

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARCOS VINÍCIUS RODRIGUES LOPES GRANADO

**TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO ROTOR EM MÁQUINAS
ELÉTRICAS GIRANTES**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARCOS VINÍCIUS RODRIGUES LOPES GRANADO

**TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO ROTOR EM MÁQUINAS
ELÉTRICAS GIRANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista.

Prof. Orientador: Sérgio Luciano Ávila, Dr. Eng.

Prof. Coorientador: Cesar Alberto Penz, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Vinicius Rodrigues Lopes Granado, Marcos
Técnicas de medição de temperatura do rotor em máquinas elétricas girantes / Marcos Vinicius Rodrigues Lopes Granado
; orientação de Sérgio Luciano Ávila; coorientação
de Cesar Alberto Penz. - Florianópolis, SC,
2018.

60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. **Medição de temperatura.** 2. **Máquinas elétricas girantes.** 3. **Sensoriamento.** 4. **Manutenção preditiva.** I. **Luciano Ávila, Sérgio.** II. **Alberto Penz, Cesar.** III. **Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.** IV. **Título.**

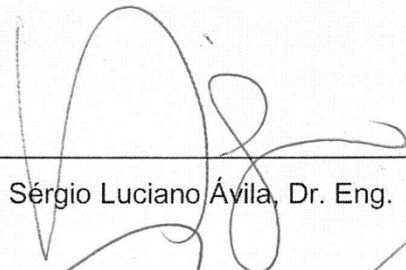
**TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO ROTOR EM MÁQUINAS
ELÉTRICAS GIRANTES**

MARCOS VINÍCIUS RODRIGUES LOPES GRANADO

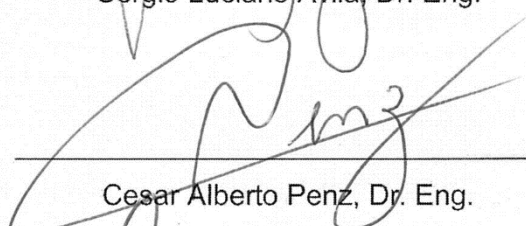
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 07 de dezembro, 2018.

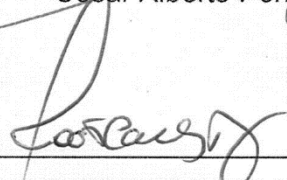
Banca Examinadora:



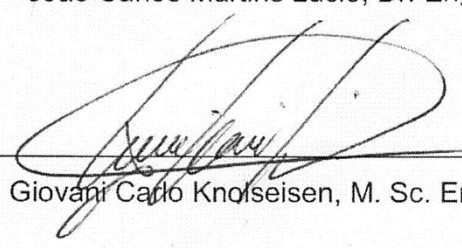
Sérgio Luciano Ávila, Dr. Eng.



Cesar Alberto Penz, Dr. Eng.



João Carlos Martins Lúcio, Dr. Eng.



Giovani Carlo Knolseisen, M. Sc. Eng.

Aos meus pais, Marlene e Nilson, aos meus irmãos, Malu e Joshua, que são a razão para eu ter alcançado mais esse objetivo.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a minha mãe Marlene, pelo amor incondicional, pela preocupação e apoio aos meus estudos. Ao meu pai Nilson (in memorian), pela sua dedicação a nossa família, pelo carinho e amor que sempre teve por todos nós, pela pessoa e pai maravilhoso que sempre foi. Este trabalho é inteiramente dedicado à vocês!

Aos meus irmãos, Malu e Joshua, pelo carinho e paciência que sempre tiveram, pelos momentos de descontração. Ao nosso cachorro Murphy (in memorian), pelos nossos passeios nos finais de semana, vai deixar saudades. Essa conquista é por vocês!

A uma amiga muito querida, Marilene, provável que se não fosse por ela, minha vida poderia ter tomado um rumo diferente, obrigado pelas conversas, ensinamentos, pelo carinho.

A minha amiga Camila, uma irmã que a engenharia me trouxe, obrigado pelo carinho, atenção, dedicação, as nossas longas jornadas estudando. Só tenho a agradecer!

Ao meu amigo Jonas, obrigado pelos momentos de descontração na sala de pesquisa, aos cafés, as conversas de bar. Com certeza serão para sempre lembradas.

Ao meu professor da engenharia e orientador, Sérgio, obrigado pelo convite para fazer parte do grupo de pesquisa, PECCE, obrigado pelas orientações, conselhos e as oportunidades a mim oferecidas.

Ao meu professor da engenharia e coorientador, Cesar, obrigado pelas orientações, conselhos e ensinamentos.

Ao IFSC, por fazer parte por dez anos da minha vida e me proporcionar oportunidades únicas.

Ao edital FAPESC número 05/2017, no qual pude desenvolver este trabalho.

A Automatic, pela oportunidade de trabalhar em um projeto aplicado e pela experiência que isso me trouxe.

Aos demais amigos, colegas, professores que de alguma forma fizeram parte da minha caminhada e sempre serão lembrados.

Your have power over your mind, not outside events. Realise this, and you'll find strength.

RESUMO

Proposto pela empresa parceira Automatic Indústria e Comércio de Equipamentos Elétricos Ltda, este trabalho é parte de projeto de pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica intitulado “desenvolvimento tecnológico para o monitoramento da temperatura de rotores de máquinas elétricas rotativas”. Ele é fomentado pela empresa parceira, pela Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Estado de Santa Catarina (FAPESC) e pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Campus Florianópolis. O objetivo é conhecer métodos e tecnologias aplicadas à medição de temperatura em rotores de máquinas elétricas girantes. Para alcançar este objetivo, primeiro é realizado um estudo sobre técnicas de medição de temperatura em máquinas elétricas rotativas, baseado em documentos normativos, artigos científicos e patentes. Com base nos estudos teóricos, é realizada uma busca comercial de sensores passivos e sistemas de aquisição. Posteriormente, a partir das condições de contorno apresentadas pela empresa Automatic, são definidos quais sistemas serão utilizados para atender as suas demandas técnicas.

Palavras-chave: Medição de temperatura. Rotor. Máquinas elétricas rotativas. Sensoriamento. Manutenção preditiva.

ABSTRACT

This work is part of a research, development and technological innovation project titled "Technological development for the monitoring of the temperature of rotors of rotating electrical machines", proposed by the partner company Automatic Indústria e Comércio de Equipamentos Elétricos Ltda. It is fostered by the partner company, the Foundation for Research and Innovation Support of the State of Santa Catarina (FAPESC) and the Federal Institute of Education, Science and Technology of Santa Catarina (IFSC), Campus Florianópolis. The objective is to know methods and technologies applied to temperature measurement in rotors of rotating electrical machines. In order to achieve this objective, a study on temperature measurement techniques in rotary electric machines, based on normative documents, scientific articles and patents, is first carried out. Based on the theoretical studies, a commercial search for passive sensors and acquisition systems is carried out. Subsequently, from the boundary conditions presented by the company Automatic, they are defined which systems will be used to meet their technical demands..

Keywords: temperature measurement. Rotor. Rotating electrical machines. Sensing. Predictive maintenance..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista explodida de um motor de indução.	18
Figura 2 - Instrumentação utilizada para medição de temperatura do rotor.	28
Figura 3 - Instalação do sistema de aquisição.	28
Figura 4 - Motor de indução com rotor de gaiola de esquilo.	29
Figura 5 - Motor síncrono com rotor de imã permanente.	29
Figura 6 - Circuito para medição da temperatura do rotor (em cima) e do estator (em baixo).....	30
Figura 7 - Circuito do rotor.....	30
Figura 8 - Sensor localizado na superfície interna do estator	31
Figura 9 - Sensor localizado na superfície externa do rotor	31
Figura 10 - Sistema de medição.....	31
Figura 11 - Sensor tag implementada.	32
Figura 12 - Antenas acopladas ao motor.	33
Figura 13 - Desenho esquemático apresentando os principais componentes de um sensor SAW.....	34
Figura 14 - Instalação do sensor no rotor do motor.	35
Figura 15 - Aparato experimental para realização dos testes.	35
Figura 16 - Conjunto completo do gerador.....	44
Figura 17 - Vista em perspectiva da cabeça de bobina para instalação do sensor...	45
Figura 18 - Detalhe do orifício feito para alocar o sensor.....	45
Figura 19 - Vista frontal do orifício.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Documentos normativos utilizados para padronização dos procedimentos de medição de temperatura em máquinas elétricas girantes.....	22
Tabela 2 - Informações técnicas dos sensores	47
Tabela 3- Informação da aplicação dos sensores	48
Tabela 4- Informação sobre a comunicação do leitor.....	48
Tabela 5-Preços dos sensores de temperatura.....	49
Tabela 6-Preço dos leitores.....	49
Tabela 7-Preço dos kits de medição de temperatura	49
Tabela 8 - Comparativo entre as opções de sistemas elencados para utilização no projeto.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

FAPESC - Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Estado de Santa Catarina

IEC - Comissão Eletrotécnica Internacional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES	17
2.1.1	Aspectos Construtivos	17
2.1.2	Princípio de Funcionamento	19
2.2	PERDAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES	19
2.3	INFLUÊNCIA DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS	20
2.4	ESTADO DA ARTE E DA TÉCNICA DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM ROTORES DE MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES	21
2.4.1	Documentos normativos	21
2.4.2	Documentos acadêmicos	25
2.4.3	Patentes	36
3	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA A MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO ROTOR EM MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES	41
3.1	PROSPECÇÃO DE SOLUÇÕES SIMILARES	46
3.2	DEFINIÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO	50
3.3	RECOMENDAÇÕES FINAIS	52
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52

1 INTRODUÇÃO

Máquinas elétricas girantes representam grande parte das cargas em plantas industriais. Manter a disponibilidade das máquinas e equipamentos e estender ao máximo a sua vida útil é imprescindível para garantir o retorno de investimentos e a lucratividade do negócio. Nesse contexto está a Engenharia de Manutenção, área de conhecimento que tem como principal ação técnica o monitoramento de parâmetros para inferir a saúde dos sistemas de conversão eletromecânica de energia.

Há três abordagens na área de manutenção, são elas: preventiva, corretiva e preditiva. A manutenção preventiva é uma prática planejada, tendo caráter de prevenir que as máquinas possam vir a falhar, baseando suas ações em correções de rotina e assim mantendo a máquina em bom estado (SLACK et al, 1999).

A manutenção corretiva, de caráter não planejado, é aplicada somente em situações na qual a máquina sofre uma falha por falta de manutenção preventiva ou fadiga e é obrigada a ser desligada para receber os devidos reparos. Por sua vez, a manutenção preditiva é uma prática que se baseia no acompanhamento do comportamento da máquina, pautando-se em dados adquiridos ao longo da sua vida útil para indicar a sua real condição, de forma a realizar um diagnóstico de falha ou até mesmo indicar o momento ideal para realizar a manutenção preventiva na mesma (SLACK et al, 1999).

O monitoramento das máquinas elétricas girantes é um foco recorrente no setor. O objetivo é implementar as políticas de manutenção preditiva de modo a dar apoio as atividades preventivas periódicas ou mesmo corretivas.

Por apresentarem um elemento girante, esses equipamentos sofrem com algumas falhas corriqueiras provenientes, por exemplo, de vibração nos mancais, da elevação temperatura, da falta de lubrificação, da falha de isolamento. Estes problemas podem acarretar na diminuição do rendimento da máquina, prejudicando além da própria máquina, todo o sistema onde ela está inserida.

Algumas destas falhas, são causadas pela elevação de temperatura, dessa forma, a aplicação de um método para medição de temperatura no rotor de motores e geradores impacta positivamente na antecipação de problemas. Os principais benefícios são: redução na frequência de paradas programadas (para inspeção, manutenção e reparo); redução na frequência de paradas forçadas; redução da

alocação homem-hora de manutenção; aumento da eficiência operativa da unidade; e redução do estoque de peças sobressalentes.

Estas vantagens são relevantes para garantir a disponibilidade do ativo, reduzir custos de manutenção, otimizar a rentabilidade e antecipar o retorno de investimento. Estes fatores são críticos para uma eficiente gestão dos ativos dos agentes de geração/produção do país. Em uma abordagem mais ampla, o aumento da disponibilidade dos motores e geradores pela monitoração e diagnóstico de funcionamento contribui também para os contextos sociais. Maior disponibilidade e confiabilidade dos ativos de geração e do setor produtivo significa garantir a disponibilidade e estabilidade do próprio sistema elétrico interligado, evitando cortes de energia elétrica e paradas de produção, o que, em última instância, beneficia a sociedade.

Proposto pela empresa Automatic Indústria e Comércio de Equipamentos Elétricos Ltda, este trabalho é parte de projeto de pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica, intitulado “Desenvolvimento Tecnológico para o Monitoramento da Temperatura de Rotores de Máquinas Elétricas Rotativas”. Fomentado pela empresa parceira, pela Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Estado de Santa Catarina (FAPESC), através da chamada pública 05/2017, e pelo Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Campus Florianópolis.

1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo sobre as tecnologias existentes referentes à medição de temperatura em rotores de máquinas elétricas girantes e propor possíveis soluções para a demanda da indústria.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Identificar o estado da arte e da técnica sobre medição de temperatura em máquinas elétricas girantes;
- b) Propor um comparativo técnico e comercial sobre as tecnologias existentes para esta aplicação;

c) Especificar sensores e sistemas disponíveis no mercado para monitoramento de temperatura em máquinas elétricas girantes.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

O capítulo 2 contém a fundamentação teórica. Na seção 2.1 são abordados os aspectos construtivos e o princípio de funcionamento de máquinas elétricas girantes. Na seção 2.2 são dispostos os tipos de perdas em máquinas elétricas e suas consequências para seu funcionamento. Com base nos conceitos apresentados na seção anterior, a seção 2.3 detalhada os efeitos da elevação da temperatura em máquinas elétricas.

A seção 2.4 apresenta diversas técnicas e tecnologias para realizar medição de temperatura em máquinas elétricas. Essa seção é subdivida em três frentes principais: documentos normativos, documentos acadêmicos e patentes. Nesta etapa são descritos as principais tecnologias e técnicas utilizadas para a medição de temperatura em máquinas elétricas.

No capítulo 3 encontram-se as especificações de projeto. Nessa seção estão dispostos os requisitos técnicos que o sistema deve abranger conforme solicitação da empresa parceira.

Na seção 3.1, prospecção de soluções similares, são apresentados os resultados da busca comercial de sensores e sistemas para serem utilizados no projeto.

A seção 3.2 apresenta as definições de projeto discutidas ao longo do período de projeto entre a empresa e o grupo de pesquisa.

O capítulo 4 apresenta as principais considerações obtidas ao final deste trabalho e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Máquinas elétricas girantes são elementos encontrados em grande quantidade no setor industrial, sendo responsáveis por grande parte do consumo de energia elétrica. Desse modo, espera-se que essas máquinas possuam alta eficiência no processo de conversão eletromecânica de energia.

No entanto, muitos fatores como, por exemplo, a vibração nos mancais, a elevação da temperatura, a falta de lubrificação e a falha de isolamento podem afetar diretamente na diminuição do rendimento da máquina (FITZGERALD A. E., 2014). Esses fatores ocasionam um aumento no montante de energia elétrica demandada e, por consequência, a diminuição dos indicadores de eficiência.

Uma maneira para avaliar o estado de máquinas elétricas é verificar o perfil térmico no seu interior. A elevação de temperatura nos enrolamentos do rotor e estator e em outras partes da máquina pode trazer uma série de prejuízos.

É de responsabilidade da equipe de manutenção avaliar as condições de operação da máquina visando garantir a continuidade do serviço. Para isso, técnicas de monitoramento de temperatura devem ser utilizadas a fim de obter um diagnóstico preciso da máquina.

Esse capítulo apresenta uma definição de máquinas elétricas girantes. Posteriormente, é realizada uma análise das perdas típicas desses equipamentos. Na seção seguinte são detalhadas a influência da temperatura em máquinas elétricas. Por último, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre técnicas e metodologias para realizar medição de temperatura do rotor e estator em máquinas elétricas.

2.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES

2.1.1 Aspectos Construtivos

As máquinas elétricas rotativas são constituídas basicamente de duas partes principais: uma parte estática, chamado de estator e uma parte girante, chamado de rotor. Tipicamente, o estator e o rotor são separados por uma distância, o entreferro, entre 0,4 mm e 4 mm dependendo da potência da máquina (DEL TORO, 2011).

O estator é formado internamente por chapas de material ferromagnético. A superfície interna apresenta ranhuras para acomodar os enrolamentos, podendo estes

serem monofásicos, bifásicos, trifásicos ou polifásicos. As bobinas são condicionadas a fim de proporcionar um defasamento angular espacial. O rotor é também formado de chapas de material ferromagnético com ranhuras, podendo ser bobinado ou gaiola de esquilo. A Figura 1 apresenta a vista explodida de um motor de indução trifásico com rotor de gaiola de esquilo, uma das máquinas elétricas girantes mais utilizadas na indústria.

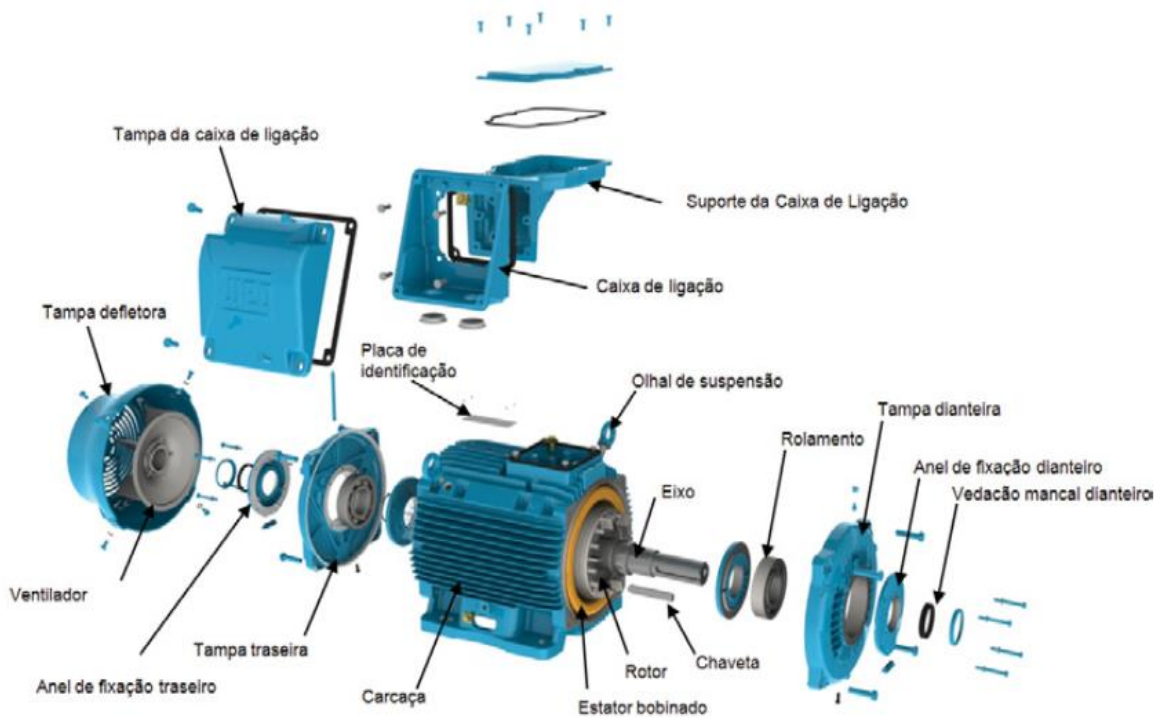


Figura 1 - Vista explodida de um motor de indução Fonte: Weg (2016).

2.1.2 Princípio de Funcionamento

Resumidamente, o princípio de funcionamento de uma máquina elétrica girante é: ao ser aplicada uma tensão alternada aos terminais do enrolamento do estator, um campo eletromagnético girante é criado. A medida que o campo girante percorre os circuitos do rotor, ocorre o surgimento de uma corrente elétrica induzida nos enrolamentos do rotor, e por consequência, um campo induzido com polaridade contrária ao original. O campo induzido no rotor interage com o campo girante original produzindo um torque. Isto acontece devido as suas diferentes polaridades. Como a parte mecânica da máquina permite, acontece o movimento rotativo do rotor (FITZGERALD A. E., 2014)

. Grosso modo, para um gerador o processo é inverso. Aplica-se um torque e uma corrente no rotor. Por consequência, aparecerá uma tensão induzida nos terminais do estator. Todo este processo pode ser chamado de conversão eletromecânica de energia (FITZGERALD A. E., 2014)

2.2 PERDAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES

No processo de conversão eletromecânica de energia ocorrem perdas. Essas, por sua vez, implicam diretamente no rendimento da máquina. Segundo (FITZGERALD A. E., 2014), são basicamente três tipos de perdas:

- efeito Joule nos enrolamentos, acarretando em um aumento da temperatura dos enrolamentos e conseqüentemente deterioração do isolamento;
- mecânicas, caracterizadas por atrito, e em geral são percebidas nos mancais, escovas e ventilação;
- e perdas por histerese magnética e correntes parasitas, proveniente da magnetização dos materiais ferromagnéticos, ocasionando no aquecimento do material ferromagnético da máquina.

As perdas estão diretamente ligadas ao rendimento da máquina, parâmetro expresso pela razão entre a potência de saída e a potência de entrada. Quanto mais alto o valor do rendimento, mais eficiente é a máquina no que diz respeito à conversão de energia. O rendimento das máquinas girantes usualmente é elevado quando elas operam a plena carga. Por exemplo, motores de 1 a 10 kW apresentam rendimento

médio entre 80 % e 90 %, passando por 90 % a 97 % em motores de até algumas centenas de kW (FITZGERALD A. E., 2014).

2.3 INFLUÊNCIA DA ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

A potência nominal das máquinas elétricas girantes é determinada por características mecânicas e térmicas. Por exemplo, a corrente máxima de enrolamento é determinada pela máxima temperatura de funcionamento que o isolamento pode suportar sem sofrer danos ou diminuição excessiva da vida útil (FITZGERALD A. E., 2014). Portanto, a elevação de temperatura que resulta nas perdas citadas na sessão anterior, é um fator importante na especificação da potência de uma máquina.

Conforme a classe de isolamento da máquina, há um limite de temperatura especificado no qual esta pode atingir sem que haja prejuízo aos seus componentes, sem que ocasione a diminuição da sua vida útil e perda de rendimento. Os limites de temperatura conforme as classes de isolamento são determinados pela norma NBR 7094 - 2003 Máquinas Elétricas Girantes – Motores de Indução - Especificação. O Quadro 1 apresenta os limites de temperatura presentes na norma. Estes limites representam os valores máximos que a temperatura pode atingir sem que danifique a isolação dos enrolamentos. Em geral, as classes B e F são aplicadas à motores enquanto para geradores, são utilizadas as clases F e H.

Classe	Temperatura (°C)
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Quadro 1 -Limites de temperatura segundo a NBR 7094

De modo geral, os efeitos da elevação da temperatura são visualizados de forma mais evidente no isolamento do enrolamento. Entretanto, demais partes constituintes da máquina são afetadas, ocasionando redução do desempenho. Rolamentos lubrificadas a óleo podem ser afetados pela elevação da temperatura, havendo necessidade, em casos extremos, de ventilação externa (LYNN, 1939).

Em consequência da elevação da temperatura, os materiais podem vir a expandir ou contrair suas dimensões. Isto pode causar alguns problemas de desempenho, afetando o rendimento da máquina, uma vez que, as características dimensionais e operativas de projetos são alteradas (LYNN, 1939).

2.4 ESTADO DA ARTE E DA TÉCNICA DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM ROTORES DE MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES

Existem diversas metodologias e tecnologias desenvolvidas para auxiliar o processo de medição de temperatura do rotor em máquinas elétricas girantes. Existem medições com contato e sem contato. Os métodos utilizados podem ainda ser classificados como abordagens invasivas e não-invasivas.

Nas subseções seguintes, serão abordadas metodologias apresentadas em procedimentos de ensaios relacionados a documentos normativos, metodologias e tecnologias apresentadas em artigos científicos, dissertações e teses e, por fim, serão apresentados protótipos que foram transformados em produtos, sendo encontrados em forma de patentes.

2.4.1 Documentos normativos

Diversos documentos normativos abordam a medição de temperatura em máquinas elétricas girantes. Esses documentos especificam limites de temperatura nos quais as máquinas podem operar, sem que haja danos aos seus componentes, além de especificar uma variedade de métodos e técnicas de medição da temperatura dos enrolamentos. Para se obter tais dados, são realizados ensaios em laboratórios simulando condições normais de operação. De forma geral, esses documentos abordam a medição da temperatura nos enrolamentos do estator e posteriormente, a partir de técnicas indiretas, é estimada a temperatura nos enrolamentos do rotor.

Uma busca nas principais entidades de normatização identificou-se as normas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Documentos normativos utilizados para padronização dos procedimentos de medição de temperatura em máquinas elétricas girantes

#	Entidade	Identificação	Título	Ano
1	ABNT	NBR 5052	Máquina síncrona - Ensaio	1984
2	ABNT	NBR 5117	Máquina elétrica girante – Máquina síncrona - Especificação	2007
3	NEMA	MG I	Motores e Geradores I	2016
4	IEC	60034 - 1	Máquinas Elétricas Girantes – Parte 1:Classificação e Performance	2017
5	IEEE	IEEE 112	Padrão de procedimentos de testes em motores de indução polifásicos e geradores	2017
6	ABNT	NBR 17094 - 3	Máquinas elétricas girantes Parte 3: Motores de indução trifásico – Métodos de ensaio	2018

A análise desses documentos revelou métodos e estratégias amplamente utilizadas em procedimentos de ensaios, utilizando técnicas muito semelhantes entre elas. Com o propósito de apresentar os métodos encontrados, são utilizados os procedimentos especificados na ABNT NBR 5117 e detalhados na ABNT NBR 5052. A ABNT NBR 5117 apresenta três métodos para determinação da temperatura, sendo eles:

- **Método da variação da resistência elétrica do enrolamento**

A temperatura dos enrolamentos pode ser determinada a partir da medição da resistência do enrolamento da máquina, pois a resistividade elétrica dos materiais condutores varia com a temperatura. Para estimar a temperatura do enrolamento em um instante qualquer, é necessário que se tenha um par de temperatura e resistência conhecidos para que, dessa forma, os valores conhecidos de temperatura e resistência assim como a resistência medida em um instante qualquer, possam ser aplicado na equação 1 e a temperatura em um dado instante possa ser determinada.

A norma apresenta três técnicas aplicáveis para determinação da temperatura pelo método da variação da resistência do enrolamento:

Medição direta

Medição direta da resistência do enrolamento no início e ao final do ensaio, utilizando instrumentos com escala adequada, como por exemplo, um ohmímetro. Este método é aplicado apenas para ensaios, não sendo utilizado para monitoramento da temperatura em tempo real, uma vez que a máquina deve estar parada para que se possa realizar as medições

Medição por corrente e tensão em corrente contínua

Para enrolamentos de campo, deve-se medir a corrente no enrolamento e a tensão nos seus terminais. Para enrolamento de armadura, é necessário injetar corrente contínua no enrolamento quando a máquina for desligada. O procedimento é descrito no item 3.17.3.32 da ABNT NBR 5052.

Método da superposição

Neste método, não há interrupção da corrente alternada de carga, então, superpõe-se a esta, uma corrente contínua de medição de fraca intensidade conforme procedimento descrito de forma detalhada no anexo A da ABNT NBR 5052. O princípio por trás desse procedimento é a partir da injeção de uma corrente de medição, medir a queda de tensão no enrolamento e por sua vez calcular a sua resistência, para que dessa forma, utilizando um par de temperatura e resistência conhecida, seja possível determinar a temperatura do enrolamento em um instante desejado. Este método pode ser aplicado tanto para ensaio quanto para monitoramento em tempo real.

Para determinar a temperatura dos enrolamentos pelo método da variação da resistência, é utilizado a equação 1

$$\frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

Sendo:

θ_1 a temperatura (°C) do enrolamento no momento inicial da medição;

θ_2 a temperatura (°C) do enrolamento no momento final da medição;

R_1 é a resistência do enrolamento no momento inicial;

R_2 é a resistência do enrolamento no momento final;

K é o recíproco do coeficiente de temperatura a $0\text{ }^\circ\text{C}$ do material do condutor. Para o condutor de cobre $k = 235$.

- **Método do sensor de temperatura embarcado**

A temperatura é determinada utilizando sensores de temperatura como por exemplo, termorresistores, termopares, termistores e semicondutores de coeficiente de temperatura negativo.

Esses sensores são alocados dentro da máquina no processo de construção, em pontos inacessíveis quando a máquina está montada. Esse método é utilizado para medição de temperatura dos enrolamentos do estator em máquinas de corrente alternada com potência de saída maior ou igual à 5 kVA.

Os sensores devem ser instalados ao longo do enrolamento, devendo ser instalados, no mínimo, seis unidades, sendo utilizados dois sensores por fase. Os sensores devem ser alocados em pontos no qual as temperaturas mais elevadas são propensas a ocorrer. É utilizada a maior leitura entre os sensores a fim de estimar a temperatura do enrolamento. Os sensores devem ser alocados de tal forma a evitar o contato com o fluido refrigerante primário e em bom contato térmico com o enrolamento ou superfície a ser medida.

- **Método termométrico**

Nesse método, a temperatura do enrolamento é estimada através de medições de temperatura em superfícies acessíveis da máquina, após montada. A medição pode ser realizada através termômetros de bulbo, termopares, termistores e termorresistores. Os sensores de temperatura devem ser alocados em locais em que elevadas temperaturas são mais comuns de acontecer, de modo a considerar casos mais extremos. E assim como no método anterior, os sensores devem ser alocados de tal forma a evitar o contato com o fluido refrigerante primário e em bom contato térmico com o enrolamento ou superfície a ser medida.

A NBR 5117 apresenta critérios de escolha entre os métodos anteriormente apresentados, sendo os principais deles:

- O método da variação da resistência é aplicado na maior parte dos casos;
- Para máquinas com potência igual ou superior a 5 MW, o método do sensor de temperatura embarcado deve ser utilizado;
- Para máquinas com potência inferior a 200 kW, o fabricante deve escolher entre os métodos de medição direta ou por superposição;
- A utilização do método termométrico se dá nos casos nos quais é impraticável a utilização do método da variação de resistência, como por exemplo, enrolamentos de baixa resistência.

2.4.2 Documentos acadêmicos

Diversos estudos são realizados na academia, no intuito de encontrar melhores alternativas para realizar medições de temperatura que ofereçam maior confiabilidade e segurança. Os dados obtidos das medições juntamente com o modelo térmico da máquina e o conhecimento prévio da mesma revelam informações importantes sobre o estado da máquina, podendo ser utilizados para efetuar um prognóstico da possibilidade de falhas e, assim, programar paradas para manutenção.

As técnicas voltadas para medição de temperatura em superfícies estáticas e de fácil acessibilidade, como a carcaça e estator, são bastante difundidas. No entanto, quando tratamos especificamente da medição de temperatura do rotor, existe uma série de obstáculos que devem ser considerados. O mais difícil deles, segundo (DYMOND e colab., 2002), é a medição da temperatura de um elemento girante. Além disso, problemas associados à ruído, tipo de transdutor, fixação e intensos campos magnéticos também dificultam tal prática.

Uma primeira divisão que pode ser realizada quanto as estratégias para medição da temperatura de elementos girantes é: com contato e sem contato.

Técnicas de medição sem contato são alternativas utilizadas em casos nos quais não são viáveis a utilização de sensores termorresistores, termopares ou termistores, no qual o objetivo a ser medido encontra-se em movimento ou sob efeito de campos eletromagnéticos. Dentre as opções existentes, pode ser utilizada por exemplo, a câmera infravermelho, dispositivo que não influencia na operação da

máquina, não sendo necessário nenhuma adaptação para realizar a medição, não há muitos problemas com a transmissão de dados, porém podem apresentar desvantagens em relação a velocidade que podem ser utilizadas. Elas apresentam bons resultados para medir temperatura em ventoinhas, anéis, estator, enrolamentos, quando estas não estejam pintadas, caso contrário, podem apresentar erros significantes. Outra alternativa disponível, são os termômetros infravermelho. Diferente da câmera infravermelho, não há formação de imagem, mas a medição de uma temperatura média. No mercado, existem sensores infravermelho que produzem sinais de saída compatíveis com sensores termopar.

Em circunstâncias nas quais é necessário garantir a precisão das medidas e a instalação de sensores junto à máquina seja viável, são adotadas as medições com contato. Essas técnicas apresentam resultados mais confiáveis, mas não são possíveis sem interferir nas características físicas da máquina (GANCHEV e colab., 2011).

Dentre os diversos sensores utilizados, na abordagem com contato, está o termopar. O termopar é constituído por uma junção de dois metais distintos. Quando esta junção é submetida a temperaturas diferentes, uma força eletromotriz é gerada, sendo esta proporcional ao aumento da temperatura (FRANÇA, 2007).

Para medir temperatura nas barras do rotor uma das melhores técnicas é abrir um orifício no local no qual será alocado o sensor para medição. Esses sensores são úteis para detectar rápidas mudanças de temperatura. No entanto, esses sensores são afetados por ruídos, prejudicando dessa forma as medições.

Similar aos termopares, estão os termorresistores de platina, comumente conhecidos por RTD (detectores de temperatura por resistência). Os RTD são caracterizados como sensores passivos, dessa forma, necessitam de um sistema de medição de resistência, sendo os mais comuns os que implementam a medição de resistência a 3 ou 4 fios. Tipicamente, esses sensores apresentam erros mais baixos para a medição. Os tipos de RTD encontrados comercialmente são: Pt100, Pt1000 e Pt4000, sendo caracterizados de acordo com a resistência que apresentam a uma temperatura de referência de 0 °C. Por exemplo, o termorresistor Pt100 apresenta resistência de 100 Ω na temperatura de 0 °C.

Outra técnica que pode ser utilizada é a de adesivos sensíveis a temperatura. São encontrados em várias faixas de temperatura. Existem várias desvantagens na

utilização desses adesivos, como aderência na superfície quente se movimentando, os sensores devem ser substituídos frequentemente.

De modo similar aos adesivos, pode ser utilizada pintura sensível a temperatura, de modo geral apresenta os mesmos problemas que os adesivos, exceto a aderência da tinta em relação ao movimento rotatório, mas é afetada pelo tempo de exposição à temperatura.

Após o sensor realizar a medida, é necessário que o dado seja transmitido por algum meio. Existem algumas abordagens frequentemente utilizadas, como por exemplo, a utilização de anéis coletores para obter leituras de temperatura em regime permanente. A utilização dessa técnica traz uma série de desvantagens, incluindo o número de anéis utilizados, a faixa de velocidade de operação e ruídos elétricos. Como vantagem desse método, é a mínima necessidade de desmontar a máquina para instalação do sistema, caso a mesma não seja previamente projetada para tal finalidade.

Outra técnica utilizada é a de um sistema de medição sem fio, podendo ser utilizado identificação por rádio frequência (RFID) ou links ópticos para a transferência dos dados.

Uma abordagem utilizando transmissão via luz é apresentada em (GANCHEV e colab., 2011). Quando a aplicação necessita atender a diversos requisitos técnicos como, por exemplo, trabalhar sob altas rotações, ser imune a interferências eletromagnéticas, interferir minimamente nos aspectos construtivos da máquina, para adaptar o sistema de medição para realizar o monitoramento da temperatura em condições normais de funcionamento, um sistema robusto deve ser implementado a fim de obter os melhores resultados.

Para alcançar tal objetivo, foram utilizados seis sensores do tipo termopar tipo K junto com um condicionador de sinal para medir a temperatura em diversos pontos do rotor. Para processamento do sinal proveniente do transdutor, foi utilizado um microcontrolador. Para transmissão dos dados para o computador, foi utilizada a tecnologia por infravermelho, escolha essa baseada na imunidade eletrostática e eletromagnética oferecida e pelo baixo consumo de energia. Para alimentação do sistema, é utilizada uma bateria de 9 V @ 1200 mA. Os dados são monitorados em tempo real através de software desenvolvido em LabVIEW. A Figura 2 apresenta o esquemático da instrumentação utilizada para medição de temperatura do rotor.

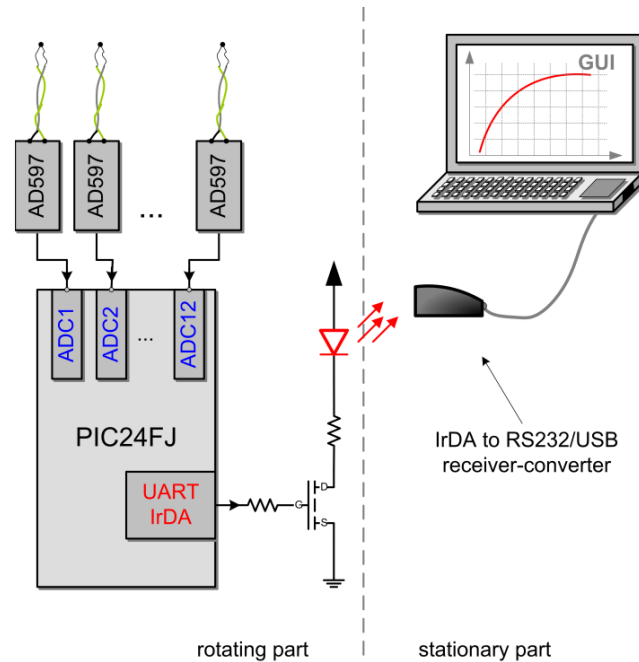


Figura 2 - Instrumentação utilizada para medição de temperatura do rotor. Fonte: (GANCHEV

O circuito eletrônico e a bateria foram alocados dentro do rotor conforme a Figura 3.

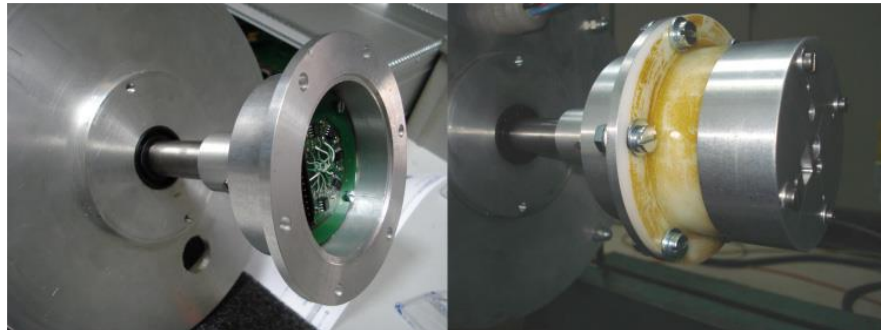


Figura 3 - Instalação do sistema de aquisição. Fonte: (GANCHEV e colab., 2011)

Para fins de validação da ferramenta, foram realizados testes em um motor de indução com rotor de gaiola de esquilo e de um motor síncrono com rotor de imã permanente. São utilizados seis pontos de medição para cada máquina. As Figura 4 e Figura 5 apresentam os locais de medição já com os transdutores instalados.

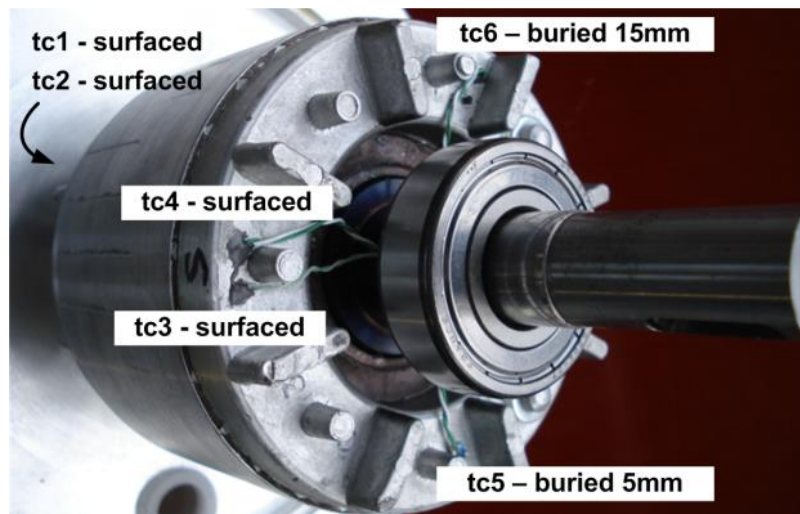


Figura 4 - Motor de indução com rotor de gaiola de esquilo. Fonte: (GANCHEV e colab., 2011)

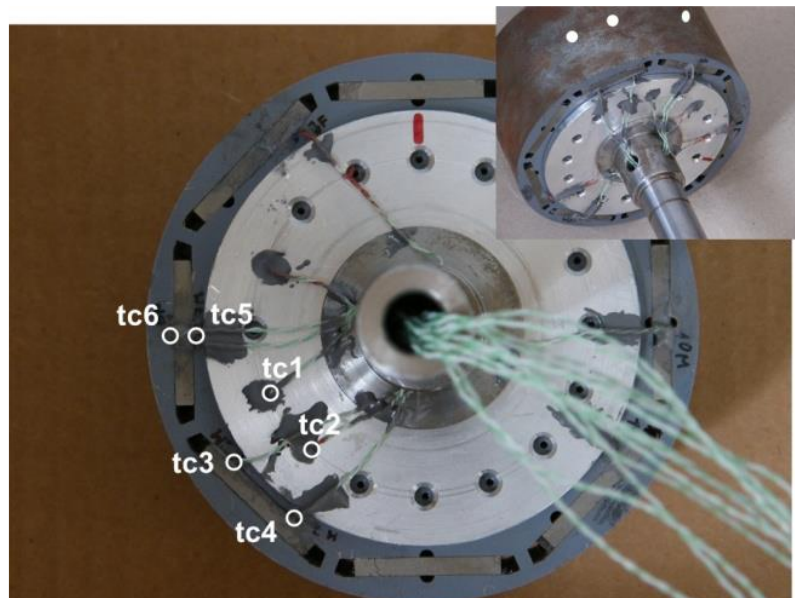


Figura 5 - Motor síncrono com rotor de ímã permanente. Fonte: (GANCHEV e colab., 2011)

Como resultado do experimento, é verificado que o método utilizado apresenta uma incerteza de $\pm 1,5$ °C.

Em Mekjavic et al.(1996) é descrita a construção de um modelo térmico para monitoramento de temperatura do rotor e estator de um motor de indução trifásico de 5,5 kW com rotor de gaiola de esquilo, no qual foi desenvolvido um circuito dedicado para o rotor e outro para o estator conforme a Figura 6.

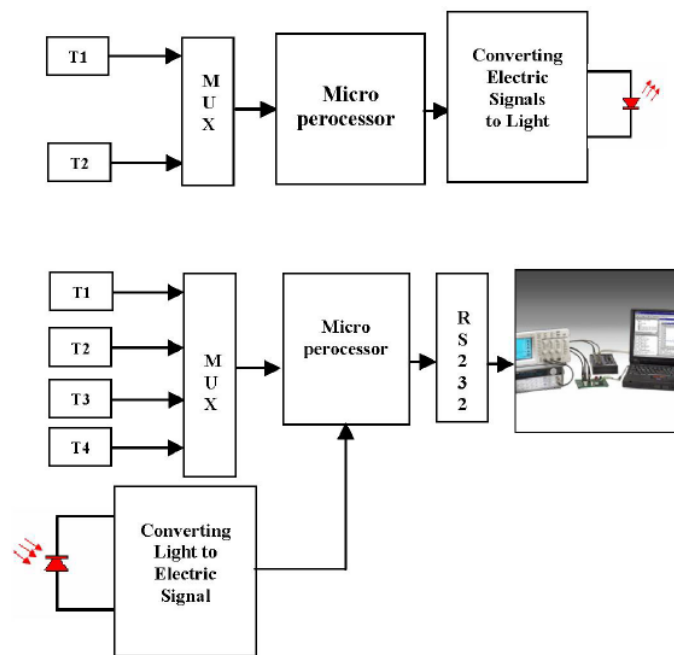


Figura 6 - Circuito para medição da temperatura do rotor (em cima) e do estator (em baixo). Fonte:(Mekjavic et al.,1996)

Conforme mostrado na Figura 6, o sistema é montado para adquirir sinais de dois sensores SMT160 – de tecnologia semicondutora – acoplados ao rotor e quatro ao estator. Cada conjunto de sinais é multiplexado e, posteriormente é adquirido e processado por um microcontrolador. Para transferência de dados entre o circuito do rotor e o do estator é utilizado um LED infravermelho, instalado na linha axial do rotor diretamente apontado para um fotodiodo. A Figura 7 mostra um esquemático da instalação do circuito do rotor.

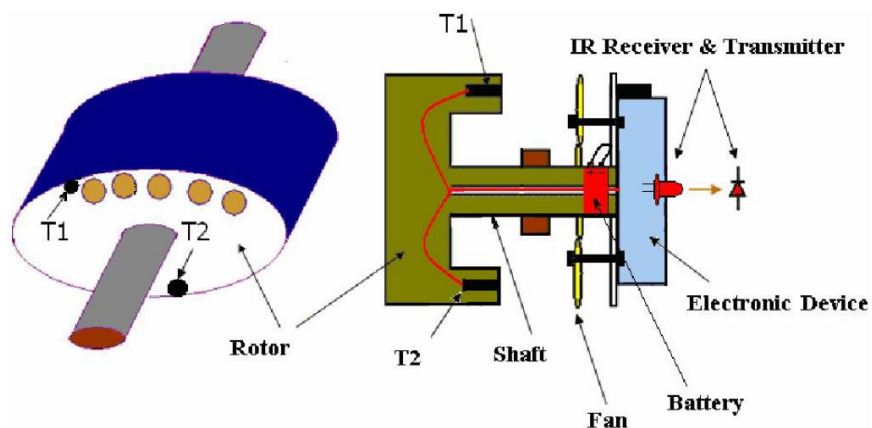


Figura 7 - Circuito do rotor. Fonte:(Mekjavic et al.,1996)

Os sensores foram instalados no rotor e no estator conforme mostrado nas Figura 8 e Figura 9, respectivamente.

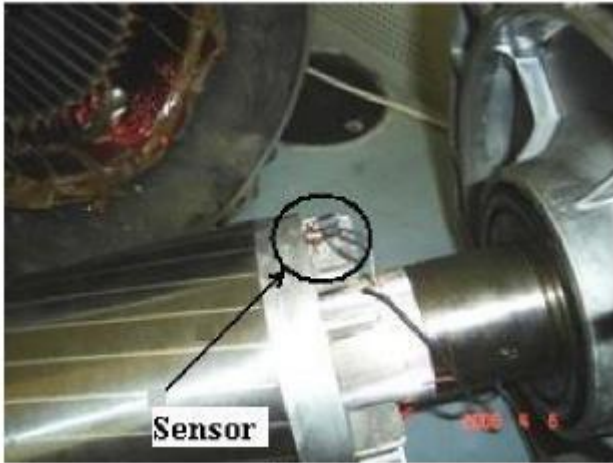


Figura 9 - Sensor localizado na superfície externa do rotor Fonte:(Mekjavic et al.,1996)

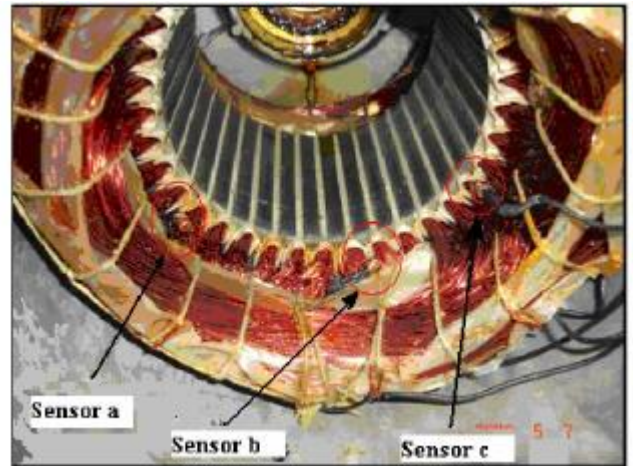


Figura 8 - Sensor localizado na superfície interna do estator Fonte:(Mekjavic et al.,1996)

A Figura 10 mostra o sistema de medição montado para adquirir os dados de temperatura da máquina.

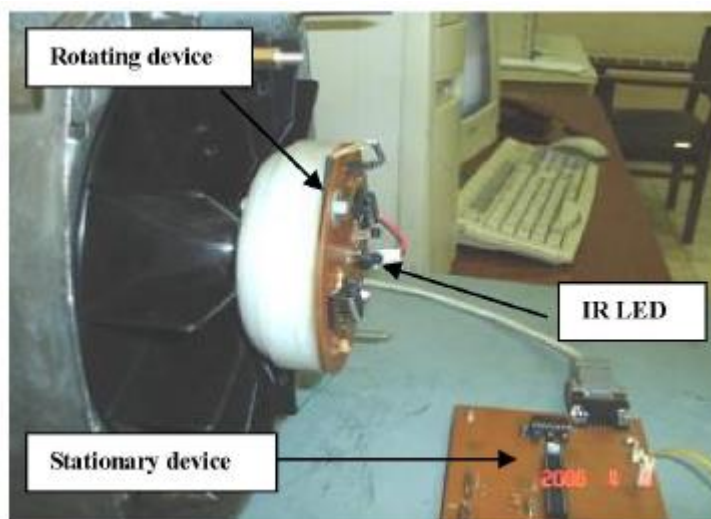


Figura 10 - Sistema de medição Fonte:(Mekjavic et al.,1996)

O sistema foi testado em um motor trifásico de gaiola de esquilo de potência de 5,5 kW para situações sem carga, rotor travado e com carga, apresentando robustez para velocidades de até 3000 rpm. A grande vantagem desse sistema é a imunidade a interferência eletromagnética. O sensor utilizado apresenta um erro máximo de ± 2 °C operando em uma faixa de temperatura entre -45 °C a $+130$ °C, podendo ser inferior dependendo do encapsulamento e temperatura de operação da máquina (SMARTEC, 2005).

Outra abordagem baseada na transmissão de dados sem fio é utilizando a tecnologia RFID. Muito embora a integração de sistemas de monitoramento RFID em ambientes metálicos continua sendo um desafio, estes oferecem facilidades em quesitos como transmissão de dados, baixo consumo de energia e medição sem contato. Em Sebastian et al.(2014) é utilizado um sistema baseado em UHF RFID para monitoramento da temperatura do rotor de uma máquina de rotor bobinado em uma faixa de temperatura de -40 °C a 150 °C.

O sistema é otimizado para trabalhar sob elevado campo eletromagnético. O sistema é composto de um sensor NTC de 10 k Ω responsável pela medição de temperatura em conjunto com um microprocessador com um circuito conversor A/D e um circuito integrado customizado conforme mostrado na Figura 11.

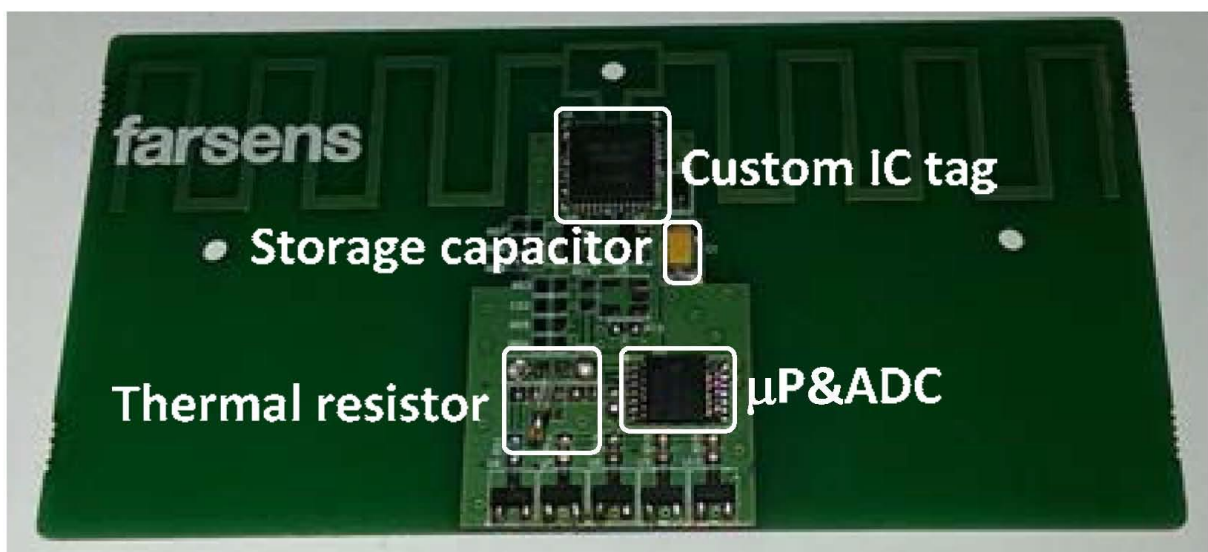


Figura 11 - Sensor tag implementada. Fonte: (Sebastian et al.,2014)

Em virtude da barreira eletromagnética que o motor oferece ao sistema de transmissão, o leitor é instalado dentro da máquina. Uma antena PIFA (*Planar Inverted – F Antenna*) foi escolhida para implementar a antena do leitor devido a sua alta performance e eficiência dentro do denso ambiente metálico (SEBASTIAN e colab., 2014). A Figura 12 mostra a localização das antenas no motor.

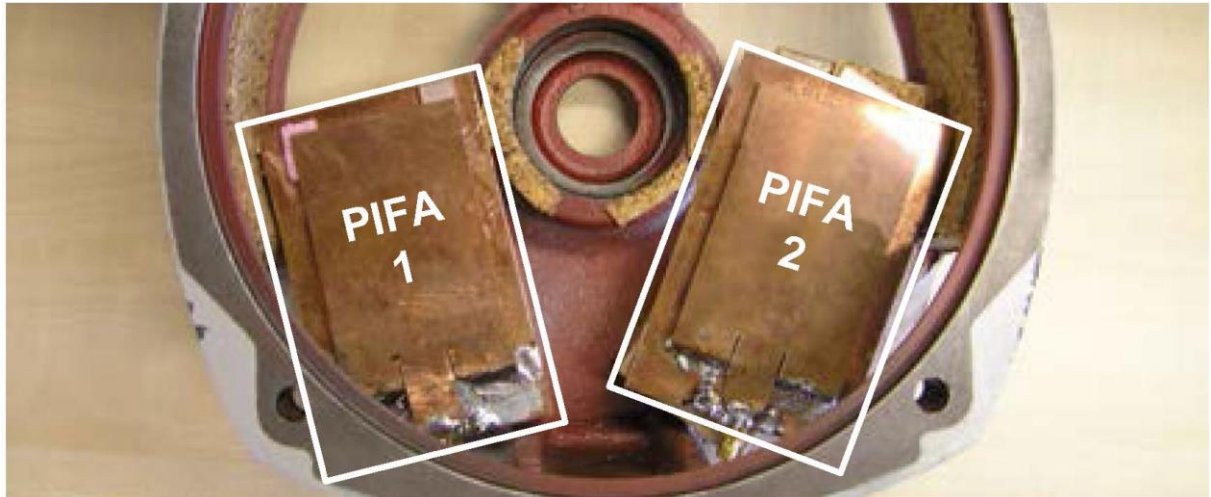


Figura 12 - Antenas acopladas ao motor. Fonte: (Sebastian et al.,2014)

O sistema foi testado em um motor de 2,2 kW controlado por inversor em diferentes situações, a fim de testar a influência do campo eletromagnético no sistema de medição. Constatou-se que o sistema apresentou robustez em relação à influência eletromagnética. A resolução do sistema é de 0,1°C e o erro máximo estimado é de $\pm 1,5$ °C.

Uma outra abordagem dentro das opções de medição de temperatura com contato é baseada no conceito de ondas acústicas superficiais (SAW). Segundo (MEDEIROS, 2009) um sensor por ondas acústicas superficiais (SAW) é criado por uma combinação de um transdutor interdigital (IDT) e vários refletores em um monocristal piezoelétrico. O transdutor interdigital, que é conectado à antena, transforma, com ajuda do efeito piezoelétrico inverso, o sinal recebido em uma onda acústica superficial. Esta onda se propaga no cristal em direção aos refletores. Os refletores são dispostos em um padrão específico que refletem partes da onda incidente. O que retorna ao IDT é uma série de ecos em alta frequência, os quais são transformados novamente em sinal eletromagnético (BULST, C.RUPPEL,1994). O

transdutor e os refletores são alterações feitas sobre o substrato. O sensor opera junto com uma antena. A Figura 13 mostra um desenho esquemático do sensor SAW e seus principais componentes.

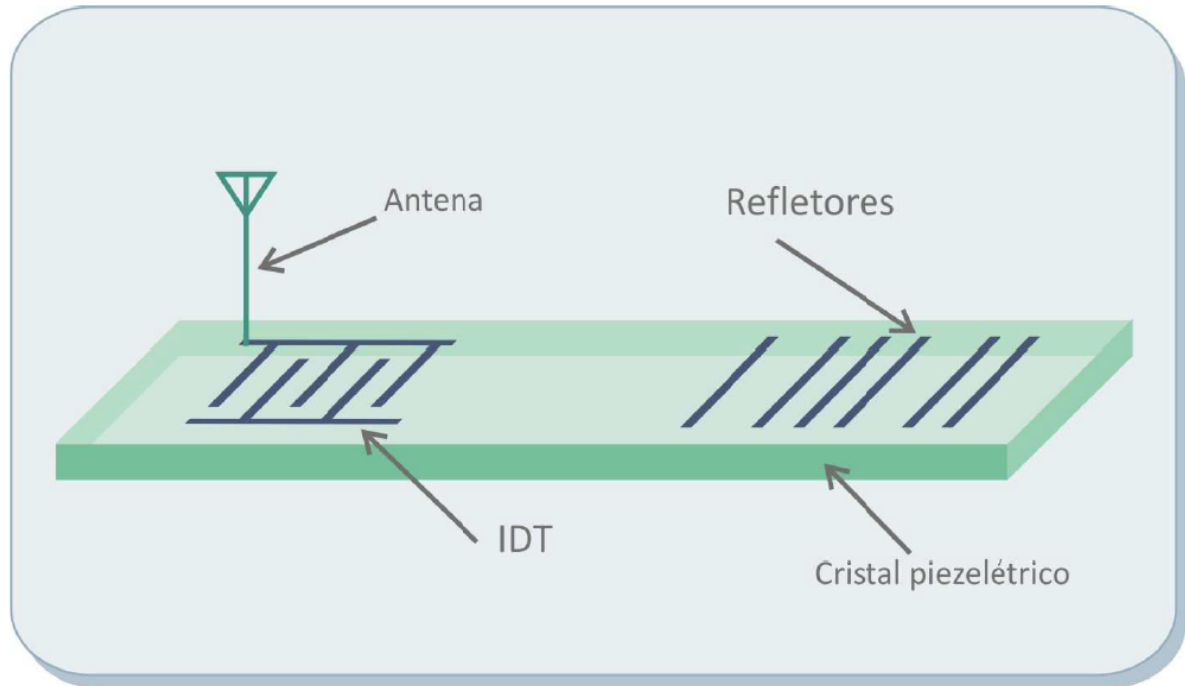


Figura 13 - Desenho esquemático apresentando os principais componentes de um sensor SAW. Fonte: (MEDEIROS, 2009)

Um exemplo de utilização da tecnologia SAW para medição de temperatura é apresentado em Binder e Fachberger (2011). Nele é desenvolvido um sistema de monitoramento de temperatura para motores de alta velocidade e alta tensão utilizando sensor de tecnologia SAW.

O sensor utilizado foi um do tipo SAW, desenvolvido para operar em uma faixa de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$, com uma incerteza de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e resolução de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. A comunicação entre o sensor e o leitor é realizada por um link de rádio na banda ISM a $2,4\text{ GHz}$. A Figura 14 mostra o sensor alocado junto ao rotor do motor de indução. O sistema foi desenvolvido para monitorar a temperatura de um motor de indução com rotor gaiola de esquilo de 4 MW com velocidade de 15 000 rpm e 16 MW com velocidade de 6000 rpm .

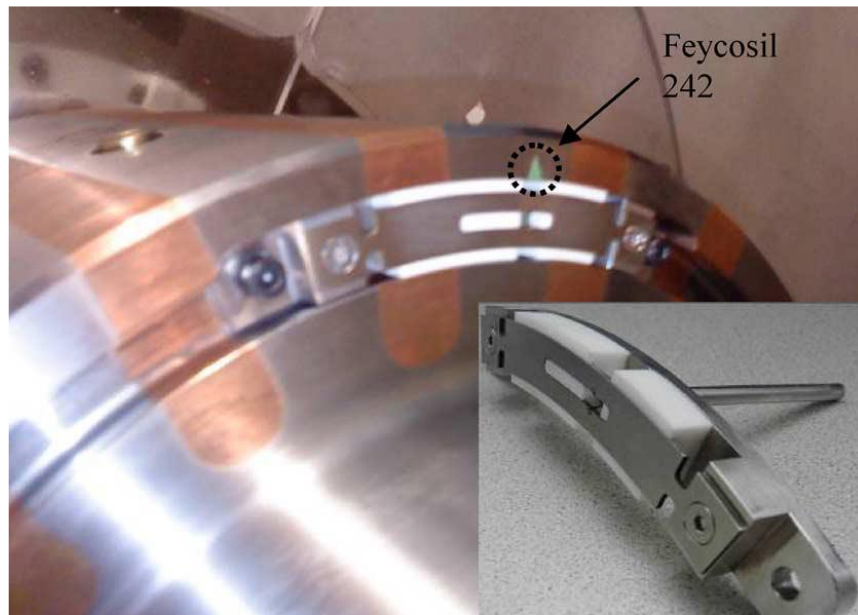


Figura 14 - Instalação do sensor no rotor do motor.
Fonte: (Binder Fachberger, 2011).

A Figura 15 apresenta o aparato experimental completo utilizado para adquirir os dados de temperatura do motor.

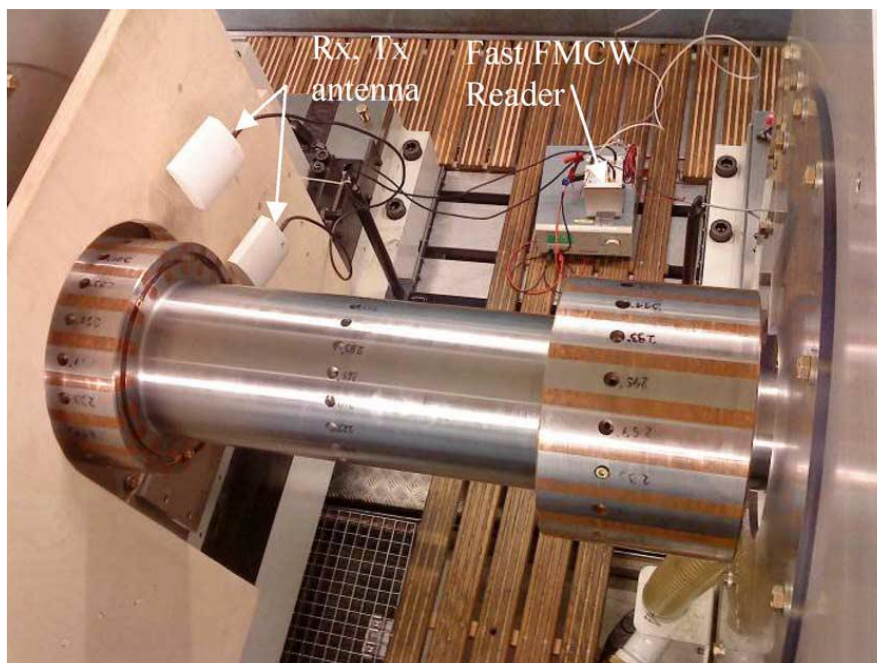


Figura 15 - Aparato experimental para realização dos testes. Fonte: (Binder Fachberger, 2011).

O sistema foi testado para o motor operando em regime permanente, apresentando leituras estáveis para aplicação no motor de indução operando em velocidade elevada.

2.4.3 Patentes

Soluções direcionadas à indústria devem ser, robustas, que ofereçam o mínimo de impacto na máquina e que ofereçam resultados satisfatórios. Muitas vezes, a utilização de sensores para medição de temperatura implica modificações na máquina, fiação extra para conexão dos dispositivos. Dependendo da aplicação, uma solução que não utilize medição por sensores pode ser a mais indicada quando se deseja evitar modificações do sistema como um todo.

Uma primeira abordagem apresentada no campo das patentes, é a utilização do conceito de medição de temperatura através da resistência dos enrolamentos. A aplicação dessa técnica é mostrada em GERHARD e MAIER (1991) no qual é desenvolvido um dispositivo para medição de temperatura dos enrolamentos. O objetivo da invenção é proporcionar um arranjo no qual a utilização de transdutores de temperatura seja dispensada. Tal objetivo é alcançado utilizando um arranjo genérico no qual a rede elétrica de alimentação da máquina é conectada em uma ou mais fases da máquina elétrica. O objetivo é somar uma tensão alternada de frequência diferente da alimentação da máquina. Tal tensão deve ter frequência inferior, o mais baixo possível para que a corrente dessa componente baixa tenha menor influência da reatância e por consequência, uma maior influência da resistência.

O arranjo é capaz de medir a condutância do enrolamento durante a operação da máquina e resistência conhecida a uma temperatura de referência, a corrente, a temperatura média do enrolamento.

Para ser particularmente vantajoso, foi encontrado que as frequências da corrente devem ser menores que 10 Hz. A fim de evitar influências prejudiciais na temperatura do motor, é vantajoso se a amplitude da tensão de medição seja escolhida em relação ao aquecimento adicional da máquina pela tensão de medição e, portanto, na temperatura permitida da máquina. Aqui, provou ser vantajoso se a

amplitude de tensão de medição for de 1% a 2% da amplitude da tensão principal (GERHARD e MAIER, 1991).

Uma outra alternativa para medir a temperatura é baseada no modelo matemático da máquina. Neste caso, não é utilizado um sistema de medição como apresentado anteriormente. Uma aplicação desenvolvida sem a utilização de sensores é utilizada em KILMAN e DYMOND (2000), no qual a temperatura do rotor nos motores de indução é estimada sem a necessidade de medição com sensores, usando apenas cálculos computacionais baseados em dados prontamente disponíveis no centro de controle de motores.

Assim, para qualquer motor dado, é possível predeterminar uma relação entre a temperatura do rotor e a resistência do rotor, de modo que, pela determinação da resistência do rotor, a temperatura do rotor possa ser calculada. A resistência do rotor, por sua vez, pode ser calculada a partir das informações medidas relativas ao escorregamento e ao torque do motor. A estimativa de temperatura pode ser obtida pelo uso de métodos de circuito equivalentes, e relações adicionais podem ser obtidas a partir de um circuito equivalente simplificado. Uma desvantagem desse método é que existe a necessidade dos dados completos da máquina, que normalmente não são divulgados.

Outra aplicação dessa técnica é apresentado em COLBY e colab.(2010), no qual é utilizado um método baseado em medição de tensão e corrente para fornecer estimativas contínuas e confiáveis de temperatura do rotor para motores de indução durante operações em regime permanente ou dinâmico.

A temperatura do rotor é calculada a partir de medições de tensão e corrente sem sensores de temperatura e velocidade. Primeiro, vetores espaciais complexos são sintetizados a partir de medições de tensão e corrente. Posteriormente, a velocidade instantânea do rotor é detectada calculando a velocidade de rotação de um único componente harmônico da ranhura do rotor em relação à velocidade de rotação do componente de frequência fundamental.

Em seguida, os componentes de frequência fundamental da sequência positiva são extraídos de vetores espaciais complexos. A constante de tempo do rotor é estimada em um sistema adaptativo de referência de modelo baseado em um modelo de circuito equivalente de motor de indução.

Finalmente, a temperatura do rotor é calculada de acordo com a relação linear

entre a temperatura do rotor e a constante de tempo estimada do rotor. A proteção térmica do motor de indução em tempo real é obtida por meio desse rastreamento contínuo da temperatura do rotor.

Uma abordagem utilizando medição com contato é proposta em SMITH (1997) propõe um sistema de medição de temperatura para medir a temperatura do rotor de um motor ou gerador elétrico. Nesta invenção, um transdutor do tipo termopar, é acoplado no rotor. O sinal de temperatura do sensor é amplificado e usado para operar uma tensão no conversor de frequência que gera um sinal com uma frequência proporcional à temperatura. Este sinal é acoplado a partir da parte rotativa para a parte estacionária da máquina, onde é convertido para uma tensão analógica proporcional à temperatura do rotor. É utilizado um transmissor e receptor FM para o acoplamento do sinal.

Além da abordagem apresentada anteriormente, em RAI e colab. (2012) é apresentada uma técnica de medição com contato em tempo real da superfície do rotor. É utilizada uma etiqueta de identificação por radiofrequência (RFID) para transmissão dos dados, com um sensor integrado no rotor. Os sensores utilizados nesta invenção podem ser do tipo termopares ou termorresistores. Um leitor de RFID lê os dados obtidos a partir do rotor, de pelo menos uma etiqueta RFID instalado na superfície do mesmo. Na presente solução, um computador recebe os dados pelo leitor RFID, que pode realizar o monitoramento remoto e realizar diagnósticos do rotor com base nos dados operacionais medidos, operação de controle e controlar a temperatura da superfície do rotor.

Em 王宏远 e colab.(2017) é apresentada uma tecnologia de medição sem fio de temperatura de rotor de um gerador. O dispositivo é composto de sensores de resistência, instalados no enrolamento do rotor do gerador elétrico e por um módulo de aquisição de temperatura. O módulo de aquisição de temperatura converte os sinais de resistência em sinais de temperatura e transmite os sinais de temperatura para o receptor por meio de transmissão sem fio.

Em 吴德会 e colab.(2010) utiliza-se um método de medição para obtenção da temperatura da superfície do rotor de ímã permanente de um motor síncrono de alta velocidade como por exemplo 1500 rpm. Nessa invenção, é feito um orifício no dente do estator, fixado o sensor de temperatura infravermelho no orifício, para que, a sonda do sensor se oponha à superfície do rotor.

O sistema também utiliza um regulador de frequência, para variar a velocidade de rotação do rotor, para que, desse modo, o rotor opere na velocidade abaixo da velocidade de medição crítica para um curto espaço de tempo e estabilize o funcionamento.

O sistema de coleta de dados registra as mudanças da temperatura média da superfície do rotor, no processo de desaceleração, medido pelo sensor e a distribuição da temperatura da superfície do rotor na operação estável, abaixo da velocidade de medição crítica. O método utiliza dois dos resultados para obter a distribuição de temperatura enquanto gira em alta velocidade.

A invenção alcança a medição multiponto sem contato para a distribuição de temperatura do rotor, evitando os problemas de instalação do sensor no rotor de alta velocidade e a transmissão de dados no ambiente de forte ação do campo eletromagnético, resolvendo as dificuldades de medição a distribuição de temperatura causada pelo tempo de resposta do sensor (吴德会 e colab., 2010).

Outra abordagem encontrada, é a utilização de sensores infravermelhos em conjunto com sondas de fibra ótica para compor o sistema de medição de temperatura, como é apresentado em 贺德强 e colab.(2016), no qual é utilizado um dispositivo de medição de temperatura de superfície de rotor de motor síncrono de ímã permanente. Nesta invenção, são utilizadas sondas de fibra ótica para realizar a transmissão do sinal e sensores infravermelho para realização da medição da temperatura. As sondas de fibra ótica são alocadas nas ranhuras do estator de forma equidistante e uniformemente distribuídas ao longo da circunferência do estator. Cada sonda é ligada a um sensor infravermelho e um módulo de processamento (贺德强 e colab., 2016)

Em CONRAD (2005) busca-se proporcionar um dispositivo para medir as temperaturas do rotor sem contato, que forneça resultados precisos e reproduzíveis por meios simples e que evite os inconvenientes encontrados na literatura. Para atingir esse objetivo é utilizado um dispositivo para medir a temperatura de um rotor cooperando com o estator.

O dispositivo compreende uma bobina elétrica disposta no estator, um ímã permanente montado no rotor. O conceito principal abordado nessa técnica, é que tensão induzida na bobina varia pela influência da temperatura no comportamento do ímã. Com isso, são utilizados dispositivos eletrônicos, como medidores de tensão e

microcontroladores para medir a tensão induzida na bobina pelo imã permanente e converter a tensão induzida em um sinal proporcional à temperatura.

Com base nos estudos apresentados, apresentam-se no capítulo seguinte, as especificações de projeto para a medição de temperatura do rotor em máquinas elétricas girantes definidas junto à empresa parceira.

3 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO PARA A MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO ROTOR EM MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES

As especificações de projeto para medição de temperatura de rotor em máquinas elétricas girantes são fruto de reuniões com a empresa parceira AUTOMATIC.

A AUTOMATIC foi fundada em 25 de janeiro de 1983 em Luzerna – Santa Catarina, atualmente possui unidades nos municípios de Luzerna, Joinville, Joaçaba, Caçador, Chapecó, São Bento do Sul, Blumenau, Curitiba, Catanduvas e Porto Alegre. Possui ampla experiência em montagens elétricas em usinas hidroelétricas, projetos e montagens elétricas industriais de alta e baixa tensão. Projeta e fabrica painéis de comando e proteção, CCM's, sistemas supervisórios com CLP's, bem como sua montagem, além de prestar serviços de manutenção, recuperação e assistência técnica de geradores, motores, transformadores e equipamentos de automação. Também fabrica geradores de baixa e média tensão para geração hidráulica de energia (AUTOMATIC, 2018).

Após a apresentação do projeto, conhecimento da demanda, discussão das restrições e condições de contorno, foram estabelecidas algumas especificações que o sistema deve possuir.

A empresa tem como foco inicial utilizar o sistema de medição de temperatura em geradores síncronos, uma vez que, são de fabricação própria. O sistema poderia ser utilizados tanto em máquinas com rotor de polos salientes como rotor de pólos lisos.

Como uma das frentes de trabalho da empresa são instalações em pequenas centrais hidrelétricas (PCH), as máquinas podem variar em nível de tensão, sendo desde 380 V a 13,8 kV, com potência nominal na faixa de 1 MW a 10 MW.

As características do sistema de medição definidas junto à empresa parceira são:

- **Especificação do sensor:**

O elemento sensor deve ser isolado, sem referência a tensão de excitação da máquina. O sensor deve conter dimensões e massa reduzidas de modo a interferir o mínimo possível no balanceamento mecânico do rotor.

- **Especificação do sistema:**

Condições de operação: Uma vez que o sensor será instalado junto ao rotor da máquina, este deve estar sujeito a toda e qualquer temperatura que a máquina venha a apresentar. Dessa forma, o sensor deve ser robusto o suficiente para operar na faixa de temperatura de 0 a 180 °C garantindo a precisão desejada. Outro fator que deve ser levado em consideração é a operação do sensor frente a velocidade de rotação da máquina. O sensor deve ser capaz de operar mesmo em altas rotações, como por exemplo em rotação nominal de 1800 rpm.

Precisão e confiabilidade: O sistema deve possuir erro máximo de ± 2 °C para garantir ao sistema confiabilidade e segurança na medição. A fim de garantir um número satisfatório de amostras, a taxa de amostragem mínima deve ser de 0,2 Hz. Uma vez que os sensores serão instalados preferencialmente junto ao rotor das máquinas, estando sujeito a fortes campos magnéticos e operando sob alta-tensão.

Protocolo de comunicação: padrão ModBus RTU RS - 485 e/ou TCP em Ethernet cabeada, que são padrões largamente utilizados na indústria, haja vista sua fácil implementação, robustez e confiabilidade.

Características do leitor: O leitor deve possuir no mínimo duas saídas digitais, função de alarme e TRIP, com ajustes de atuação em software e auto reset.

- **Instalação do sistema**

O sensor deve ser alocado junto ao rotor da máquina. Preferencialmente junto ao rotor no ponto central, com o sensor em contato direto com a camada interna do rotor bobinado.

É desejável que se tenha quatro pontos de medição.

Distância de conexão (alcance de rádio entre sensor e leitor) não deve ser menor que 5 metros para garantir nível mínimo de qualidade do sinal enquanto a máquina estiver em operação.

Receptor e/ou antena deve permitir montagem interna à máquina de forma evitar interferência pela carcaça de aço.

Após reuniões realizadas com a Automatic, foi sugerido pela mesma, o local mais indicado para a instalação do sensor em uma de suas máquinas. A empresa disponibilizou um corte transversal de um gerador síncrono como apresentada na Figura 16. A máquina em questão é um gerador síncrono de polos salientes, podendo ser disponibilizada para os ensaios.

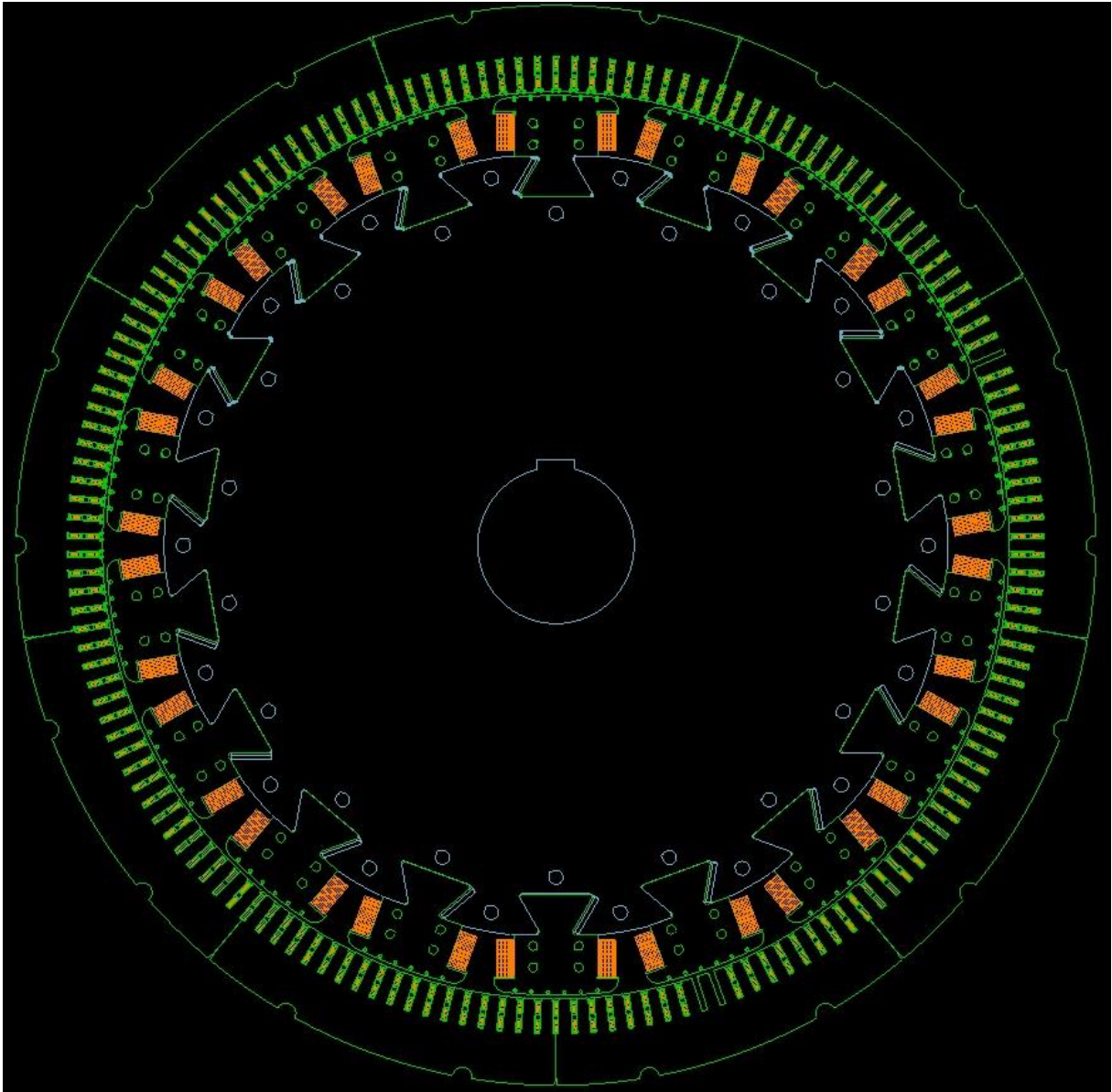


Figura 16 - Conjunto completo do gerador. Fonte: (Automatic, 2018)

Os locais sugeridos para a instalação dos sensores foram as expansões polares. Para isso, a máquina seria projetada com um orifício para alojar o sensor. A Figura 17 mostra em vista perspectiva a localização do sensor na cabeça de bobina. A Figura 18 apresenta uma imagem detalhada do orifício utilizado para instalação do sistema. As dimensões do diâmetro do orifício podem variar de acordo com o sensor selecionado.

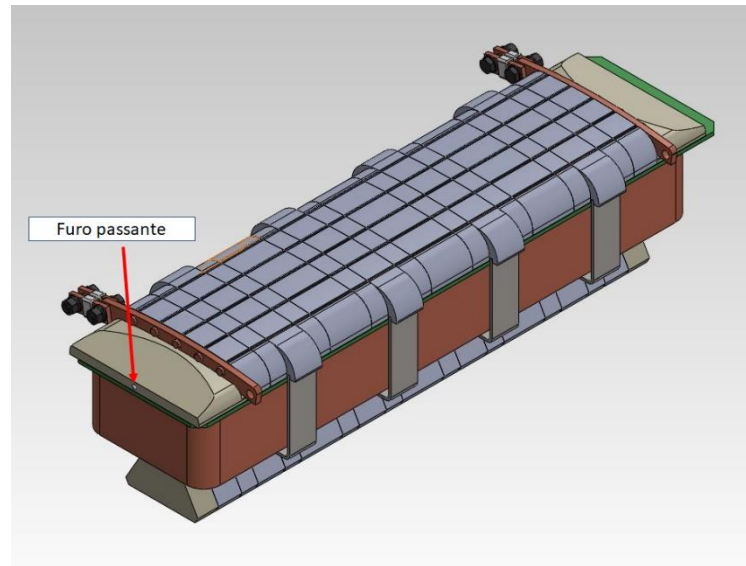


Figura 17 - Vista em perspectiva da expansão polar para instalação do sensor. Fonte: (Automatic, 2018)

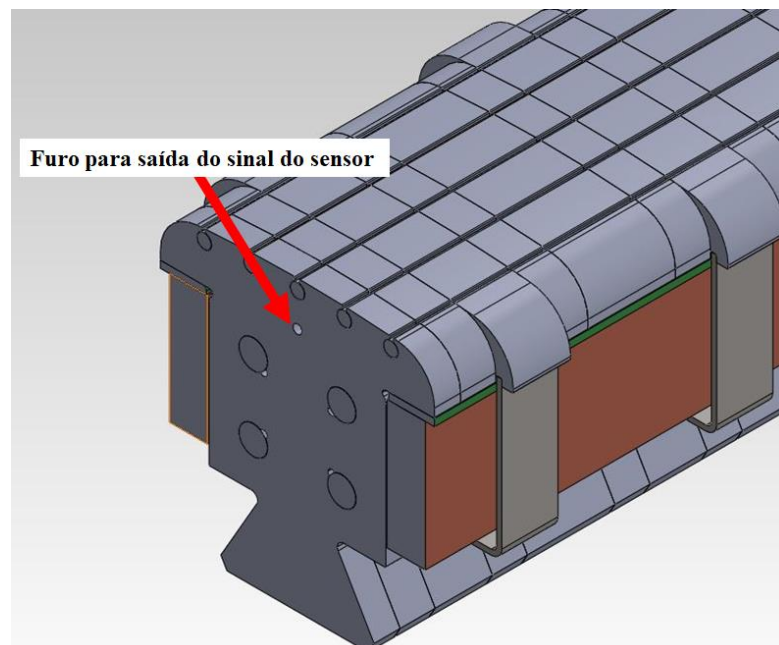


Figura 18 - Detalhe do orifício feito para alocar o sensor. Fonte: (Automatic, 2018)

A Figura 19 apresenta uma vista frontal da expansão polar, mostrando a localização do orifício para instalação do sensor.

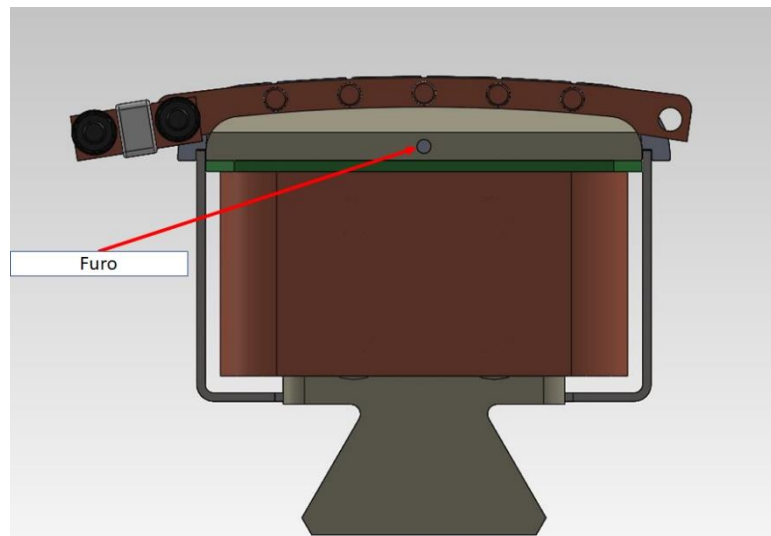


Figura 19 - Vista frontal do orifício. Fonte: (Automatic, 2018)

3.1 PROSPECÇÃO DE SOLUÇÕES SIMILARES

Definidas as especificações de projetos junto à empresa, foi realizada uma busca por sensores, leitores e sistemas de aquisição disponíveis no mercado nacional e internacional. Os principais aspectos analisados na busca por sensores e sistemas são: faixa de temperatura de medição, tecnologia dos sensores (optou-se por sensores passivos), erro máximo na medição, robustez frente interferências eletromagnéticas, dimensões e facilidade de instalação e preço de mercado.

Com o intuito de apresentar as informações dos equipamentos encontrados, de uma forma clara e objetiva, uma planilha comparativa foi feita. Nesta planilha estão listadas cinco empresas: *Phave IV Engineering Inc*, *Senseor All Senses*, *Farsens*, *RFMicron* e *Environetix*. A escolha dessas opções se deve ao atendimento parcial ou completo das especificações técnicas solicitadas.

A planilha contém os aspectos técnicos e financeiros que são de suma importância para a escolha do sistema que mais se adapta às necessidades da empresa. A seguir estão apresentados em abelast o resultado da busca de mercado realizada.

Na Tabela 2 estão dispostos os modelos dos sensores contemplando sua tecnologia, faixa de medição de temperatura, precisão e se existe a função de *datalogger* (Instrumento de registro de dados).

Tabela 2 - Informações técnicas dos sensores

Fabricante	Sensor	Tecnologia	Faixa de medição	Erro Máximo	Datalogger
Phave IV Engineering Inc	Thin Micro-RFID	SAW	0 a 145 °C	$\pm 0,5$ °C $\pm 1,0$ °C	Sim
Sensor All senses	TSA EVO1	SAW	-25 a 150 °C	$\pm 2,0$ °C	Não
Sensor All senses	TSA TA42	SAW	-15 a 165 °C	$\pm 2,0$ °C	Não
Farsens	EVAL01-Pyros-RM-0373	NTC	-25 a 105 °C	$\pm 0,5$ °C	Não
RF Micron	RFM3250 RFM3254 RFM3200	RFID	-40 a 85 °C	$\pm 0,3$ °C $\pm 1,0$ °C	Sim
Environetix	EVHT-100	SAW	150 °C & 900 °C	$\pm 5,0$ °C	Não

Tabela 3 é mostrada informação sobre a aplicação do sistema, contemplando ou não a aplicação em máquinas elétricas rotativas.

Tabela 3-Informação da aplicação dos sensores

Modelo	Informações
Thin Micro-RFID	Não há informação específica sobre aplicação em máquinas elétricas girantes Aplicação em dispositivos mecânicos rotativos Linhas de alta tensão para a versão UHF
TSA EVO1	Sensor de temperatura da superfície Operação sob campos eletromagnéticos elevados, alta corrente e alta tensão Fixação sem fio e modular para instalação fácil e rápida. Sem bateria, sem manutenção
TSA TA42	Projetado para monitoramento de temperatura em equipamentos industriais É adequado para aplicações em rotação e em ambientes hostis
EVAL01-Pyros-RM-0373	Não há informação específica sobre aplicação em máquinas elétricas rotativas
RFM3250 RFM3254 RFM3200	Não há informação específica sobre aplicação em máquinas elétricas rotativas Aplicação sobre metal
EVHT-100	Operação em superfícies estáticas e rotativas em ambientes hostis

A Tabela 4 apresenta as informações sobre o protocolo de comunicação do leitor para cada sistema.

Tabela 4-Informação sobre a comunicação do leitor

Fabricante	Leitor	Comunicação
Phave IV Engineering Inc	Micro-T RFID Data Logger Reader	USB
Sensor All senses	HTR02-2AWS Radio-Frequency Transceiver	Modbus-RTU sobre RS-485
Farsens	Impinj R220 UHF RFID Reader	RS-232
RF Micron	RFM5117-A	RS-485/Modbus sobre RJ45
Environetix	Environetix Reader	USB

As tabelas a seguir apresentam informações referentes ao preço de mercado dos dispositivos. Grande parte dos produtos possuem preços nos sites dos fabricantes ou revendedores, em outros, porém, é necessário entrar em contato com a empresa e solicitar um orçamento. A Tabela 5 lista o preço dos sensores. Os campos

preenchidos com “Sob demanda” significam que o contato deve ser realizado com a empresa e o preço do produto não está acessível via *website*.

Tabela 5-Preços dos sensores de temperatura

Fabricante	Sensor	Preço
Phave IV Engineering Inc	Micro-T RFID	US\$ 625,00
Sensor All senses	TSA EV01	Sob demanda
Sensor All senses	TSA TA42	Sob demanda
Farsens	EVAL01-Pyros-RM-0373	US\$ 50,00
RF Micron	RFM3250	US\$ 19,45
RF Micron	RFM3254	US\$ 17,96
RF Micron	RFM3200	Sob demanda

A Tabela 6 lista o preço dos leitores utilizados nos seus respectivos sistemas.

Tabela 6-Preço dos leitores

Fabricante	Leitor	Preço
Phave IV Engineering Inc	Micro-T RFID Data Logger Reader	US\$ 1,700,00
Sensor All senses	HTR02-2AWS Radio-Frequency Transceiver	Sob demanda
RF Micron	RFM5117-A	US\$ 2.394,00

A Tabela 7 lista o preço dos sistemas montados (kits). Esses kits contém todos os elementos necessários para a instalação e operação do sistema, desde sensores, leitores, antenas se necessário e *software*.

Tabela 7-Preço dos kits de medição de temperatura

Fabricante	Kit	Preço
Phave IV Engineering Inc	Kit 3 Sensores, leitor e software	US\$ 3.965,00
Sensor All senses	S2 CB-Monitoring System for Circuit Breaker	Sob demanda
Farsens	Kit 3 sensores, leitor, 2 antena	1.869,00 €
RF Micron	RFM5104-A Predictive Maintenance System	US\$ 2.698,00
Environetix	EVHT-100 Wireless Temperature System	Sob demanda

3.2 DEFINIÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO

A partir da busca técnico-comercial realizada ao longo do estudo, foi iniciado a escolha pelo sistema que mais se adapta às especificações técnicas e financeiras. Dentre os sensores e sistemas estudados, uma das possíveis escolhas é o sistema da Farsens, composto pelo sensor EVAL01-Pyros-RM-0373. Muito embora o sensor não atenda na sua totalidade a restrição de temperatura requerida pela empresa, o sensor do tipo NTC pode ser substituído por um modelo com uma faixa de temperatura maior, possibilitando a operação na faixa de temperatura requerida.

O leitor utilizado, é o do kit de desenvolvimento disponível no site, o Impinj R220 UHF RFID *reader*, ou como indicado pelo representante, qualquer leitor com tecnologia adequada para estabelecer conexão com o sensor.

Outra opção disponível no mercado é o sistema EVHT-100 Wireless Temperature Sensor System da empresa Environetix. Este sistema atende as especificações de temperatura de medição e é adequado para aplicações em ambientes com condições severas, além de serem utilizados em superfícies metálicas rotativas.

O sistema da RF Micron, poderia ser uma opção a ser utilizada, uma vez que, atendia muitos dos requisitos técnicos requeridos. No entanto, além do custo, a faixa de temperatura no qual os sensores operavam não atendia as especificações mínimas para a aplicação.

Tabela 8 apresenta um comparativo entre as soluções encontradas, mostrando um indicativo de atendimento dos itens apresentados anteriormente, sendo indicado vermelhão atendimento total, parcial e não atendimento . A partir dela, a tarefa de escolha da tecnologia e posteriormente do sistema se tornam mais fácil.

Tabela 8 - Comparativo entre as opções de sistemas elencados para utilização no projeto

Fabricante	Sensor	Faixa de medição	Erro máximo	Datalogger	Comunicação
Phave IV Engineering Inc	Thin Micro-RFID	Atende Parcial	Atende Totalmente	Atende Totalmente	Não Atende
Sensor All senses	TSA EVO1	Atende Parcial	Atende Totalmente	Atende Parcial	Atende Totalmente
Sensor All senses	TSA TA42	Atende Parcial	Atende Totalmente	Atende Parcial	Atende Totalmente
Farsens	EVAL01-Pyros-RM-0373	Não Atende	Atende Totalmente	Atende Parcial	Não Atende
RF Micron	RFM3250 RFM3254 RFM3200	Não Atende	Atende Totalmente	Atende Totalmente	Atende Totalmente
Environetix	EVHT-100	Atende Totalmente	Não Atende	Atende Parcial	Não Atende

Com base nos dados apresentados anteriormente, fica evidente que nenhum dos sistemas atende por completo as condições de contorno desejadas. No entanto, é importante enfatizar a importância dos critérios de faixa de medição e erro máximo, uma vez que, esses são os critérios mais críticos para a aquisição do sistema.

Desse modo, a opção da Farsens é, dentre todas, a mais indicada. Embora o sensor que o fabricante disponibiliza junto ao sistema, não atenda a restrição de temperatura, a troca do mesmo, por um modelo com uma faixa de temperatura mais abrangente e a instalação da eletrônica do sistema em local de menor temperatura, seria uma alternativa para contornar este problema. Dessa forma, o sistema poderia operar na faixa de temperatura desejada e seria a opção escolhida dentre as opções levantadas.

Caso, a troca do sensor e a existência de um local com temperatura igual ou menor do que a suportável pela eletrônica do sistema da Farsens forem inviáveis, uma alternativa seria abrir mão do erro máximo de ± 2 °C, podendo utilizar o sistema da Environetix, que embora apresente uma precisão de ± 5 °C, atende completamente a restrição de temperatura.

3.3 RECOMENDAÇÕES FINAIS

Com base nas tratativas com a empresa Automatic e o levantamento técnico comercial apresentado, o sistema proposto deve possuir as características indicadas:

Recomenda-se a utilização do sistema da Farsens;

Pelo não atendimento da restrição da faixa de temperatura do sensor conforme apresentado nas seções anteriores, sugere-se a troca do sensor do kit, modelo NTCAIMME3C90373 pelo NTCLG100E2, de mesma fabricante.

Este sensor opera em uma faixa de temperatura de -40 °C a + 200 °C com um erro máximo de 1,3 % utilizando um NTC de 10 k Ω .

O leitor, modelo Impinj Speedway Revolution R220 UHF RFID Reader (também do kit), apresenta comunicação serial RS-232, possuindo duas antenas.

O preço de mercado deste kit é 1.869,00 € segundo consta no site do representante comercial.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho permitiu um melhor entendimento sobre técnicas possíveis para monitoramento da temperatura em rotores de máquinas elétricas rotativas. O objetivo maior é prover informação sobre a temperatura da máquina, auxiliando na tomada de decisão sobre seu estado de funcionamento.

A partir do levantamento bibliográfico foi possível identificar metodologias e as tecnologias utilizadas em diversas frentes de trabalho. Verificou-se alguns métodos utilizados em distintos padrões utilizados nacional e internacionalmente. A partir

dessas normas foram verificados limites de temperatura a serem atendidos, pontos de medição adotados, dentre alguns métodos utilizados para medição de temperatura.

Com o estudo de artigos científicos foi possível reunir os procedimentos mais relevantes utilizados na academia, agrupando diferentes metodologias, técnicas e tecnologias utilizadas.

Com o estudo de patentes foram verificadas as soluções adotadas na indústria. Dessa forma, foram abordadas algumas soluções para problemas de extrema relevância para a indústria, documentados em forma de patente.

O levantamento técnico-financeiro possibilitou conhecer as tecnologias disponíveis no mercado nacional e internacional, possibilitando a escolha do sistema que mais se adaptasse às especificações da empresa. No entanto, alguns procedimentos estabelecidos pelos representantes dificultaram a comunicação entre as partes, impossibilitando o andamento de algumas negociações, tais como envio de formulários para preenchimento das especificações do sistema como um todo como requisito para a continuidade da negociação, sendo que após o envio deste documento, preenchido com as informações conhecidas, não foi obtida resposta por parte do representante. A falta de informações mais claras nos sites e folha de dados, como aspectos técnicos, construtivos, preços dificultaram e muito o contato e continuidade das negociações.

Com base em todos os estudos feitos, com as tratativas com a Automatic e com as especificações técnicas e orçamentação de soluções de mercado foi possível apresentar soluções para serem utilizadas no projeto, como os sistemas Farsens e Environetix. Entretanto, a aquisição dos dispositivos para testes em bancada não foi possível devido à restrição financeira.

Cabe ressaltar a importância de se realizar um projeto em parceria com a indústria. Neste trabalho, a empresa parceira Automatic pode apresentar suas demandas. Juntos, Automatic e IFSC, buscaram soluções que atendam as suas necessidades. O relacionamento entre uma instituição de ensino e a indústria é de grande relevância, trazendo benefícios para ambas as partes. Por parte da instituição de ensino, o objetivo maior é incentivar os discentes à iniciação científica aplicada, resolvendo problemas da indústria.

Sugestões para trabalhos futuros:

- continuar a busca por diferentes tecnologias de sensores para medição de temperatura, de forma a manter atualizado o presente texto;
- expandir a busca por mais fornecedores de sensores e sistemas de medição;
- efetivar a compra dos sensores e demais dispositivos;
- testar o sistema proposto em ambiente controlado, como o laboratório de máquinas elétricas do DAE/IFSC;
- testar o sistema proposto em ambiente real, como no processo fabril da Automatic;
- Realizar uma análise econômica para avaliar a viabilidade da implantação do sistema proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUTOMATIC. A Automatic - Histórico da Empresa. 2018. Disponível em: <<http://www.automatic.com.br/br/index.html>>. Acesso em: 16 dez. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5052**: Máquina síncrona - Ensaio. Rio de Janeiro: Abnt, 1984. 70 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5117**: Máquinas elétricas girantes - Máquina síncrona - Especificação. Rio de Janeiro: Abnt, 2007. 56 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094-1**: Máquinas elétricas girantes - Motores de indução- Parte 1: Trifásicos. Rio de Janeiro: Abnt, 2008. 73 p.

BINDER, Alfred e FACHBERGER, René. **Wireless SAW temperature sensor system for high-speed high-voltage motors**. IEEE Sensors Journal, v. 11, n. 4, p. 966–970, 2011.

COLBY, Roy S. e GAO, Zhi e TURNER, Larry. **Method and apparatus for estimating induction motor rotor temperature**. . USA: [s.n.]. Disponível em: <[https://patents.google.com/patent/US20090284204A1/en?q=US20090284204A1+](https://patents.google.com/patent/US20090284204A1/en?q=US20090284204A1+>)>. , 2010

CONRAD, Armin. **Device for contactless measurement of rotor temperatures**. . USA: [s.n.]. Disponível em: <[https://patents.google.com/patent/US7575372B2/en?q=US7575372B2+](https://patents.google.com/patent/US7575372B2/en?q=US7575372B2+>)>. , 2005

DYMOND, James H. e ONG, Raymond e STRANGES, Nick. **Instrumentation, testing, and analysis of electric machine rotor steady-state heating**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 38, n. 6, p. 1661–1667, 2002.

FITZGERALD A. E. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7ª ed. Porto Alegre: [s.n.], 2014.

FRANÇA, Fernando A. **INSTRUMENTAÇÃO E MEDIDAS : grandezas mecânicas**. São Paulo: [s.n.], 2007.

GANCHEV, Martin e UMSCHADEN, Hubert e KAPPELER, Hansjoerg. **Rotor temperature distribution measuring system**. IECON Proceedings (Industrial

Electronics Conference), p. 2006–2011, 2011.

GERHARD, Trenkler e MAIER, Reinhard. **Anordnung zur Messung der Wicklungstemperatur von elektrischen Maschinen**. . Deutschland: [s.n.]. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/EP0414052A1/en?q=EP0414052A1+>>. , 1991

KILMAN, Gerald e DYMOND, James. **Sensorless estimation of rotor temperature in induction motors**. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US6042265A/en?q=US6042265A++>>. , 2000

LYNN, C. **Effects of Temperature on Mechanical Performance of Rotating Electrical Machinery**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 58, n. 10, 1939.

MEDEIROS, Carolina Brum. **Avaliação de sensor saw de temperatura**. p. 157, 2009.

MEKJAVIC, I B e colab. **Thermal monitoring system**. p. 421–423, 1996.

RAI, Mandar e NAIR, Purushothaman e PULLURI, Annapurna. **Real time measurement of rotor surface**. . USA: [s.n.]. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US20120075070A1/en?q=US+2012%2F0075070+A1+>>. , 2012

SEBASTIAN, San e colab. **A robust , -40 ° to + 150 ° C wireless rotor temperature monitoring system based on a fully passive UHF RFID sensor tag 1 CEIT and Tecnun (University of Navarra)**, Manuel Lardizabal. p. 1–3, 2014.

SMARTEC. **SMT16030 DIGITAL TEMPERATURE SENSOR**. v. 31, n. 0, p. 1–7, 2005.

SMITH, F. **Temperature measuring system for rotating machines**. 1997. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US3824857A/en?q=US3824857A++>>.

DEL TORO, Vincent . **Fundamentos de Máquinas Eléctricas**. Ney Jersey: LTC, 2011.

吴德会 e colab. **High speed rotating permanent magnetism synchronous electric machine rotor temperature distribution measuring method**. . China: [s.n.]. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/CN101275871A/en?q=CN101275871A+++++>>. ,

2010

王宏远 e colab. **Generator rotor temperature wireless measurement device.** .

China: [s.n.]. Disponível em:

<<https://patents.google.com/patent/CN106949982A/en?q=CN106949982A+>>. ,

2017

贺德强 e 刘旗扬 e 苗剑. **Permanent-magnet synchronous motor rotor surface**

temperature measurement device. . China: [s.n.]. Disponível em:

<<https://patents.google.com/patent/CN106208542A/en?q=CN106208542A+++>>. ,

2016