.84	18.40	24
18 AWG	35.52	31.21	24.10	32
16 AWG	46.41	40.93	31.64	42
14 AWG	59.25	52.31	40.46	56
12 AWG	80.23	71.46	55.52	74
10 AWG	108.38	98.61	78.50	98
8 AWG	148.31	135.61	108.39	136
6 AWG	197.59	182.74	148.74	182
4 AWG	265.26	245.81	200.72	245
2 AWG	358.93	333.22	273.33	327
50 mm ²	448.69	419.14	349.45	422
70 mm ²	563.99	526.79	440.53	520
95 mm ²	677.61	632.69	530.54	634
120 mm ²	781.13	731.23	618.96	735
150 mm ²	920.28	860.50	730.64	846

185 mm ²	1048.99	979.95	833.81	967
---------------------	---------	--------	--------	-----

Fonte: Elaborado pelo autor, com informações do catálogo Cofibam (2018).

Através dos cálculos realizados pode-se verificar que existe a possibilidade de otimizar o dimensionamento de cabos elétricos se considerado adequadamente sua condição de instalação e aplicado equacionamento adequado para determinar sua ampacidade. Ao simplesmente determinar-se o valor de ampacidade como sendo o informado por catálogo, se a instalação do cabo é feita em cabo único com convecção livre, por exemplo, perde-se bastante de sua capacidade de condução de corrente.

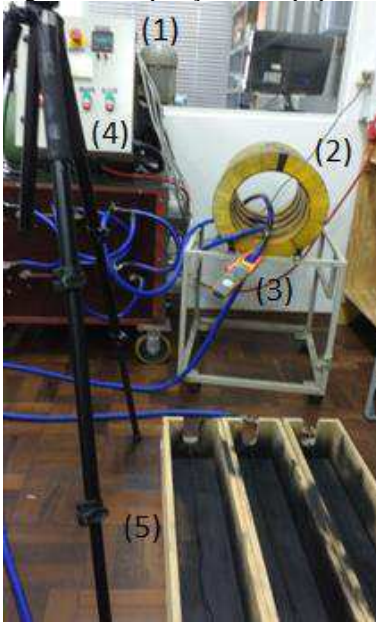
Existem condições de instalação que também são ao ar-livre, mas possuem um valor de ampacidade menor do que o informado no catálogo, como descrito pelas situações (2) e (3), onde existe uma superfície que impede uma troca de calor mais intensa (2) ou outras fontes de calor para o cabo (3). Nestes casos, adotar o valor de capacidade de condução de corrente informado no catálogo apresentaria um risco para a instalação, visto que certamente a temperatura atingida pelos cabos seria superior a temperatura de operação máxima de seu material isolante.

É importante frisar que apesar de os cálculos aqui expostos terem sido feitos com base nos catálogos da Cofibam, o mesmo comportamento é obtido calculando-se a ampacidade de cabos elétricos de outros fabricantes. Com isso, torna-se relevante a validação experimental da utilização da NBR-11301 como forma de definição da capacidade de condução de corrente, o que será feito na próxima seção.

3.2 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA NBR-11301

Com o intuito de validar os valores calculados através do equacionamento da NBR-11301, elaborou-se um experimento capaz de verificar as temperaturas dos cabos quando submetidos a diferentes níveis de corrente. Além da possibilidade de validar os valores calculados, buscou-se a comparação com os valores fornecidos em catálogo por fabricantes. Os experimentos foram realizados no laboratório de vibrações do departamento de Pesquisa & Inovação Tecnológica da WEG Equipamentos Elétricos S.A., em Jaraguá do Sul. Os testes foram realizados com os equipamentos dispostos como mostrados na Figura 8.

Figura 8 – Disposição dos equipamentos no experimento realizado ao ar-livre.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Foi utilizada uma fonte de corrente (1), com cabo de conexão com a carga passando por uma carga indutiva (2) para regular o valor máximo de corrente. Para realizar a medição da corrente, utilizou-se um alicete-amperímetro (3). As amostras que foram ensaiadas tiveram sua temperatura superficial e do ambiente em que estavam instalados monitoradas por uma câmera termográfica (4). As caixas de madeira em que as amostras foram instaladas (5) foram pintadas de preto para que o ambiente em que a câmera estivesse posicionada tivesse sua emissividade uniforme, visto que isso melhora a precisão do equipamento de medição. A forma de instalação que buscou-se realizar foi a de cabo único com convecção livre. Para isso, as amostras tiveram suas extremidades fixadas nas aberturas dos cantos da caixa, fazendo com que o cabo ficasse instalado sem encostar em nenhuma superfície. Além disso, as paredes de madeira impedem que haja fluxos de ar realizando uma convecção forçada nas amostras.

Como dito, para obter-se o controle da temperatura superficial do cabo e do ambiente como um todo, fez-se o uso de uma câmera termográfica, que indicaria alguma anormalidade na amostra ou falha no

experimento, o que não ocorreu. Para registrar a temperatura com maior exatidão, foram inseridos dois sensores térmicos do tipo pt-100 nos cabos da caixa central das amostras. Esses sensores são resistências que se baseiam no princípio de variação de resistência em função da temperatura, e são constituídos de platina. A configuração utilizada foi a de três fios, amplamente utilizada pela indústria (WEG, 2017). Um sensor estava em contato com a superfície do isolamento do cabo, e o outro foi colocado em contato diretamente com o condutor, tendo sido feito um corte na isolação para que esse contato fosse possível. Como pode ser visto na Figura 9, ambos os sensores foram fixados através da utilização de fita de kapton (resistente a alta temperatura, imagem da esquerda) e da inserção de termo-encolhíveis (imagem da direita). Para registrar as temperaturas obtidas pelos sensores, foi utilizado um registrador MV-100 do fabricante Yokogawa.

Figura 9 – Fixação dos sensores térmicos nos cabos elétricos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As seções transversais que foram selecionadas para o experimento foram: 20 AWG, do fabricante Cofibam, que possuiu a maior diferença relativa quando comparado o valor calculado pelo equacionamento da NBR-11301 ao valor fornecido em catálogo; 14 AWG, do fabricante Tamar, que apresentou a menor diferença; e 2 AWG, do fabricante PanElectric, que apresentou a diferença mais próxima da média das diferenças encontradas entre todas as bitolas.

Feita a instalação de cada amostra conforme descrito, o procedimento experimental consistiu em aplicar um degrau de corrente no cabo e monitorar sua temperatura até a estabilização térmica, que seria observada facilmente no registrador de temperaturas dos sensores. Após isso, aumentou-se o valor da corrente para um degrau superior, e observou-se a estabilização térmica novamente.

O valor do primeiro degrau de corrente é o valor informado pelo fabricante no catálogo como sendo a capacidade de condução de corrente do cabo em uma instalação ao ar-livre. Porém, como já salientado neste trabalho, este valor é informado para uma temperatura ambiente de 30°C. Sendo assim, para obter-se um valor de corrente dado como limite pelos

fabricantes, fez-se uso da Equação (5), em que se manteve a temperatura de operação igual a referência (125°C para isolamento de EPR e 180°C para isolamento de silicone), e se corrigiu a temperatura ambiente para o medido no momento do experimento através de um termômetro digital. O segundo degrau de corrente tem seu valor calculado conforme o equacionamento descrito na seção anterior deste trabalho, para as temperaturas limites de operação já estabelecidas e para a temperatura ambiente registrada pelo termômetro. Os valores utilizados nos experimentos são apresentados no Quadro 2.

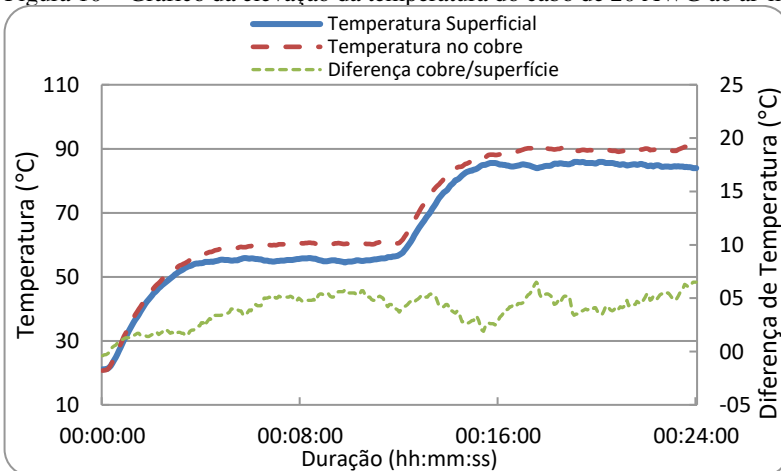
Quadro 2 – Condições do ensaio dos cabos elétricos ao ar-livre.

Bitola	I catálogo	Temperatura Ambiente	Correntes aplicadas	
			I catálogo (corrigida)	I NBR-11301 (calculada)
20 AWG	16 A	23,8 °C	16,5 A	22,1 A
14 AWG	34 A	23,8 °C	35,1 A	50,4 A
2 AWG	292 A	21,9 °C	301 A	369 A

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

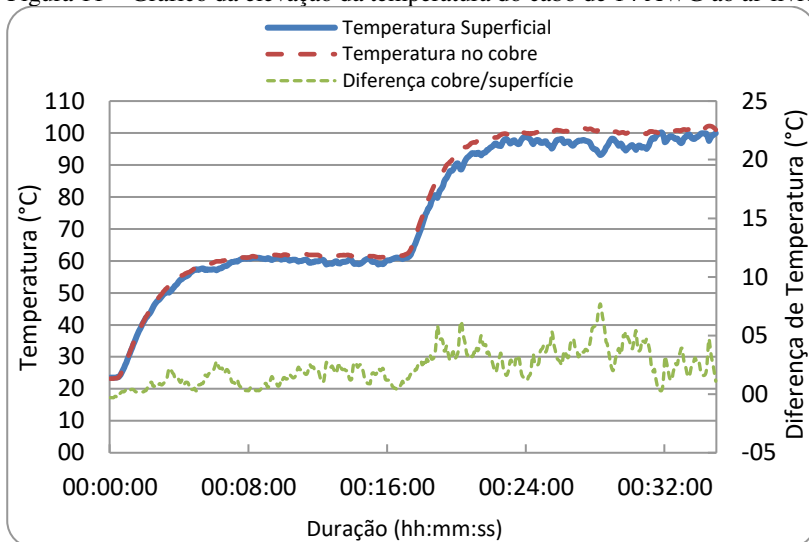
Os resultados obtidos serão apresentados a seguir. Nos gráficos apresentados na Figura 10, Figura 11 e Figura 12, tem-se a evolução da temperatura no cobre e na superfície do isolante dos cabos elétricos ao longo do ensaio, bem como a diferença entre essas duas temperaturas.

Figura 10 – Gráfico da elevação da temperatura do cabo de 20 AWG ao ar-livre.



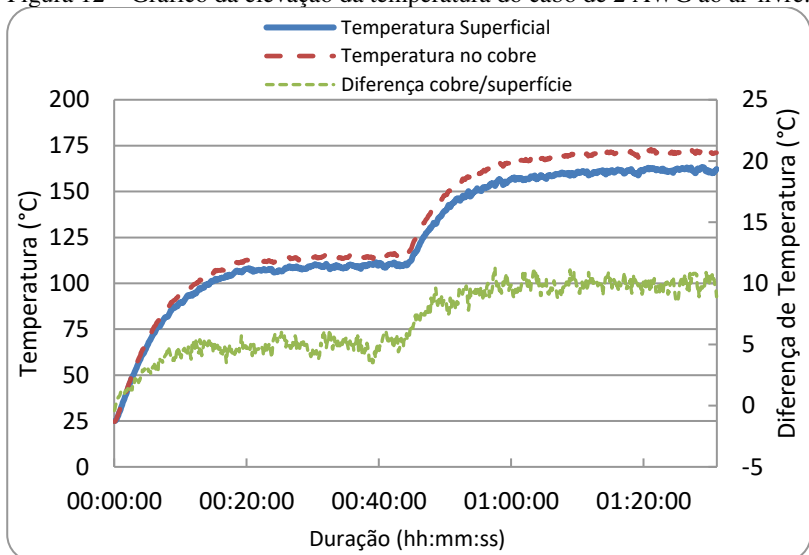
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 11 – Gráfico da elevação da temperatura do cabo de 14 AWG ao ar-livre.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 12 – Gráfico da elevação da temperatura do cabo de 2 AWG ao ar-livre.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

É apresentado no Quadro 3 as temperaturas máximas obtidas no primeiro e no segundo degrau de corrente, tanto para o sensor no condutor quanto para o sensor na superfície da isolamento. Também é apresentada a diferença máxima obtida entre essas temperaturas.

Quadro 3 – Resumo das temperaturas máximas obtidas no ensaio ao ar-livre.

Bitola	Temperatura no condutor (°C)		Temperatura na superfície (°C)		Diferença de temperatura (°C)	
	1° Degrau	2° Degrau	1° Degrau	2° Degrau	1° Degrau	2° Degrau
20 AWG	60,7	90,6	55,9	85,9	5,8	7,0
14 AWG	62,1	102,2	61,1	100,2	2,8	7,7
2 AWG	116,5	173,2	111,5	163,3	6,2	11,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

É importante salientar que a fonte de corrente nada mais é do que uma fonte de tensão baixíssima (de 1 a 2V) que entrega uma elevada potência. A variável que se tinha acesso para realizar o controle era a tensão da fonte. Conforme o decorrer do ensaio, devido a propriedade dos condutores de aumentarem sua resistência com o aumento da temperatura, que acontecia devido a corrente elétrica, a tensão precisava ser aumentada para manter a corrente constante. Isso foi feito manualmente, o que, juntamente com o fato das oscilações presentes na rede, fez com que a corrente não se mantivesse perfeitamente constante durante o ensaio. Ainda assim, como visto através dos gráficos apresentados, isso não influenciou de forma significativa no comportamento das temperaturas.

Através dos resultados apresentados, pode-se perceber que ao ser aplicado o primeiro degrau de corrente, que é o sugerido em catálogo pelos fabricantes, o condutor apresentou temperatura bastante abaixo do limite da isolamento em todos os casos. Isso confirma a possibilidade de se otimizar o dimensionamento ao se ter conhecimento da forma de instalação e de modelagem matemática adequada, bem como verificação experimental. Ainda assim, os valores experimentais da temperatura no condutor, utilizando a corrente calculada conforme o roteiro de cálculos apresentado pela NBR-11301, ficaram consideravelmente abaixo do esperado. A comparação é apresentada na Tabela 4. Principalmente para os cabos de EPR, onde a temperatura esperada seria de 125°C, o erro encontrado foi bastante grande. Como eram cabos de bitolas menores, a

dificuldade na fixação dos sensores e uma maior susceptibilidade a fluxos de ar podem ter atrapalhado na aquisição de valores precisos. O mesmo acontece ao analisar-se as diferenças de temperatura entre o condutor e a isolação, onde o efeito de aumentar a diferença conforme aumenta-se a corrente fica bastante claro apenas para o cabo de 2 AWG, onde a fixação dos sensores é mais simples devido a maior área de contato.

Tabela 4 – Comparação entre os resultados experimentais e teóricos do ensaio ao ar-livre.

Bitola	Temperatura teórica	Temperatura experimental	Diferença
20 AWG	125 °C	90,6 °C	27,52 %
14 AWG	125 °C	103,8 °C	16,96 %
2 AWG	180 °C	173,2 °C	3,78 %

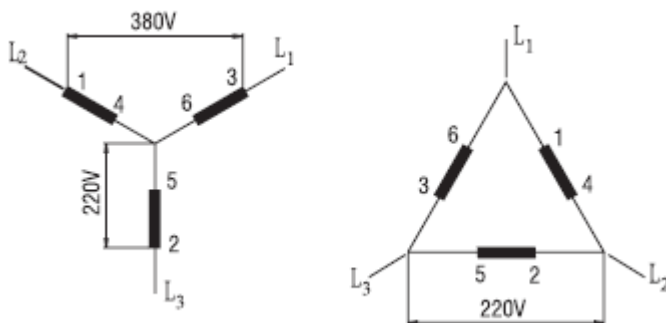
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Ainda assim, de maneira geral, os resultados obtidos e apresentados nessa seção foram bastante satisfatórios. Obteve-se uma noção de que é possível otimizar o dimensionamento de cabos elétricos e que a NBR-11301 é uma boa ferramenta para isso, desde que as considerações adequadas sejam feitas.

4 CABOS ELÉTRICOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Os cabos elétricos isolados que foram estudados tem como possível aplicação fazer parte do sistema de isolamento de um motor elétrico, conforme explanado na seção 2.3.2. O número de cabos elétricos utilizados e sua forma de conexão varia de acordo com o projeto do motor elétrico, visto que devem realizar uma conexão trifásica entre as bobinas do motor para que se tenha o funcionamento adequado. Tem-se na Figura 13 uma ilustração de um exemplo de duas possíveis ligações das bobinas: estrela (Y, ligação da esquerda) ou triângulo (Δ , ligação da direita).

Figura 13 – Ilustração de uma ligação estrela e ligação triângulo de um MIT.



Fonte: WEG (2017).

Nesta ilustração, os retângulos representam as bobinas do motor de indução trifásico. As extremidades das bobinas são numeradas de 1 a 6 e L_1 , L_2 e L_3 representam a linha trifásica que alimenta o motor. Os valores de tensão apresentados são ilustrativos, mas servem para mostrar o conceito de que um mesmo motor pode ser projetado para funcionar com os dois tipos de ligação. Para isso, o usuário da máquina deve conectar os extremos das bobinas de maneira adequada, conforme ilustrado. Essas ligações são feitas através dos cabos de ligação, que são soldados nas extremidades das bobinas e levados até a caixa de ligação da máquina. Nesses casos, o motor de indução trifásico possui seis cabos de ligação.

Existem motores projetados para apenas um tipo de ligação trifásica, seja triângulo ou estrela. Usualmente, a ligação das bobinas é feita internamente, e apenas três cabos de ligação estão disponíveis para o usuário apenas realizar a conexão. Existem ainda motores com outros tipos de ligação trifásicas, como triângulo paralelo, triângulo série, estrela

paralela, estrela série. Nessas ligações, as bobinas são divididas em duas partes, fazendo com que possuam doze extremidades e, por vezes, doze cabos de ligação.

Com relação a definição da seção transversal dos cabos de ligação, pode-se analisar a equação da capacidade de condução de corrente de cabos isolados apresentada pela NBR-11301 e simplificada para as características construtivas dos cabos que são utilizados, rerepresentada aqui como Equação 13:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R_{ca} \times (T_1 + T_4)}} \quad (13)$$

A resistência elétrica do condutor em corrente alternada (R_{ca}) e a resistência térmica do isolamento (T_1) são valores fáceis de serem obtidos e calculados, conforme exposto na seção anterior. Para a aplicação em motores elétricos, nada muda em relação a como obter estas variáveis e, portanto, seus valores serão iguais aos valores ao ar-livre se a temperatura de operação do condutor for a mesma. Porém, a diferença de temperatura entre o condutor e o ambiente e a resistência térmica externa não são simples de se definir.

No caso da variável ($\Delta\theta$), a temperatura do condutor pode ser considerada como a mesma que foi considerado para o ar-livre: 125°C para isolação de EPR e 180°C para isolação de silicone, desde que as máquinas em que estão sendo utilizados sejam de classes térmicas adequadas (B/F para o EPR e H para o silicone). Já a definição da temperatura ambiente pode ser considerada complexa. Conforme a NBR 17094-1 (ABNT, 2013), o motor deve ser projetado para entregar potência nominal com seu meio refrigerante (na maioria dos casos e no caso estudado, o ar ambiente) com temperatura de até 40°C, sem apresentar sobreaquecimento. Mas o ambiente em que o cabo está instalado é o interior do motor, saindo da cabeça de bobina e indo até a caixa de ligação. Definir a temperatura ambiente como sendo 40°C pode não ser adequado, visto que o motor possui geração de calor interna que eleva esta temperatura, fato que será mostrado nos experimentos abordados neste trabalho.

Para definir a resistência térmica externa para o caso de instalação ao ar-livre (T_4), fez-se uso de coeficientes apresentados na NBR-11301, que variam conforme as condições de instalação do cabo. Porém, não se encontra na norma coeficientes para a aplicação específica em máquinas elétricas. Um ambiente complexo como o interior do motor, em especial a cabeça de bobina, é bastante difícil de se descrever através de uma resistência térmica (NOVAIS et al., 2014). Além disso, o mesmo cabo

está submetido a ambientes com características diferentes, como a cabeça de bobina, onde há geração de calor por parte das bobinas e turbulência no ar interno por parte das aletas do rotor (MICALLEF, 2006), e a caixa de ligação, ambiente mais próximo de uma instalação ao ar-livre, mas que varia muito de acordo com a forma de alimentação do motor.

Para uma indústria, é inviável realizar cálculos de tamanha complexidade para a otimização dos cabos de ligação de cada motor fabricado. Por isso, neste trabalho buscou-se obter dados experimentais que comparem a aplicação de instalação ao ar-livre, mais fácil de modelar e que foi validada experimentalmente, com a aplicação no interior dos motores elétricos, com o intuito de gerar informações no que diz respeito ao comportamento térmico dos cabos de ligação. Para isso, desenvolveu-se experimentos que serão descritos na seção seguinte.

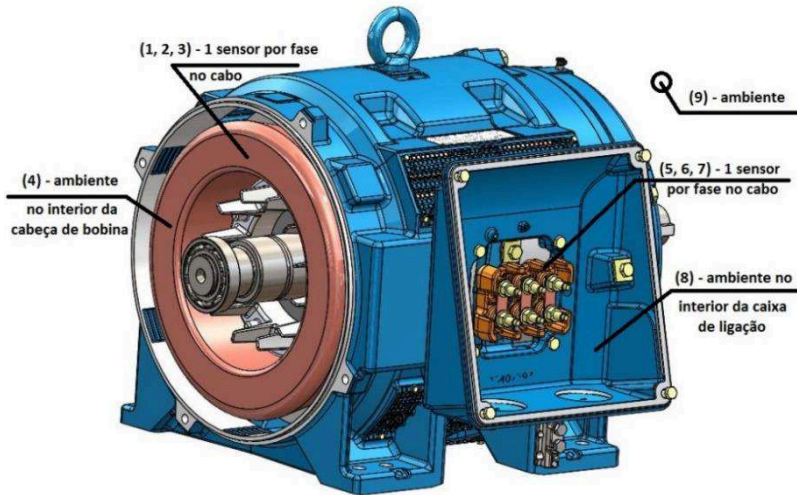
4.1 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DOS CABOS DE LIGAÇÃO

Para realizar uma avaliação do ponto de vista térmico dos cabos de ligação na aplicação em motores elétricos de indução trifásicos, e possibilitar a comparação com os experimentos realizados ao ar-livre, foi realizado um experimento com três máquinas elétricas de potência e tamanhos de carcaça diferentes. O princípio do experimento foi monitorar a temperatura em pontos internos do motor através de sensores do tipo pt-100 com a configuração a três fios, mesma forma utilizada nos experimentos nos cabos ao ar-livre. Foram utilizados como base um total de nove sensores, dispostos e numerados conforme:

- **1, 2 e 3:** um sensor por fase na superfície do cabo de ligação após o ponto de solda com os enrolamentos na cabeça de bobina;
- **4:** um sensor instalado entre a carcaça e a cabeça de bobina, para mensurar a temperatura do ar no ambiente em que os cabos estão instalados;
- **5, 6 e 7:** um sensor por fase na superfície do cabo de ligação próximos aos terminais de conexão na caixa de ligação;
- **8:** um sensor instalado no interior da caixa de ligação para mensurar a temperatura do ar no ambiente em que os cabos estão instalados;
- **9:** um sensor instalado externamente ao motor, para monitorar a temperatura ambiente.

Para uma melhor clareza com relação a instalação dos sensores, apresenta-se a Figura 14.

Figura 14 – Localização dos sensores térmicos no motor elétrico.



Fonte: Cortesia WEG, adaptado pelo autor (2018).

Para não correr o risco de danificar o sistema de isolamento dos motores elétricos, os sensores instalados nos cabos, como descrito, foram dispostos na superfície de sua isolação, e não no condutor. Porém, como tem-se a noção da pequena diferença entre a temperatura da superfície do isolante e a temperatura do condutor, isso não impedirá de obter-se conclusões sobre o tema.

Visto que a definição da capacidade de condução de corrente dos cabos de ligação é um problema de natureza térmica, após o sensoriamento dos motores eles foram submetidos a um ensaio de elevação de temperatura. Segundo a NBR 17094-3 (ABNT, 2018), os ensaios de elevação de temperatura são realizados para determinar a temperatura de certas partes do motor acima da temperatura ambiente, quando funcionam sob uma condição de carga pré-determinada. O motor deve operar até entrar em equilíbrio térmico, definido pela NBR 17094-1 como o estado alcançado quando as elevações de temperatura das diversas partes das máquinas não variam mais que 2 K/h. Um dos resultados deste procedimento é a elevação de temperatura da bobina (popularmente chamada de ΔT), obtida através do método da variação de resistência descrito na NBR 17094-3. A realização de um ensaio deste tipo atende o objetivo deste trabalho, pois submete os cabos de ligação a uma condição desejada para análise de sua temperatura.

Para realizar esses experimentos, contou-se com as bancadas dos laboratórios elétricos, os procedimentos e os laboratoristas da WEG Divisão Motores. A foto de uma das bancadas utilizadas pode ser vista na Figura 15.

Figura 15 – Bancada utilizada para o procedimento experimental nos MIT.



Fonte: Feita pelo autor (2018).

As bancadas e os procedimentos são feitos de forma com que os resultados obtidos sejam bastante precisos. Sendo assim, o foco deste trabalho se dará nos valores registrados de temperatura através dos sensores térmicos instalados, e não no procedimento experimental de um ensaio de elevação de temperatura.

Para fazer a aquisição dos dados de temperatura desejados, foram utilizados motores elétricos que possuem a possibilidade de conduzir um valor de corrente por seus cabos de ligação iguais ou superiores aos que foram submetidos os cabos elétricos ao ar-livre. Em geral, os motores com essas características possuem os cabos de ligação com uma seção transversal maior do que os que foram ensaiados ao ar-livre. Por isso, foram adaptados no processo de fabricação, tendo seus cabos de ligação substituídos por cabos de seção adequada ao objetivo. Isso foi possível através do apoio da WEG Equipamentos Elétricos S.A., que forneceu os

motores em que este trabalho foi desenvolvido. Os dados técnicos relevantes dos motores, numerados de 1 a 3, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados e características nominais dos motores ensaiados.

Motor	1	2	3
Tensão	220/380 V	380/660 V	460 V
Corrente nominal	37,2/21,5 A	57,4/33,1 A	289 A
Número de polos	04	04	04
Ligação	Δ/Y	Δ/Y	Δ
Enclausuramento	TEFC	TEFC	ODP (aberto)
Classe de isolamento	F	F	F
Carcaça	132	200	444/5
ΔT	80 K	80 K	80 K
Bitola dos cabos	12 AWG	10 AWG	50 mm ²
Quantidade de cabos	6	6	6

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

O Motor 1 teve a fabricação alterada para que seus cabos de ligação fossem, inicialmente, de bitola 20 AWG, a mesma bitola ensaiada ao ar-livre. Seus cabos foram conectados com a ligação estrela. Por isso, além dos sensores térmicos mostrados na Figura 14, foi adicionado um pt-100 junto ao ponto de curto-circuito da conexão Y. Como calculado anteriormente, quando há um agrupamento de três cabos, a capacidade de condução de corrente diminui sensivelmente, o que se traduz em um aumento de temperatura para uma mesma corrente, fato que buscou-se verificar experimentalmente. Feito a ligação, os cabos foram alimentados externamente e isolados, sendo dispostos na caixa de ligação que foi fechada. O sensor conectado no ponto Y e a caixa de ligação ainda aberta podem ser vistos na Figura 16.

Figura 16 – Sensor do ponto Y e caixa de ligação do Motor 1.



Fonte: Feita pelo autor (2018).

Tendo sido feita a alimentação, com todos os sensores instalados e conectados a um registrador de temperaturas, o motor foi submetido ao ensaio de elevação de temperatura com carga estabelecida pelo dinamômetro da bancada de forma a circular sobre os cabos de ligação do motor as correntes ensaiadas ao ar-livre: primeira condição com 16,5 A e segunda condição com 22,1 A. Após o ensaio, o motor voltou para a área de recuperação da indústria para trocar os cabos de ligação pelos originalmente projetados, e o ensaio foi repetido. Isso foi feito para avaliar o estado de otimização do projeto atual e obter um outro parâmetro de comparação para a condição proposta. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados das temperaturas obtidas no Motor 1.

Bitola	20 AWG		12 AWG	
	16,5	22,1	16,5	22,1
Corrente (A)	16,5	22,1	16,5	22,1
Temperatura Ambiente (°C)	26,6	26,6	25	26,4
ΔT Bobina (K)	42	64.1+	44.6	78.8
Cabo bobina 1 (°C)	87.2	113.6+	70	107.8
Cabo bobina 2 (°C)	92.5	123.7+	74.3	116.3
Cabo bobina 3 (°C)	79.9	101.5+	71.4	110.9
Cabo terminal 1 (°C)	76.5	110.8+	43.4	58
Cabo terminal 2 (°C)	81.6	122.7+	42.8	55.4
Cabo terminal 3 (°C)	92.4	137.8+	44.4	59.7
Ponto Y (°C)	122.3	202.8+	51.4	72.2
Ar bobina (°C)	68.2	77.8+	69	105.8
Caixa de ligação (°C)	55.5	73.4+	41.6	54.6

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Analisando os resultados obtidos com os cabos de 20 AWG, na condição de carga menor do que a nominal (16,5A), vemos que todos os pontos dos cabos apresentam temperatura superior ao obtido no cabo ao ar-livre. O ponto Y apresenta a temperatura mais alta e próxima ao limite térmico do cabo, o que era esperado, conforme pode-se verificar na Tabela 2, onde o valor da capacidade de condução de corrente para a condição de trifólio é bem próximo ao valor experimentado. Percebe-se que existe bastante diferença de temperatura entre os cabos, indicando que a posição de cada um deles na cabeça de bobina e na caixa de ligação influencia de maneira sensível a troca térmica.

Para a condição com 22,1A de corrente no cabo de 20 AWG, o ensaio de elevação de temperatura foi interrompido antes que se observasse equilíbrio térmico, pois o sensor instalado no ponto Y apresentou uma temperatura bastante superior a classe térmica da máquina, o que mostra a inviabilidade de aplicar este cabo nessas condições.

Com os cabos de 12 AWG, as temperaturas dos ambientes em que os cabos estão instalados ficaram bem próximas das temperaturas superficiais dos cabos. As temperaturas da cabeça de bobina apresentaram o maior valor, indicando que a geração de calor pelos enrolamentos é o fator que mais influencia na condição de projeto. Se considerada uma extrapolação para uma temperatura ambiente de 40°C, verifica-se que a condição de projeto se encontra otimizada, pois seriam obtidas temperaturas próximas ao limite térmico do cabo para condição de instalação sem flexão (150°C).

Para o Motor 2, a mesma ideia foi utilizada para comparar os valores obtidos ao ar-livre com o obtido internamente ao motor elétrico. Para isso, os cabos de ligação foram alterados no processo de fabricação para 14 AWG, a mesma seção transversal utilizada no experimento ao ar-livre. Os cabos de ligação foram conectados em ligação Y. Porém, a conexão é realizada através de uma placa de bornes, fazendo com que os cabos fiquem espaçados na caixa de ligação. Sendo assim, não foi utilizado um sensor extra, como realizado no Motor 1. A caixa de ligação montada e com os sensores conectados é mostrada na Figura 17.

Figura 17 – Caixa de ligação com os sensores conectados do Motor 2.



Fonte: Feita pelo autor (2018).

Após a alimentação e conexão do motor à bancada de testes, a máquina foi submetida a carga de forma a circular pelos cabos de ligação a corrente de 35,1 A, mesmo valor testado nos cabos de ligação ao ar-livre, informado pelo fabricante. O segundo valor de corrente ensaiado ao ar-livre, calculado conforme o roteiro de cálculos da NBR-11301, apresentaria uma sobrecarga muito grande em relação a corrente nominal do motor e, por isso, não foi testado. Assim como o Motor 1, o Motor 2 também passou pela recuperação da indústria para que tivesse seus cabos de ligação colocados como projetados originalmente, com a bitola de 10 AWG. Feito isso, o ensaio foi repetido. Os resultados são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Resultados das temperaturas obtidas no Motor 2.

Bitola	14 AWG	10 AWG
Corrente (A)	35,1	35,1
Temperatura Ambiente (°C)	21,4	22,7
ΔT Bobina (K)	79,3	80,1
Cabo bobina 1 (°C)	106,1	103
Cabo bobina 2 (°C)	110,7	104,4
Cabo bobina 3 (°C)	103,2	93,4
Cabo terminal 1 (°C)	64,1	50,5
Cabo terminal 2 (°C)	60,4	48,9
Cabo terminal 3 (°C)	58,2	51,8
Ar bobina (°C)	81,9	82,9
Caixa de ligação (°C)	50,6	45,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os resultados obtidos com o cabo de 14 AWG mostram que, no que diz respeito a temperatura dos cabos na caixa de ligação, os valores encontram-se bem próximos do experimentado ao ar-livre, já que não há a conexão do ponto Y através de terminais, e sim de uma placa de bornes. Porém, internamente os cabos estão submetidos a uma temperatura superior, devido as perdas geradas pelos enrolamentos. A diferença de temperatura entre o ar do ambiente da cabeça de bobina e a superfície dos cabos ali instalados é menor do que o observado ao ar-livre, o que inviabiliza a utilização da mesma modelagem apenas alterando a temperatura ambiente. Porém, os valores de temperatura obtidos estão abaixo do limite térmico da isolamento, mesmo quando extrapolado para uma temperatura ambiente de 40°C. Isso mostra que os valores calculados através dos dados fornecidos pelos fabricantes possuem potencial de serem utilizados como referência para capacidade de condução de corrente em motores elétricos.

A possibilidade de otimização para carcaças maiores é reiterada quando são observados os resultados obtidos para o cabo encontrado originalmente nos projetos (10 AWG). A elevação de temperatura na bobina, bem como a temperatura do ar encontrada na cabeça de bobina, pouco se altera com relação a condição com o cabo 14 AWG, o que indica que não há impacto no desempenho geral da máquina quando alterado os cabos. Além disso, as temperaturas observadas encontram-se consideravelmente abaixo do limite térmico do material de isolamento do cabo, mostrando a possibilidade de otimização.

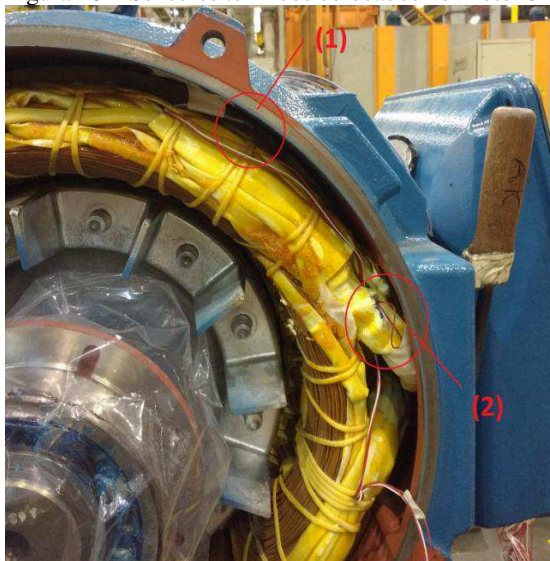
Os experimentos realizados no Motor 3 tiveram o objetivo de avaliar o comportamento térmico dos cabos de ligação em motores conhecido como abertos, ou ODP². Esses motores oferecem um grau de proteção menor, mas por não serem totalmente enclausurados, são mais econômicos e possuem o design mais simples (HAMDI, 1998).

Como indicado na Tabela 5, o motor ensaiado possui cabos de ligação definidos por projeto com a seção transversal de 50 mm², onde, em situação de carga nominal, circulam por eles a corrente de aproximadamente 167 Amperes. Submetido ao fator de serviço, definido pela NBR 17094-1 como o multiplicador em relação a carga nominal que pode ser acionada continuamente sob tensão e frequência nominais com limite de elevação de temperatura do enrolamento e que, para o Motor 3, tem o valor de 1,15, a corrente dos cabos de ligação tem o valor de 192 Amperes. Este motor não teve sua fabricação alterada e, portanto, a primeira condição ensaiada com os sensores de temperatura foi submeter

² *Open, Drif Proof* – aberto, a prova de gotejamento.

o motor a carga nominal e, posteriormente, ao fator de serviço. Na Figura 18, pode-se ver em (1) o sensor colocado para obter a temperatura do ar ambiente da cabeça de bobina, e em (2) estão inseridos dentro dos tubos isolantes os pt-100 em contato com os cabos de ligação.

Figura 18 – Sensores térmicos colocados no Motor 3 na cabeça de bobina.



Fonte: Feito pelo autor (2018).

Os valores de corrente aplicados estão bastante abaixo dos valores utilizados no ensaio ao ar-livre para um cabo de bitola 2 AWG, seção transversal menor do que o fabricado originalmente nos motores. Porém, devido ao método de impregnação dos enrolamentos da máquina, os cabos de ligação não puderam ser completamente substituídos. Para não utilizar um cabo muito inferior aos originais, a segunda etapa de testes foi realizada com os mesmos cabos utilizados ao ar-livre, de 2 AWG, mesmo com valores de corrente inferiores. A substituição parcial dos cabos, realizada com uma conexão soldada, é mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Substituição dos cabos de ligação do Motor 3.



Fonte: Feito pelo autor (2018).

A conexão dos cabos de ligação foi feita através de placa de bornes, da mesma forma do que no Motor 2. Foram realizados ensaios de elevação de temperatura que tiveram as temperaturas dos sensores registradas, onde os resultados são apresentados no Quadro 6:

Quadro 6 – Resultado das temperaturas obtidas no Motor 3.

Bitola	2 AWG		50 mm²	
Corrente (A)	167	192	167	192
Temperatura Ambiente (°C)	21,5	21,1	21,5	21,1
ΔT Bobina (K)	63,3	86,9	63,6	88,6
Cabo bobina 1 (°C)	60,4	72,9	71	88,6
Cabo bobina 2 (°C)	55,3	65,5	56,6	71,4
Cabo bobina 3 (°C)	50,6	59,1	48,4	57,8
Cabo terminal 1 (°C)	59,1	71,2	67,3	83,1
Cabo terminal 2 (°C)	64,2	77,6	61,9	77,5
Cabo terminal 3 (°C)	65,6	80	61,2	75,9
Ar bobina (°C)	35	37,4	34,7	39,1
Caixa de ligação (°C)	45,1	51,6	43,2	50,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os valores de temperatura obtidos neste ensaio indicam que há uma diferença bastante grande no comportamento térmico dos cabos de

ligação entre os diferentes tipos de enclausuramento de motores elétricos. A diminuição da bitola dos cabos de ligação com relação ao encontrado originalmente da máquina causou um efeito inesperado, onde as temperaturas obtidas foram, em geral, um pouco abaixo para a bitola menor (2 AWG). Isso pode ser explicado pelo fato de que, em uma bitola menor, há uma maior distância entre os cabos de ligação, diminuindo o efeito de aumento de temperatura que o agrupamento de cabos gera, e aumentando a eficiência do sistema de troca de calor do motor.

Como os valores de corrente aplicados são bastante inferiores ao que foi ensaiado ao ar-livre, o fato de os valores obtidos serem consideravelmente inferiores ao limite térmico da isolação confirma a modelagem realizada anteriormente. Ainda, pode-se perceber que motores ODP possuem uma capacidade de troca térmica superior aos motores totalmente fechados, pois a diferença de temperatura entre o ambiente e os cabos de ligação vão ao encontro da modelagem de cabos ao ar-livre.

É importante mostrar a capacidade de otimização que foi mostrada com este experimento. A redução da bitola dos cabos de ligação para este caso mostrou-se imprescindível, onde existe a possibilidade de se utilizar um cabo inferior ao 2 AWG. De acordo com a Tabela 3, poderia se utilizar o cabo de 4 AWG, considerando-se o método de instalação equivalente (2), o que se mostra de precisão considerável segundo os resultados obtidos.

5 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresentou um estudo sobre a capacidade de condução de corrente, ou ampacidade, de cabos elétricos isolados, com foco na aplicação em motores de indução trifásicos. Foram analisados os princípios teóricos envolvidos na definição da capacidade de condução de corrente de cabos elétricos, assim como feita uma apresentação dos fatores que influenciam o desempenho térmico de um motor de indução trifásico.

O trabalho trouxe a aplicação do equacionamento proposto na NBR-11301 para a definição da ampacidade de cabos elétricos isolados em condições de instalação ao ar-livre, utilizando como exemplo cabos que são aplicados em motores elétricos. Foram realizados experimentos que validassem os cálculos feitos com base na norma. Também foram desenvolvidos experimentos com os cabos inseridos em sua aplicação em motores de indução trifásicos, avaliando seu comportamento térmico, comparando com a situação de instalação ao ar-livre e verificando a possibilidade de se realizar uma otimização no projeto do dimensionamento dos cabos de ligação.

O desenvolvimento deste TCC permitiu ao autor evoluir pessoal e profissionalmente, devido ao tema não estar diretamente presente na grade curricular do curso de Engenharia Elétrica e ao trabalho possuir um caráter bastante experimental. Para o meio acadêmico, trazer e apresentar problemas relevantes para a indústria torna-se bastante relevante. Além disso, para a WEG Equipamentos Elétricos, o trabalho traz informações que auxiliam na possibilidade de otimização dos projetos das máquinas, avaliando as condições dos cabos de ligação de alguns motores fabricados atualmente.

Os objetivos propostos no começo do trabalho puderam ser atingidos através da metodologia utilizada no desenvolvimento deste TCC. O estudo sobre o tema foi realizado com sucesso, ainda que sejam escassos outros trabalhos que compartilham do mesmo assunto.

Por fim, como sugestão para os trabalhos futuros, pode-se propor o desenvolvimento de um modelo de resistências térmicas que retratem a resistência térmica externa associada ao cabo de ligação em um protótipo de motor elétrico, para que se adapte o equacionamento proposto pela NBR-11301. Propõe-se ainda que sejam realizados cálculos e experimentos para diferentes métodos de instalação presentes na NBR-11301, a fim de compreender e verificar as diferenças no comportamento térmico dos cabos elétricos para diferentes situações.

REFERÊNCIAS

- AGARELLI, Cesar. **Dicas de instalação: Motores Elétricos**. Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/motores-eletricos-e-o-consumo-setorial-de-energia/>> Acesso em: 13 de setembro de 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11301**: Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%) - Procedimento. Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094-1**: Máquinas elétricas girantes – motores de indução. Parte 1: Trifásicos. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094-3**: Máquinas elétricas girantes. Parte 3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5471**: Condutores Elétricos. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60085**: Isolação elétrica – Avaliação e designação térmicas. Rio de Janeiro, 2017.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- COFIBAM – LIDERANÇA EM CABOS VULCANIZADOS. **Catálogo COFIBAM**. Disponível em: <<http://www.cofibam.com.br/pt-br/catalogos-cofibam>> Acesso em: 19 de março de 2018.
- DE LEÓN, F.; SEDAGHAT, A. **Thermal Analysis of Power Cables in Free Air**: Evaluation and Improvement of the IEC Standard Ampacity Calculations, IEE Transactions on power delivery, v. 29, p. 2306-2314, 2014.

ELEFIO. **Cabos lides para motores.** Disponível em:
<<http://www.elefiio.com.br/cabos-lides-motores>> Acesso em: 20 de abril de 2018.

HAMDI, Essam S. **Design of small electrical machines.** Chichester: J. Wiley, 1994. 260 p.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MICALLEF, Christopher. **End winding cooling in electric machines.** 2006. 185 f. Dissertação (doutorado) – University of Nottingham, Nottingham.

NEHER, J. H.; MCGRATH, M. H. **The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems,** AIEE Transactions, Part III, v.76, p. 752–772, 1957.

NOVAIS, A. S.; COMITRA, R. D. F. C.; NOGUEIRA, É. **Análise teórica de desempenho térmico de motores de indução elétrica aletados.** Cadernos UniFOA, Volta Redonda, n° 25, p. 19-34, 2014.

SANTOS, Aristóteles Paulinele Medeiros dos. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO NA PARTIDA E OPERAÇÃO DOS MOTORES DE INDUÇÃO, UTILIZANDO O ATPDraw.** 2016. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica de Pernambuco, Recife.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Motores Elétricos – Guia de Especificação.** Santa Catarina. Grupo WEG – Unidade Motores. 2017