

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

EDUARDO DE ANDRADE NOGUEIRA

**REDE DE SENSORES SEM FIO PARA O
MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

EDUARDO DE ANDRADE NOGUEIRA

**REDE DE SENSORES SEM FIO PARA O
MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em engenharia elétrica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Goedel
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduardo de Andrade Nogueira

Rede de sensores sem fio para o monitoramento de máquinas elétricas

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:30hs do dia 20/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedtel - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Danilo Hernane Spatti - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Marcos Banheti Rabello Vallim - (Membro)

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a minha família pelo apoio em todos momentos da minha vida e por estar sempre ao meu lado nos momentos bons e ruins.

Agradeço aos meus amigos que me acompanharam durante toda a graduação, a tornando muito mais leve.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Alessandro Goedtel e coorientador Prof. Dr Marcelo Favoretto Castoldi por ter me guiado no decorrer deste trabalho com toda experiência e sabedoria.

Agradeço aos órgãos e agência de fomento a pesquisa que apoiam o Laboratório de Sistema Inteligentes – LSI, Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná processo (38406/56093-3) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq processos (474290/2008-3825, 473576/2011-2, 552269/2011-5, 307220/2016-8).

Enfim, obrigado a todos que me apoiaram ao longo dessa etapa da minha vida.

RESUMO

NOGUEIRA, E. A. **Rede de sensores sem fio para o monitoramento de máquinas elétricas**. 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Neste trabalho são discutidos o funcionamento e as aplicações das redes de sensores sem fio trazendo três abordagens possíveis: Estrela, Retransmissão única dos pacotes recebidos e o Mapeamento de caminhos por nós vizinhos, e a legislação vigente que regulamenta a comunicação sem fio. Em seguida é proposto e desenvolvido uma rede de sensores sem fio para o monitoramento de máquinas elétrica. Por fim são apresentados os resultados dos testes para validação da rede implementada.

Palavras-chave: Redes de sensor sem fio, Monitoramento de máquinas elétricas, Falhas em máquinas elétricas.

ABSTRACT

NOGUEIRA, E. A. **Wireless sensor network for monitoring electrical machines** 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

This paper discusses the operation and applications of wireless sensor networks bringing three possible approaches: Star, Single retransmission of received packets and the Mapping of paths by neighboring nodes, and the current legislation that regulates wireless communication. Next, a wireless sensor network for the monitoring of electrical machines is proposed and developed. Finally, the results of the tests for validation of the implemented network are presented.

Keywords: Wireless sensor network, Electrical machines monitoring, Failures on electrical machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Canais do espectro de 2.4GHz IEEE 802.11.....	19
Figura 2	Princípio de funcionamento das redes de sensores sem fio.....	22
Figura 3	Princípio de uma rede estrela.....	24
Figura 4	Cenário típico de comunicação.....	26
Figura 5	Bancada de testes.....	32
Figura 6	Diagrama de blocos da bancada de testes.....	33
Figura 7	Circuito elétrico da fonte de alimentação.....	33
Figura 8	Fonte de alimentação.....	34
Figura 9	Diagrama de blocos do condicionamento de corrente.....	36
Figura 10	Placa de condicionamento de corrente.....	37
Figura 11	Forma de onda da saída da placa de condicionamento de corrente....	37
Figura 12	Diagrama de blocos do condicionamento de tensão.....	38
Figura 13	Placa de condicionamento de tensão.....	38
Figura 14	Forma de onda da saída da placa de condicionamento de tensão.....	39
Figura 15	Sensor de temperatura.....	40
Figura 16	ESP8266/NodeMCU.....	41
Figura 17	Motor de indução trifásico.....	42
Figura 18	Diagrama de blocos do estágio de mapeamento dos caminhos.....	43
Figura 19	Diagrama de blocos do estágio de transmissão dos dados.....	44
Figura 20	Diagrama de blocos do estágio de recepção dos dados.....	44
Figura 21	Diagrama de blocos da armazenagem dos dados.....	45
Figura 22	Dados recebidos com três repetições.....	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Classificação das ondas eletromagnéticas pela frequência.....	16
Quadro 2	Distribuição de algumas faixas de frequência no Brasil.....	18
Quadro 3	Regulamentação dos canais do espectro de 2.4GHz IEEE 802.11....	19
Quadro 4	Evolução da rede de sensores.....	23
Quadro 5	Mapeamento dos caminhos.....	28
Quadro 6	Característica das abordagens.....	29
Quadro 7	Dados técnicos / MCP3008.....	35
Quadro 8	Dados técnicos / LM35.....	39
Quadro 9	Dados técnicos / ESP8266.....	40
Quadro 10	Dados técnicos / Motor WEG.....	41
Quadro 11	Parâmetros da bancada de testes.....	45
Quadro 12	Intensidade do sinal sem repetição.....	46
Quadro 13	Intensidade do sinal com um repetidor.....	47
Quadro 14	Intensidade do sinal com dois repetidores.....	48
Quadro 15	Intensidade do sinal com três repetidores.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS

RSSF	Redes de sensores sem fio
TC	Transformador de Corrente
VLF	<i>Very Low Frequency</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
HF	<i>High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i>
WPA	<i>Wireless Protected Access</i>
TKIP	<i>Temporary Key Integrity Protocol</i>
WPA2	<i>Wireless Protected Access v2</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WNAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>
MEMS	<i>Micro Electro-Mechanical Systems</i>
C1RSSF	Categoria 1 de rede de sensores sem fio
C2RSSF	Categoria 2 de rede de sensores sem fio
A/D	Analógico digital
CSV	<i>Comma Separated Value</i>

LISTA DE SIGLAS

SOSUS	<i>Sound Surveillance System</i>
AWACS	<i>Airborne Warning and Control System</i>
DSN	<i>Distributed Sensor Networks</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Avanço histórico das redes de sensores	11
1.2 Falha em máquinas elétricas	12
1.3 Motivação	13
1.4 Objetivo Geral	14
1.5 Objetivos Específicos	14
1.6 Estrutura do texto	15
2 COMUNICAÇÃO SEM FIO	16
2.1 Padrão IEEE 802.11	16
2.2 Alocação da faixa de frequência	17
2.2.1 Canais IEEE 802.11	18
2.3 Protocolos de segurança	20
2.4 Classificação das tecnologias de comunicação sem fio	20
3 REDE DE SENSORES SEM FIO	22
3.1 Evolução do Hardware	22
3.2 Categorias de redes de sensores sem fio	23
3.3 Abordagens de comunicação	24
3.3.1 Rede estrela	24
3.3.2 Retransmissão única dos pacotes recebidos	25
3.3.3 Mapeamento de caminhos por nós vizinhos	27
3.3.4 Conclusão das abordagens	29
3.4 Composição de uma rede de sensores sem fio	30
4 IMPLEMENTAÇÃO DA REDE DE SENSORES SEM FIO	32
4.1 Hardware	33
4.1.1 Fonte de alimentação	33
4.1.2 Sensoriamento	34
4.1.2.1 Conversor analógico digital	34
4.1.2.2 Aquisição das medidas de corrente	35
4.1.2.3 Aquisição das medidas de tensão	38
4.1.2.4 Aquisição da medida de temperatura	39
4.1.3 Microcontrolador e Radio – ESP8266	40
4.1.5 Motor de indução trifásico	41
4.2 Software	42

4.2.1 Estrutura do código sensor	42
4.2.1.1 Mapeamento dos caminhos para os dados.....	42
4.2.1.2 Transmissão dos dados	43
4.2.2 Estrutura do código mestre	44
4.2.3 Estrutura do código armazenagem dos dados.....	44
4.3 Montagem da bancada de testes	45
5 TESTES.....	46
5.1 Testes sem repetição.....	46
5.2 Testes com repetição.....	47
5.2.1 Uma repetição	47
5.2.2 Duas repetições	48
5.2.3 Três repetições.....	49
5.3 Testes com múltiplos sensores sem repetição.....	50
5.3.1 Dois sensores	50
5.3.2 Três sensores	50
5.4 Resultado das análises.....	51
5.4.1 Análise da consistência dos dados	51
5.4.2 Análise da perda dos dados.....	52
6 CONCLUSÃO.....	53
6.1 Possibilidades de trabalhos futuros.....	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias de comunicação sem fio, foi possível o desenvolvimento das redes conhecidas como *multi-hop* através das quais conseguem ampliar o alcance das transmissões dos sensores, retransmitindo os dados coletados por meio dos nós vizinhos. Sua vantagem é a facilidade de expansão, possibilidade de instalação em locais de difícil acesso e o baixo custo de implantação (CARDOSO, et.al., 2012).

As Redes de Sensores Sem Fio RSSF são compostas por pequenos sensores denominados nós, que possuem como objetivo, realizar o sensoriamento da planta ou ambiente, bem como transmitir e retransmitir os dados dos demais sensores, possibilitando desta forma ampliar o alcance de transmissão.

O desenvolvimento das RSSF teve seu início na década de 1950 onde seu principal objetivo era para fins militares, sendo os Estados Unidos, um líder de conhecimento na área. Atualmente, esta tecnologia vem sendo utilizada também para outros fins não militares, tais como:

- **Aplicação em segurança:** Segundo Hills (2001), utilizando sensores acústicos, vídeo e movimento é possível monitorar locais críticos como usinas e centros de comunicação contra um possível ataque;
- **Aplicação médica:** A aplicação das redes de sensores na medicina foi exposta no trabalho de Jafari (2005), onde uma rede de sensores foi utilizada para monitorar as funções vitais dos pacientes internados, dentre elas, pressão arterial, temperatura, batimento cardíaco e movimentação por meio de sensores piezoelétricos (AMINIAN, et al., 2013);
- **Aplicação ambiental:** No tocante ao monitoramento do ambiente natural existem diversas aplicações para as redes de sensores sem fio, tais como: o monitoramento e rastreamento de animais no seu habitat, detecção de incêndio florestal, monitoramento de desastres ambientais como vulcões, etc (MARTINCIC; SCHWIEBERT, 2005 apud RODRIGUES, 2011);
- **Monitoramento climático:** Uma outra aplicação das redes de sensores sem fio é o monitoramento climático, dispondo os sensores

em uma grande área para previsão de variações climáticas (OTHMAN, et al., 2012);

- **Aplicação agrícola:** A utilização das redes de sensores sem fio na agricultura tem como o principal objetivo aumentar a qualidade e a produtividade (MORE; et al., 2016). As referidas redes são usadas para a coleta de dados tais como: umidade e nutrientes presentes no solo, bem como os dados climáticos, viabilizando o manejo inteligente da plantação e concorrendo, desta forma, em uma maior qualidade e produtividade (BENAVENTE 2010);
- **Monitoramento do trânsito:** Segundo Sohraby (2007), uma outra aplicação das redes de sensores sem fio consiste no monitoramento das situações de tráfego em rodovias, assim como a qualidade do ar por meio da coleta de dados, tais como: quantidade de CO₂ e CO, velocidade dos veículos, volume e densidade nas pistas a cada 60 segundos.

1.1 Avanço histórico das redes de sensores

Segundo Chong e Kumar (2003), a história das redes de sensores pode ser dividida em quatro fases, sendo o seu principal desenvolvimento motivado para fins bélicos.

O primeiro uso de uma rede de sensores semelhante às redes atuais foi na década de 1950, no período da guerra fria, através do projeto SOSUS - *Sound Surveillance System* (Sistema de Vigilância de Som), desenvolvido pelo exército dos Estados Unidos com o intuito de interceptar submarinos soviéticos, através da utilização de sensores acústicos submersos nos oceanos Atlântico e Pacífico. Tal sistema, atualmente é utilizado pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional para fins pacíficos, monitoramento da vida marinha e de atividades sísmicas. Ainda, no mesmo período, o projeto AWACS - *Airborne Warning and Control System* (Sistema Aéreo de Alerta e Controle), distribuiu pela América do Norte uma série de aviões que funcionavam como sensores, com o objetivo de defesa aérea.

No início da década de 1980, através do projeto DSN - *Distributed Sensor Networks* (Rede Distribuída de Sensores), conduzido pela DARPA - *Defense Advanced Research Projects Agency* (Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de

Defesa), marcou o início das pesquisas das redes de sensores modernas. A DSN tinha como objetivo determinar a possibilidade de se utilizarem os recém inventados, TPC-IP e ARPAnet, para comunicação de rede de sensores. Na ocasião, a ARPAnet encontrava-se operando com duzentos usuários em centros de pesquisa e universidades e conectou os nós sensores a referida rede. Desta forma, a informação destes sensores seria encaminhada para quem fosse fazer o melhor uso da informação.

Os pesquisadores da Universidade de Carnegie Mellon (CMU), focaram em desenvolver um sistema operacional chamado Accent, tendo como objetivo a flexibilidade e tolerância a falhas para as redes de sensores. Posteriormente, o Accent evoluiu no sistema operacional Mech, que teve uma maior receptividade comercial.

Nas décadas de 1980 a 1990, com os estudos desenvolvidos pelo projeto DSN, o exército dos Estados Unidos focou em desenvolver uma rede de sensores que se tornou componente fundamental de guerra, possibilitando o engajamento cooperativo das tropas. Graças a informação que era compartilhada com os soldados, oriundas dos sistemas de rastreamento aéreo e terrestre, era possível saber informações importantes a respeito da movimentação do inimigo em campos de batalha.

Com os avanços nas tecnologias de comunicação e processamento através das redes sem fio baseadas no protocolo IEEE 802.11b/n/g, dentre outras tecnologias sem fio, tais como, Bluetooth, ZigBee, nRF24 e WiMax, tornou-se possível a redução no custo e o aumento na eficiência dos nós de sensores, resultando na utilização desta tecnologia em diversas áreas do conhecimento, não ficando o uso de tal tecnologia restrito aos militares.

1.2 Falha em máquinas elétricas

As máquinas elétricas são peças fundamentais na indústria na conversão eletromecânica da energia. Dentre estas máquinas destacam-se os motores de indução trifásico, por serem robustos e possuírem uma construção simples. Segundo Trzynadlowski (2001), estas máquinas compõem cerca de 90% dos motores utilizados na indústria.

Todos dispositivos elétricos estão sujeitos a falhas e as máquinas elétricas não constituem uma exceção. Suas falhas podem concorrer para a interrupção de

uma linha de produção podendo trazer prejuízo e comprometer a segurança do ambiente em que está operando (BRAHIM, et al., 2016).

A distribuição das falhas nos motores de indução trifásico, segundo Bellini (2008), ocorre na razão de: 69% relacionado ao rolamento, 21% ao enrolamento do estator, 7% a barra do rotor e 3% ao eixo/acoplamento.

O monitoramento dos motores em tempo real, na indústria, geralmente é realizado por meio da utilização de sinais de vibração, corrente e temperatura, coletados por sensores junto a ela e transmitidos através de cabos (KORKUA, et al., 2010). Fazendo uso de diversos algoritmos é possível estimar falhas, como por exemplo, nas bobinas do estator, nas barras do rotor e rolamento danificado (LU, et al., 2005). Assim, com a possibilidade de diagnosticar a falha na máquina elétrica antes da parada total da máquina é possível planejar a manutenção do equipamento, prevenindo assim paradas inesperadas, e conseqüentemente, aumentar sua confiabilidade e facilidade de manutenção (HABETLER, et al., 2002).

1.3 Motivação

Atualmente, o principal meio de transmissão dos dados de monitoramento de máquinas é realizado por meio de cabos, que implica num custo elevado na implantação e numa manutenção constante na infraestrutura de cabeamento dentro da indústria (KORKUA, et al., 2010).

O desenvolvimento das redes de sensores, permitiu a expansão do seu uso para as mais diversas áreas do conhecimento, possibilitando uma alternativa confiável e de baixo custo. Assim viabiliza-se a coleta e o monitoramento de dados de um grande número de pontos em uma grande área e em ambientes remotos de difícil acesso.

A busca por qualidade e segurança impulsionou o desenvolvimento de formas de identificação de falhas com o intuito de prevê-las, para que não venham a causar danos ou interromper a produção. No Brasil, os investimentos relacionados a manutenção preditiva passaram de 16,48% para 18,82%, enquanto que, no mesmo período, os investimentos com manutenção corretiva tiveram uma redução de 32,10% para 30,86% (ABRAMAM; 2013 apud. GODOY, W. F.; et al. 2015, 2016 (a), (b)). Estes dados sinalizam a tendência da indústria em investir na manutenção preditiva, evitando, desta forma, falhas inesperadas que resultariam em prejuízo tanto à

empresa quanto a seus acionistas, garantindo ainda, uma maior segurança aos que estão em contato direto com a máquina. Entretanto é necessário manter o monitoramento constante do estado de suas máquinas (KORKUA, et al., 2010).

Portanto, a utilização das redes de sensores sem fio no contexto deste trabalho consiste em monitorar o funcionamento das máquinas elétricas que estão operando em campo, muitas vezes em locais de difícil acesso, distante de uma central, ou até mesmo sem acesso a qualquer conexão de rede de dados. Em tais situações, a utilização de uma rede de sensores sem fio possibilitaria a identificação de falhas e uma rápida atuação caso necessário, reduzindo assim as falhas inesperadas e aumentando a confiabilidade da produção.

1.4 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho consiste em desenvolver uma rede de sensores sem fio, viabilizando a obtenção de dados do funcionamento de máquinas elétricas sem a necessidade de desenvolver e manter uma infraestrutura de cabos para transmissão dos dados.

1.5 Objetivos Específicos

Os objetivos deste trabalho consistem em monitorar as variáveis de funcionamento das máquinas elétricas com o intuito de viabilizar a identificação de falha nas mesmas. Para isso temos com objetivos específicos:

- Estudar sobre as redes de sensores sem fio e falhas em máquinas elétricas;
- Projetar e implementar uma rede de sensores sem fio envolvendo as seguintes atividades:
 - Implementar o hardware para o condicionamento de sinal de tensão e corrente;
 - Desenvolver uma interface para a coleta dos dados de tensão, corrente e temperatura no domínio do tempo;
 - Desenvolver o software para transmissão de dados multiponto;

- Desenvolver uma interface para análise e armazenamento dos dados em um computador.
- Validação da rede de sensores sem fio por meio de testes diversas situações de operação analisando:
 - Consistência dos dados;
 - Perda de dados.

1.6 Estrutura do texto

O Capítulo 2 tem como objetivo fornecer uma breve introdução sobre comunicação sem fio e uma análise da legislação vigente no Brasil, bem como apresentar o padrão de comunicação e o protocolo de segurança utilizado pelo módulo sem fio.

No Capítulo 3 é apresentado o conceito de rede de sensores sem fio e suas possíveis abordagens, bem como a estrutura de hardware básica de um nó em uma rede de sensores sem fio.

O Capítulo 4 trata dos aspectos construtivos da RSSF implementada, primeiramente descrevendo o hardware implementado para a alimentação, condicionamento de sinal de tensão e corrente, e os módulos de processamento e rádio. No fim do capítulo é abordado os aspectos relacionados ao software, sendo a estrutura apresentada em diagramas de blocos.

No Capítulo 5 é apresentado os testes da rede implementada baseando-se na análise da perda dos dados e da consistência dos dados, a fim de validá-la, no qual os testes realizados foram: Sem repetição, com múltiplas repetições e com diversos sensores.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões que puderam ser extraídas do estudo e da implementação de uma rede de sensores sem fio para o monitoramento de máquinas elétricas, e é apresentado uma perspectiva de trabalhos futuros.

2 COMUNICAÇÃO SEM FIO

Na comunicação sem fio é utilizado como meio de propagação da informação as ondas eletromagnéticas, que são uma perturbação nos campos elétrico e magnético (NUNES, 2012). Baseado na frequência com que essa perturbação ocorre podemos determinar o comprimento de onda conforme a equação 1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Onde λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz no vácuo e f é a frequência da onda eletromagnética. Assim tem-se a classificação das ondas eletromagnéticas conforme o Quadro 1:

Quadro 1 – Classificação das ondas eletromagnéticas pela frequência

Classificação das ondas eletromagnéticas pela frequência			
Nome	Abreviação	Frequências	Comprimento de onda
<i>Very Low Frequency</i>	VLF	9kHz – 30kHz	33km – 10km
<i>Low Frequency</i>	LF	30kHz – 300kHz	10km – 1km
<i>Medium Frequency</i>	MF	300kHz – 3MHz	1km – 100m
<i>High Frequency</i>	HF	3MHz – 30MHz	100m – 10m
<i>Very High Frequency</i>	VHF	30 MHz – 300 MHz	10m – 1m
<i>Ultra High Frequency</i>	UHF	300 MHz – 3 GHz	1m – 100mm
<i>Super High Frequency</i>	SHF	3 GHz – 30 GHz	100mm – 10mm
<i>Extremely High Frequency</i>	EHF	30 GHz – 300 GHz	10mm – 1mm

Fonte: Nunes, R.R (2012)

2.1 Padrão IEEE 802.11

Em 1997, o IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, apresentou o padrão para redes sem fio denominado de IEEE 802.11 onde foi definido segundo o modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*) especificações que abrangem:

- Camada física, responsável pelo sinal físico utilizado na troca de informações, atuando no modo de transmissão e recepção do sinal físico que será utilizado para a transmissão dos dados, bem como a detecção da portadora;

- Camada de enlace, responsável por regular o fluxo de dados, realizar a detecção e correção de erros e fornecer os serviços para a camada de rede.

As redes baseadas no padrão IEEE 802.11 podem operar em dois modos: *ad hoc* e o modo de infraestrutura. A principal característica das redes *ad hoc* é a ausência de um coordenador central, permitindo a comunicação entre os nós. No modo infra estruturado tem-se a presença de um nó centralizador, chamado de ponto de acesso; sendo assim, diferente do modo *ad hoc*, não é possível a comunicação direta entre os nós, exigindo que toda a comunicação seja feita por meio do ponto de acesso.

A rede de sensores sem fio implementada opera no modo *ad hoc* onde não se faz necessário a presença de um nó centralizador, podendo a informação fluir por todos os nós.

2.2 Alocação da faixa de frequência

No Brasil, o órgão que fiscaliza e regulamenta todos os sistemas de telecomunicação é a ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações, criada em julho de 1997, pela Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997. Uma de suas atribuições é destinar as faixas de frequência do espectro eletromagnético para as diversas tecnologias e serviços. De forma resumida podem-se exemplificar como ocorre a alocação de parte do espectro de frequência conforme Quadro 2:

Quadro 2 – Distribuição de algumas faixas de frequência no Brasil

Faixa	Serviço
530kHz – 1600kHz	Rádio AM
54MHz – 70MHz	Televisão VHF – Canal 2 a 4
73MHz – 75,4MHz	Radio navegação aeronáutica
76MHz – 88MHz	Televisão VHF – Canal 5 e 6
88MHz – 108MHz	Rádio FM
136 MHz – 138 MHz	Satélites Meteorológicos
174 MHz – 216 MHz	Televisão VHF – Canal 7 a 13
433,05MHz – 434,79MHz	ISM
824 MHz – 894 MHz	Telefonia móvel
902 MHz – 928 MHz	ISM
2,4GHz – 2,5GHz	ISM
5,725GHz – 5,875GHz	ISM

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÃO (2010)

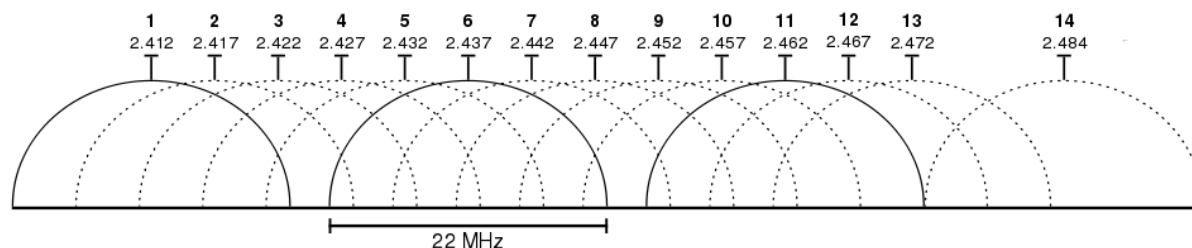
A RSSF proposta opera na frequência de 2,4GHz, que faz parte da faixa de frequência conhecida como ISM – *Industrial, Scientific and Medical*, estipulada pelo FCC – *Federal Communications Commission*. Em 1985 esta banda foi reservada mundialmente para o desenvolvimento industrial, científico e médico, não sendo necessária licença para operar nessas frequências. No Brasil, a faixa de frequência ISM é homologada pela ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações, em específico, por meio da Resolução de nº 365 de 10 de maio de 2004, onde de forma semelhante a norma da FCC não sendo necessário licença para operar nesta faixa de frequência.

A rede de sensores sem fio faz uso do padrão IEEE 802.11 na frequência de 2,4Ghz, estando em acordo com as normas internacionais e nacionais a RSSF pode operar nesta frequência.

2.2.1 Canais IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 citado na Seção 2.1, estabelece as especificações para camada física do modelo de referência OSI para a recepção e transmissão dos dados no meio. Uma das especificações é com relação a geração dos canais para comunicação, sendo prevista a divisão da banda de frequência de 2,4GHz em 14 canais com 22 MHz de largura de banda conforme Figura 1, possibilitando uma melhor utilização da banda de frequência.

Figura 1 – Canais do espectro de 2,4GHz IEEE 802.11



Fonte: Adaptado, DBELL (2016).

A comunicação pode ser feita em todos os 14 canais, mas como pode ser observado na Figura 1, tem-se a sobreposição dos canais o que resulta na redução da velocidade da troca de informações. Em alguns casos pode concorrer até na impossibilidade de estabelecer a comunicação, sendo assim os canais mais adequados para a transmissão são 1, 6, 11 e 14 por não haver sobreposição entre eles.

Nem todos os canais estão regulamentados pelos órgãos reguladores em determinados países, tal como a norma brasileira da ANATEL. De forma semelhante a FCC, permite operar na banda ISM nos canais de 1 ao 11. Outras regiões regulamentam a operação nos demais canais conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Regulamentação dos canais do espectro de 2,4GHz IEEE 802.11

Canal	Frequência (GHz)	Órgão regulador			
		FCC	ANATEL (Brasil)	ETSI (Europa)	Japão
1	2,412	X	X	X	X
2	2,417	X	X	X	X
3	2,422	X	X	X	X
4	2,427	X	X	X	X
5	2,432	X	X	X	X
6	2,437	X	X	X	X
7	2,442	X	X	X	X
8	2,447	X	X	X	X
9	2,452	X	X	X	X
10	2,457	X	X	X	X
11	2,462	X	X	X	X
12	2,467			X	X
13	2,472			X	X
14	2,484				X

Fonte: Adaptado, BERG, J.

2.3 Protocolos de segurança

Segundo Silex (2008) com o aumento da popularização da comunicação sem fio houve a necessidade de investimentos como forma de proteger os dados que estão trafegando em uma determinada rede.

O primeiro protocolo de segurança descrito pelo padrão IEEE 802.11 em 1999 foi o WEP - *Wired Equivalent Privacy* (Privacidade Equivalente com Fio) que se baseava no algoritmo de criptografia RC4, mas este protocolo de segurança se mostrou vulnerável a ataques, podendo o código de acesso ser quebrado em poucos segundos (LEHEMBRE, G. 2005).

Em 2003 o grupo Wi-Fi Alliance lançou um novo protocolo de segurança chamado de WPA - *Wireless Protected Access* (Acesso Sem Fio Protegido), trazendo vantagens em relação ao protocolo anterior WEP. O protocolo WPA faz uso do algoritmo de criptografia TKIP - *Temporary Key Integrity Protocol* (Protocolo de Integridade de Chave Temporária), que troca dinamicamente a chave de acesso que está sendo enviada, tornando muito mais difícil um ataque. Como desvantagem do protocolo WPA tem-se a incompatibilidade com o hardware antigo, uma sobrecarga do volume dos dados na rede bem como o aumento do tamanho dos pacotes enviados resultando numa transmissão mais longa.

Em junho de 2004, foi lançado o protocolo de segurança WPA2 – *Wireless Protected Access v2* (Acesso Sem Fio Protegido v2) e é atualmente o protocolo de segurança mais confiável e utilizado. A principal diferença com relação ao WPA é a forma de criptografia com os novos protocolos de criptografia o AES - *Advanced Encryption Standard* (Padrão de criptografia avançada) e CCMP - *Counter Mode with Cipher Block Chaining Message Authentication Code*.

2.4 Classificação das tecnologias de comunicação sem fio

Atualmente a comunicação sem fio tem um papel importante no transporte de informação no mundo. Segundo Bonifácio (2010), pode-se destacar a existência de quatro grandes grupos de tecnologia de comunicação sem fio:

- WPAN (*Wireless Personal Area Network*), compreendida por tecnologias sem fio de baixa taxa de transmissão e pequeno alcance

entre 10 e 100 metros. É utilizado para conectar dispositivos pessoais;

- WLAN (*Wireless Local Area Network*), Implementado como uma alternativa ou extensão das redes de cabeamento convencional, possuindo um alcance entre 100 e 300 metros;
- WNAN (*Wireless Metropolitan Area Network*), utilizado para acesso de banda larga em regiões metropolitanas, com alcance em torno de 6km;
- WWAN (*Wireless Wide Area Network*), utilizado para redes de longa distância com serviços de voz e dados de baixa velocidade.

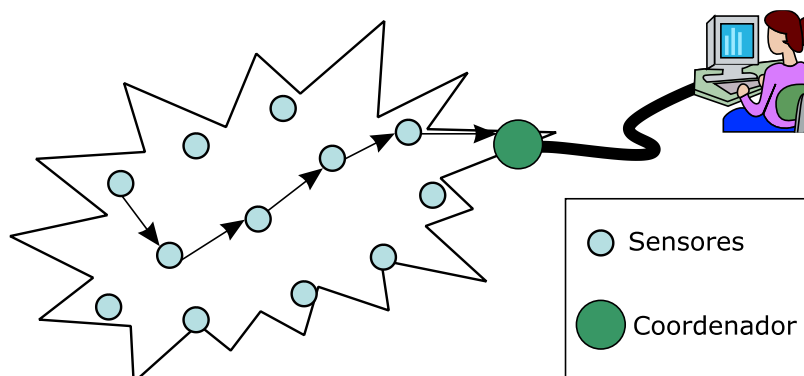
A maioria das redes de sensores sem fio operam no grupo WPAN, possuindo assim um baixo alcance, se considerarmos cada nó independentemente. Contudo, tais redes conseguem cobrir uma ampla área, visto que cada nó funciona como repetidor, aumentando seu alcance.

A rede de sensores sem fio desenvolvida está classificada no grupo WLAN devido ao padrão utilizado pelo módulo de rádio.

3 REDE DE SENSORES SEM FIO

Conforme já destacado anteriormente a principal característica das RSSF é a possibilidade de ampliar o alcance das transmissões dos sensores, retransmitindo os dados coletados pelos nós vizinhos conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Princípio de funcionamento das redes de sensores sem fio



Fonte: Adaptado LINS, T. (2015)

A possibilidade de ampliar o seu alcance por meio da retransmissão dos dados, faz com que as RSSF apresentem algumas vantagens em relação as redes baseadas em cabos, dentre elas podemos citar o baixo custo de implantação e facilidade de instalação.

3.1 Evolução do Hardware

O maior avanço na tecnologia dos sensores sem fio, segundo Loureiro (2002) foi impulsionada pelos avanços nas áreas de comunicação sem fio, microprocessadores e os microssistemas eletromecânicos (MEMS – *Micro Electro-Mechanical Systems*).

No início do desenvolvimento das RSSF, os nós, possuíam tamanho e peso elevado com uma eficiência muito baixa, sendo necessário grandes baterias ou até alimentação na rede elétrica. Porém, com os avanços, foi possível reduzir tanto o custo quanto o tamanho, além de trazer uma maior confiabilidade. A integração com outros tipos de sensores e principalmente a redução no custo dos nós possibilitaram a utilização das redes de sensores em outras áreas do conhecimento. O Quadro 4 resume de forma sucinta a evolução dos nós sensores ao longo da história.

Quadro 4 – Evolução da rede de sensores

	Primeira Geração (1980 – 1990)	Segunda Geração (Começo anos 2000)	Terceira geração (Fim dos anos 2000)
Tamanho	~ 30cm	~ 10cm	< 5cm
Peso	> 1Kg	~ 0.5Kg	Gramas
Arquitetura do nó	Desintegração de processamento comunicação e coleta de dados	Integração parcial de coleta processamento e comunicação	Integração completa, coleta, processamento e comunicação
Topologia	Ponto a ponto, Estrela, <i>Multi-hop</i>	Servidor-Cliente e <i>Peer to peer</i>	Completo <i>Peer to peer</i>
Fonte de alimentação	Baterias grandes ou linha elétrica	Baterias AA	Baterias ou energia fotovoltaica
Duração	Horas, dias	Dias a semanas	Meses a anos

Fonte: Adaptado. CHONG, C.; KUMAR, S. P. (2003)

Com a redução do custo e do consumo de energia, a integração com uma maior variedade de sensores e o aumento na confiabilidade dos nós, tornou-se viável a sua utilização para o monitoramento de máquinas elétricas no escopo desse trabalho.

3.2 Categorias de redes de sensores sem fio

Segundo Sohraby (2007), pode-se dividir as redes de sensores sem fio comerciais em duas categorias:

- Categoria 1 de rede de sensores sem fio (C1RSSF): Baseada numa rede com conexão *Multi-hop* entre os sensores sem fio, onde as informações são retransmitidas entre os nós, resultando num sistema que possui uma resposta dinâmica a variações, podendo estabelecer uma rota nova para a informação, caso ocorra alguma falha na comunicação, seja por interferência no sinal, seja em razão de perda de um nó. Tecnologias militares geralmente fazem o uso desta categoria de rede de sensores.

- Categoria 2 de rede de sensores sem fio (C2RSSF): Baseia-se em comunicação ponto a ponto e multiponto, na qual os nós comunicam-se diretamente com o mestre/coordenador ou com um repetidor pré-estabelecido. Em sua maioria, trabalham com um só salto, no caso, entre o sensor e o receptor. O monitoramento e o controle residencial geralmente fazem uso desta categoria de sensores sem fio.

O que diferencia as duas categorias são as suas abordagens, ou seja, a forma como lidam com a transmissão e retransmissão dos dados. A categoria 1

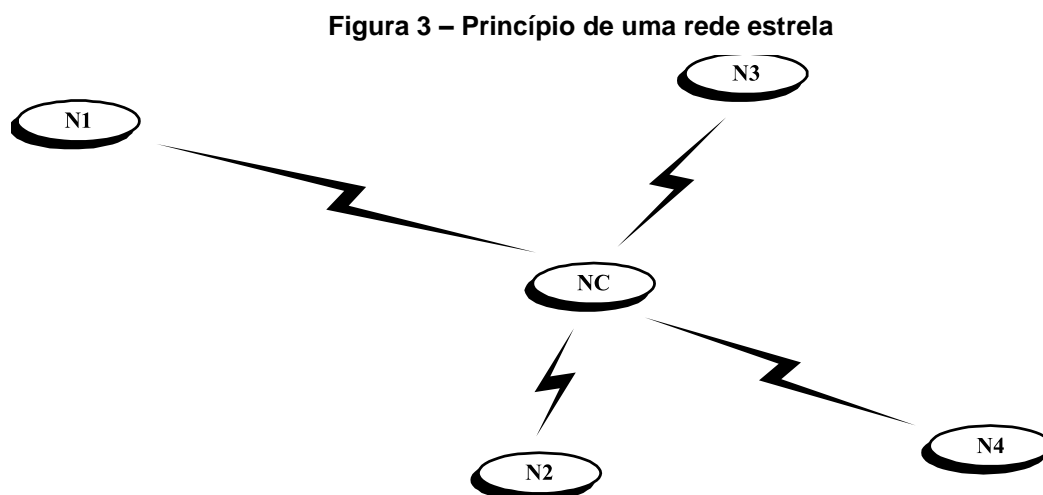
oferece uma alternativa mais robusta, mas em contrapartida tem-se o seu desenvolvimento de maior complexidade. Por outro lado, as redes de categoria 2 possuem desenvolvimento mais simples, mas, numa situação de perda de um nó, pode ser que não consigam restabelecer a comunicação.

3.3 Abordagens de comunicação

Os nós numa RSSF são dispostos no ambiente em dezenas e até centenas de dispositivos que atuam coletando os dados e funcionando como roteadores para os dados dos demais nós. Para garantir uma alta confiabilidade, robustez e disponibilidade as RSSF tendem a ser autoconfiguráveis. Assim, é necessária uma regra para o fluxo da informação, sendo que, três abordagens são discutidas: estrela, retransmissão única dos pacotes recebidos e o mapeamento de caminhos por nós vizinhos.

3.3.1 Rede estrela

A principal característica da rede estrela é que a informação é direcionada por meio do nó central, necessitando assim, que ele esteja no alcance de todos os demais nós. Esta abordagem, segundo a classificação de Sohraby, é uma rede de sensores sem fio categoria 2. Segundo Nordic (2004), um cenário onde a informação seria enviada do nó N4 para N1, conforme Figura 3, se comportaria da seguinte forma:



Fonte: NORDIC SEMICONDUCTOR. (2004) Pg.03

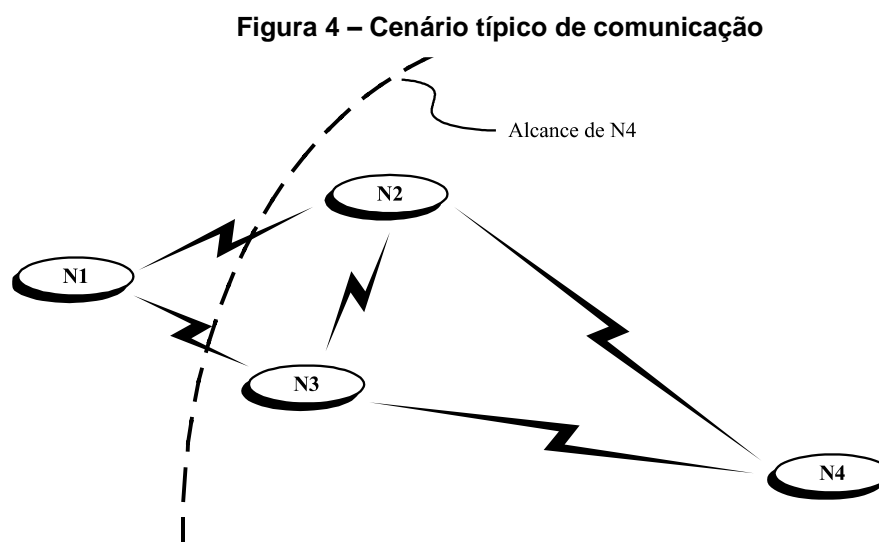
- N4 precisa enviar uma informação para N1;
- N4 envia um pacote contendo a informação para NC e requisita uma confirmação;
- N2 e N3 ignoram o pacote enviado, pois a mensagem não está endereçada a eles;
- NC se reconhece como receptor da mensagem enviada, recebe-a e envia a confirmação para N4;
- N1, N2 e N3 ignoram o pacote de confirmação enviado pois não está endereçado a eles;
- N4 se reconhece como receptor do pacote de confirmação e termina a comunicação com NC;
- NC retransmite o pacote para N1 e requisita uma confirmação;
- N1 se reconhece como receptor da mensagem enviada, recebe a mensagem e envia a confirmação para NC;
- N2 e N3 ignoram o pacote de confirmação enviado por N1, pois a mensagem não está endereçada a eles;
- NC se reconhece como receptor do pacote de confirmação e termina a comunicação com N1.

Para realização da comunicação é necessário o envio de apenas quatro pacotes e a geração de apenas dois para confirmação. Nessa configuração claramente é possível perceber que o ponto de maior tráfego de informações vai ser o nó central, sendo assim, se o fluxo de informação for muito grande pode vir a apresentar problemas tais como a falha no processamento dos dados. Outra característica dessa abordagem é que o alcance de uma rede estrela é o dobro do alcance de cada nó. Neste caso não há um atraso considerável na comunicação, visto que a rota da informação já está determinada, por fim não é possível uma alta mobilidade dos nós.

3.3.2 Retransmissão única dos pacotes recebidos

A principal característica da retransmissão única dos pacotes recebidos consiste na retransmissão da informação por todos os nós que recebem o pacote.

Nesta abordagem é necessário a utilização de memória para conferência das mensagens, evitando assim, a ocorrência de retransmissão infinita. Segundo a classificação de Sohrawy, essa abordagem é uma rede de sensores sem fio categoria 1. Segundo Nordic (2004), um cenário onde a informação seria enviada do nó N4 para N1 conforme Figura 4, se comportaria da seguinte forma:



Fonte: Adaptado. NORDIC SEMICONDUCTOR. (2004) Pg.05

- N4 precisa enviar uma informação para N1;
- N4 envia um pacote contendo a informação para N1 e requisita uma confirmação;
- Os nós N2 e N3 são os únicos receptores possíveis, já que N1 está fora do alcance de N4;
- N2 e N3 recebem o pacote, mas, identificam que está endereçado a outro nó;
- N2 e N3 retransmitem o pacote em diferente instante de tempo e armazenam o ID da mensagem com o intuito de evitar múltipla retransmissão;
- N4 recebe o pacote retransmitido, mas descarta-o, visto ser uma versão retransmitida da mensagem original criada por ele;
- N1 recebe o pacote retransmitido por N2 ou N3 (dependendo de quem enviou a mensagem primeiro);
- N1 se reconhece como receptor da mensagem e envia uma confirmação para N4;

- N1 recebe o segundo pacote retransmitido de N2 ou N3 e ignora, pois já recebeu a mensagem;
- Os nós N2 e N3 são os únicos receptores possíveis da confirmação, já que N4 está fora do alcance de N1;
- N2 e N3 recebem o pacote, mas identificam que está endereçado a outro nó;
- N2 e N3 retransmitem o pacote de confirmação em diferentes instantes de tempo e armazenam o ID da mensagem para evitar múltipla retransmissão;
- N1 recebe o pacote de confirmação retransmitido, mas descarta-o, visto ser uma versão retransmitida da mensagem original criada por ele;
- N4 recebe o pacote de confirmação retransmitido por N2 ou N3 (dependendo de quem enviou a mensagem primeiro);
- N1 se reconhece como receptor da mensagem e encerra a comunicação com N4;
- N4 recebe o segundo pacote retransmitido por N2 ou N3 e ignora-o, visto já haver recebido a mensagem.

Para realização da comunicação foi necessário o envio de seis pacotes nessa configuração. O principal problema é a introdução de um tráfego maior de informações desnecessárias que resulta numa redução na velocidade efetiva da rede e um maior gasto de bateria por parte dos nós, isto, em virtude de que todo nó que receber o sinal atuará como repetidor.

Nessa abordagem é possível uma alta mobilidade dos nós, o atraso na transmissão da informação deve ser considerado, visto que a rota para informação não está pré-estabelecida. O alcance máximo possível dessa transmissão é $(N-1)$ vezes o alcance de cada nó, sendo N o número de nós.

3.3.3 Mapeamento de caminhos por nós vizinhos

A principal característica do mapeamento de caminhos por nós vizinhos é a transmissão de dois tipos de pacotes: “pacote de mapeamento”, que tem a função de mapear os possíveis caminhos para os dados e o “pacote de dados”.

A comunicação nessa abordagem acontece em dois estágios: i) No primeiro estágio é mapeado os caminhos para os dados. ii) No segundo é realizada a transmissão.

Com o pacote de mapeamento é criado uma tabela indicando qual é o caminho para o nó desejado conforme Quadro 4:

Quadro 5 – Mapeamento dos caminhos

Nó	Caminhos
1	X
2	Y
...	...
n	Z

Fonte: Adaptado. NORDIC SEMICONDUCTOR. (2004).

Sendo assim, quando for necessário a transmissão de dado para um nó específico, o nó que deseja transmitir, faz uma consulta de qual é o caminho e transmite por ele. Essa abordagem segundo a classificação de Sohraby, é uma rede de sensores sem fio categoria 1.

Portanto, segundo Nordic (2004), um cenário onde a informação seria enviada do nó N4 para N1, com uma disposição conforme Figura 3, possuiria duas etapas e se comportaria da seguinte forma:

Fase de mapeamento:

- nó N requisita um pacote para todos perguntando “Quem pode me ouvir? Com quem você consegue comunicar?”.
- Todos os nós que receberem o pacote respondem com: “Eu te escuto e posso comunicar com os nós X, Y, Z”.
- nó N atualiza sua tabela de caminhos.
- A sequência é repetida até que a tabela esteja completa.

Fase comunicação:

- N4 precisa enviar uma mensagem para N1.
- N4 olha na tabela quem é caminho para N1, no caso N2.
- N4 envia um pacote endereçado a N1 para N2 requisitando uma confirmação.

- N3 ignora o pacote, já que não está endereçado a ele.
- N2 recebe o pacote e identifica que o destino final da mensagem é N1.
- N2 envia um pacote de confirmação para N4.
- N2 olha na tabela quem é caminho para N1 e percebe que N1 está no alcance.
- N4 recebe a confirmação de N2 terminando assim a comunicação, pois N2 está encarregado de retransmitir a mensagem.
- N2 retransmite a mensagem para o destino final N1.
- N1 recebe o pacote e envia uma mensagem de confirmação para N2.
- N2 recebe a mensagem de confirmação encerrando a comunicação com N1.

A abordagem do mapeamento de caminhos por nós vizinhos apresenta uma maior eficiência se comparado a retransmissão única dos pacotes recebidos, pois é eliminado a necessidade do envio de um pacote de dados que é descartado. Nesta abordagem não há um atraso considerável na comunicação, pois a rota da informação já está determinada na lista de caminhos e é possível uma alta mobilidade da rede. O alcance máximo possível dessa transmissão é $(N-1)$ vezes o alcance de cada nó, sendo N o número de nós.

3.3.4 Conclusão das abordagens

Cada abordagem apresenta suas vantagens e desvantagens, conforme resumido no Quadro 5:

Quadro 6 – Características das abordagens

	Rede estrela	Retransmissão	Mapeamento de caminhos
Alcance Máximo	2.NRR	$(N-1).NRR$	$(N-1).NRR$
Atraso na comunicação	Baixa	Alta	Baixa
Complexidade	Baixa	Média	Alta
Mobilidade dos nós	Baixa	Alta	Alta
Eficiência da comunicação	Média	Baixa/Média	Alta/Média

Fonte: Adaptado. NORDIC SEMICONDUCTOR. (2004)

Sendo que:

- NRR – Raio de alcance do nó
- N – Número de nós

A RSSF implementada faz uso da abordagem de mapeamento de caminhos, visto que ela possibilita uma maior eficiência na comunicação com um baixo atraso. Esta estratégia é desejada devido ao grande volume de dados que irá trafegar pela rede, mantendo um grande alcance, semelhante ao da retransmissão simples.

3.4 Composição de uma rede de sensores sem fio

As redes de sensores sem fio geralmente são compostas por dois tipos de dispositivos, o nó sensor e o coordenador. A principal característica dos nós sensores é a baixa capacidade computacional e um baixo consumo de energia, quando comparada ao coordenador. Funcionam como repetidor dos dados da rede, coletando os dados e em alguns casos até atuando no ambiente monitorado. O outro dispositivo é o nó coordenador, cuja principal característica é possuir uma alta capacidade computacional, pois será onde todos os dados serão centralizados e processados.

A estrutura básica do hardware de um nó, segundo Bonifácio (2010), é composta por quatro elementos principais:

- **Fonte de alimentação:** Tem a função de fornecer energia podendo ser composto por baterias, painéis fotovoltaicos, ou até mesmo alimentado por fonte ligado na rede elétrica;
- **Sensores:** Forma pela qual o nó irá fazer a aquisição da grandeza física monitorada no sistema;
- **Processador:** Elemento que irá processar a informação e encaminhar ao coordenador, tendo também a função de determinar a rota pelo qual a informação irá passar;
- **Rádio:** Elemento que irá transmitir e receber a informação.

Em alguns casos, os nós também funcionam atuando no sistema monitorado, sendo que nestes casos contam com mais um elemento; a saber: o atuador.

O coordenador não possui um padrão como os nós, contudo, geralmente possui um maior poder computacional que eles. Devido a sua grande utilização são alimentados com baterias maiores do que as utilizadas para os nós ou até mesmo alimentados pela rede.

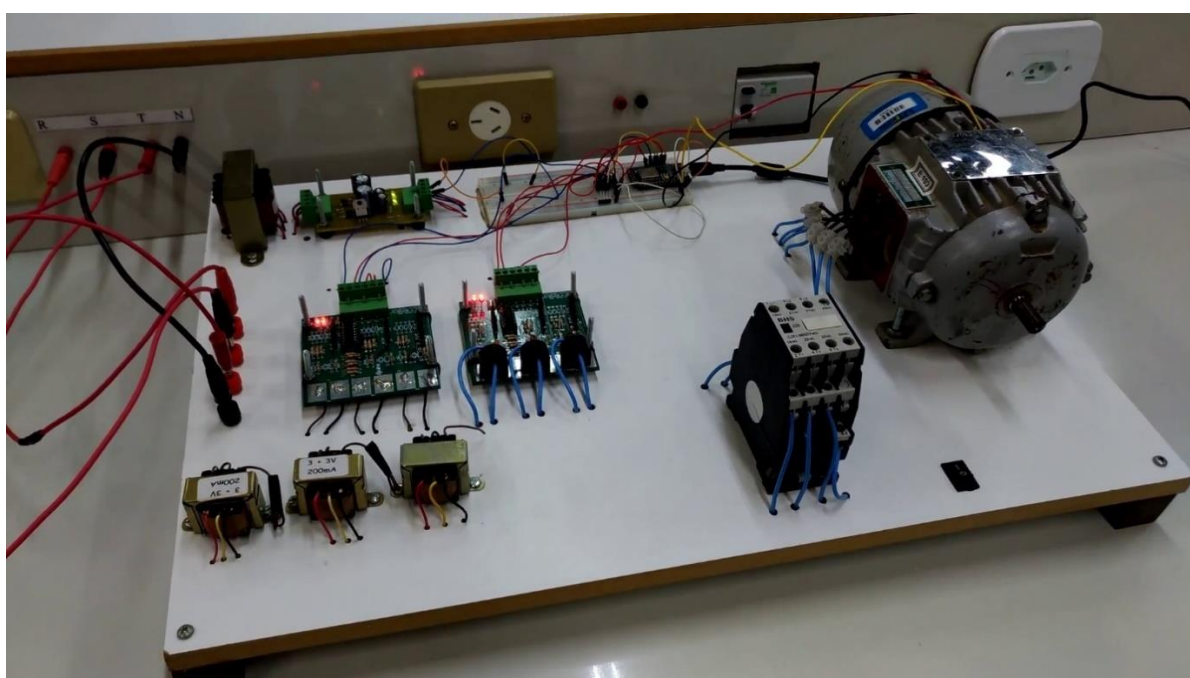
4 IMPLEMENTAÇÃO DA REDE DE SENSORES SEM FIO

Para realização dos testes da rede de sensores sem fio, foi montado uma bancada de testes, apresentado na Figura 5 utilizando um motor de indução trifásico, fazendo o papel de uma máquina operando em campo, bem como outros componentes a saber:

- Fonte de alimentação;
- Conversor Analógico digital;
- Placa de condicionamento de corrente;
- Placa de condicionamento de tensão;
- Sensor de temperatura;
- Placa de processamento e transmissão de dados;
- Circuito de acionamento do motor de indução trifásico;
- Motor de indução trifásico.

A bancada foi montada em blocos onde cada elemento é responsável por uma função específica, sendo assim caso algum elemento venha apresentar uma falha sua identificação é simples e rápida bem como sua manutenção, podendo realizar a troca do bloco, fazendo com que a rede retorne a operação rapidamente.

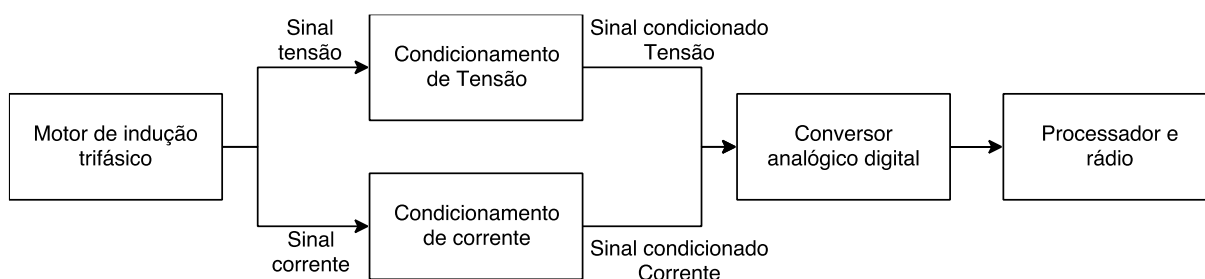
Figura 5 – Bancada de testes



Fonte: Aatoria Própria (2017)

O diagrama de blocos do funcionamento completo da bancada de testes mostrando o fluxo de informação entre os elementos que a compõe pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de blocos da bancada de testes



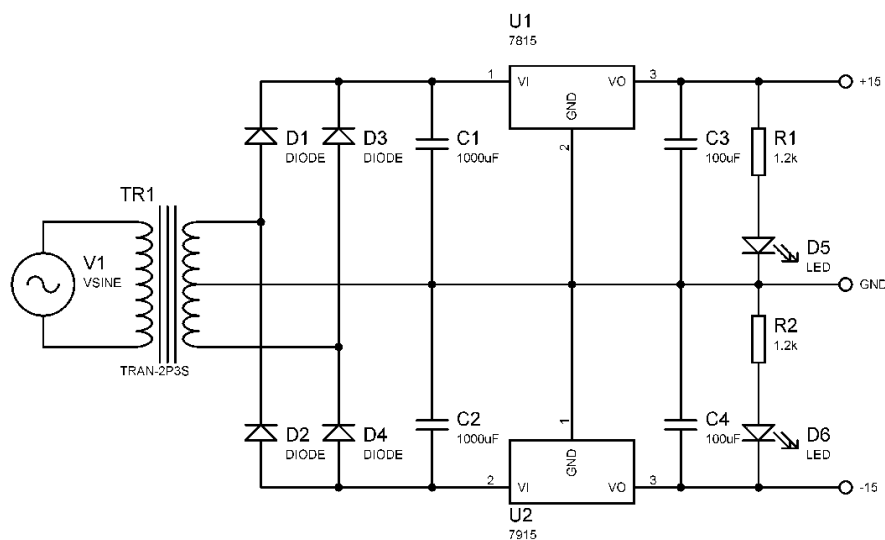
Fonte: Autoria Própria (2017)

4.1 Hardware

4.1.1 Fonte de alimentação

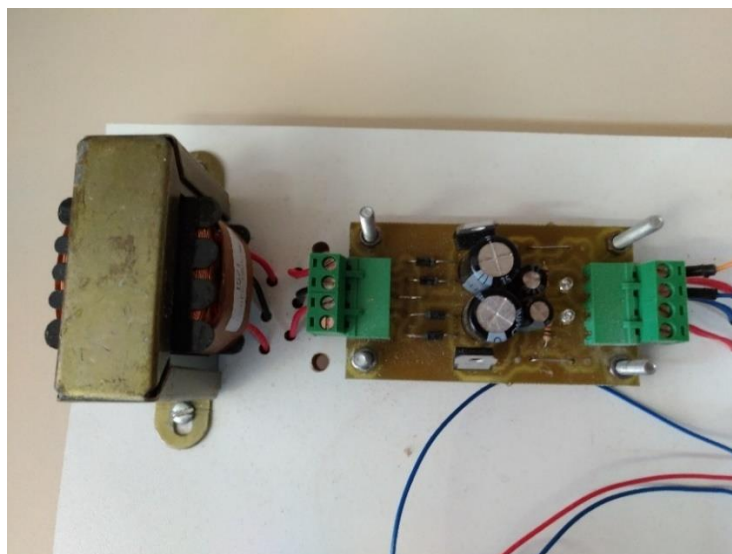
Para alimentar os circuitos de condicionamento de sinais foi utilizado uma fonte simétrica de 15V, conforme apresentado no circuito da Figura 7, utilizando os reguladores lineares de tensão LM7815 para fornecer a tensão positiva e LM7915 para fornecer a tensão negativa.

Figura 7 – Circuito elétrico da fonte de alimentação



Fonte: Autoria Própria (2017)

A montagem da fonte simétrica de alimentação foi realizada com uma placa de circuito impresso conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Fonte de alimentação

Fonte: Autoria Própria (2017)

A saída de tensão média da fonte simétrica de alimentação como previsto ficou entre -15V e +15V. Para alimentar o elemento de processamento e transmissão dos dados devido a alta sensibilidade a variações de tensão, optou-se por alimenta-lo com uma fonte chaveada de 5V.

4.1.2 Sensoriamento

O monitoramento de máquinas elétricas geralmente é realizado por meio de sinais tensão, corrente e temperatura coletados por sensores junto a ela. Com relação aos sinais de tensão e corrente para ambos é necessário o condicionamento para adequar-se ao nível máximo de tensão suportado pelo conversor analógico digital utilizado, MCP3008, do fabricante Microchip. Já com relação ao sensor de temperatura, LM35, não é necessário o condicionamento de seu sinal visto que já está de acordo com os valores permitidos para leitura pelo conversor.

4.1.2.1 Conversor analógico digital

Como o microcontrolador utilizado para implementar a rede de sensores sem fio, possui apenas um conversor analógico digital, foi necessário, a utilização de um conversor externo, MCP3008, sua escolha se deu pela quantidade de entradas, taxa de amostragem e disponibilidade no mercado. Os dados técnicos do mesmo podem ser observados no Quadro 7.

Quadro 7 – Dados técnicos / MCP3008

Dados técnicos - MCP3008	
Resolução	10 bits
Canais de entrada	8
Taxa de amostragem VDD = 2,7V	75 ksps
Taxa de amostragem VDD = 5V	200 ksps
Comunicação	SPI
Temperatura de operação	-40°C ~ 125°C
Tensão de alimentação	2,7 V ~ 5,5V

Fonte: Microchip (2008)

Utilizando o conversor analógico digital MCP3008 foi possível realizar a leitura de mais canais pelo ESP8266, viabilizando a coleta dos dados de tensão, corrente e temperatura da máquina dispostos no tempo.

4.1.2.2 Aquisição das medidas de corrente

As medidas de corrente são realizadas pela placa de condicionamento e coleta de sinal, desenvolvido por Barbara e Verdon (2016) na qual fornece o sinal condicionado de corrente já adequado a leitura pelo conversor analógico digital nas tensões de 3,3 e 5V bem como a proteção caso haja algum pico de corrente.

A medida de corrente é feita por meio de um transformador de corrente (TC) sendo possível realizar medidas apenas de corrente alternada.

A placa de condicionamento foi construída em quatro blocos: Transformação, *Offset*, Amplificação e Proteção, cada um com uma função específica no condicionamento do sinal. O bloco de transformação tem a função de transformar o sinal de corrente fornecido pelo transformador de corrente em tensão, pois o microcontrolador apenas realiza a leitura de tensão.

O transformador de corrente fornece uma corrente proporcional no secundário proporcional a leitura realizada no primário o qual monitora a operação da máquina. Para que seja possível a leitura por parte do microcontrolador é necessário a transformação de corrente em tensão. Esta transformação é feita por meio de dois resistores *shunt*, um é responsável por fornecer uma tensão de 3,3V e o outro 5V.

O bloco de *offset* tem a função de fornecer um valor de tensão contínua ao bloco de amplificação para elevar o nível do sinal, fornecendo assim um ganho de *offset*.

Para fornecer a tensão contínua são utilizados resistores e diodos. Os diodos apresentam uma queda de tensão quando estão em condução a qual é usada como fonte de tensão contínua para o ajuste de *offset*.

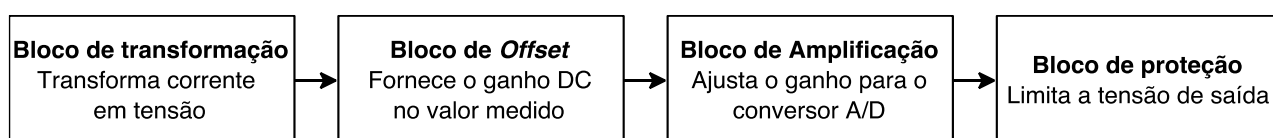
O bloco de amplificação tem a função de adequar os níveis de tensão para o nível de leitura do microcontrolador. Para isso são realizados o ganho e o ajuste de *offset*.

O bloco de proteção tem a função de proteger o microcontrolador contra possíveis picos de tensão na saída da placa de condicionamento e aquisição de dados.

Quando o valor de tensão de saída da placa atinge um valor superior ao máximo permitido pelo microcontrolador o circuito de proteção atua limitando a tensão de saída.

O funcionamento da placa de condicionamento de corrente pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de blocos do condicionamento de corrente

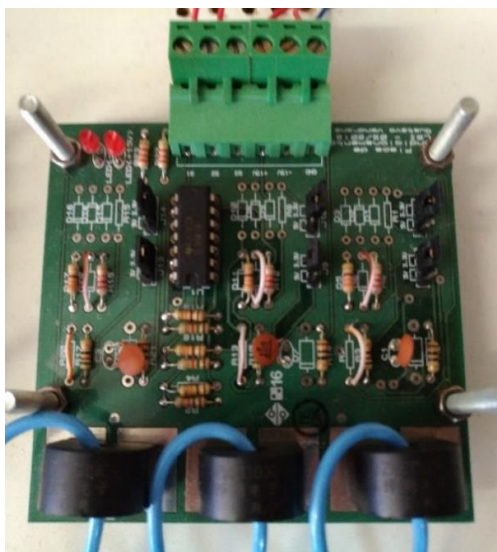


Fonte: Autoria Própria (2017)

No circuito implementado o valor de corrente máximo é de 5A, devido ao TC escolhido. Caso seja necessário medir um valor de corrente maior, é preciso trocar o transformador de corrente e reajustar os resistores de transformação.

Para compor o elemento de condicionamento de corrente da bancada de teste, o circuito foi implementado numa placa de circuito impressa conforme Figura 10.

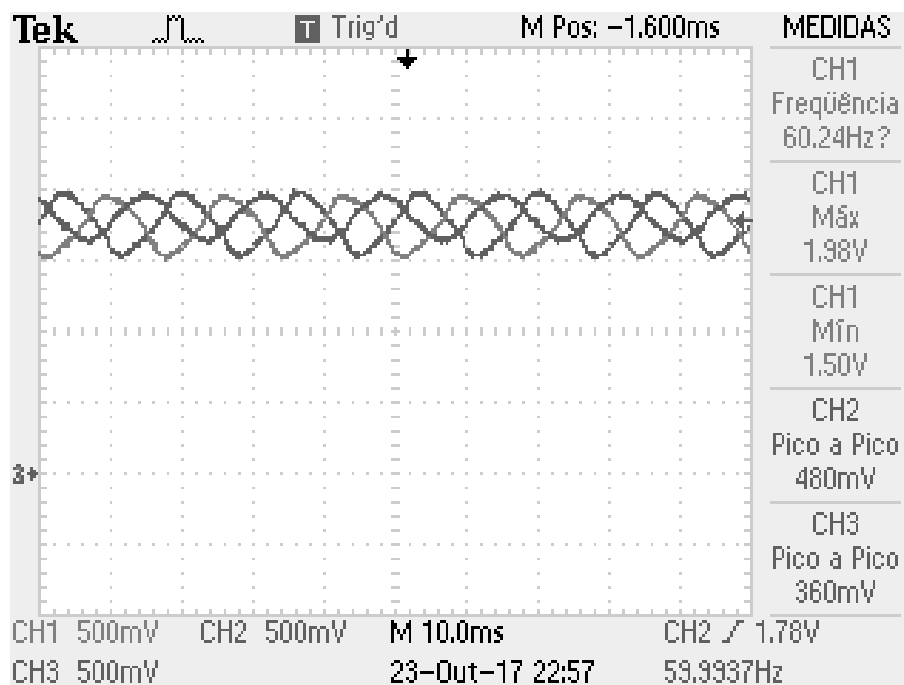
Figura 10 – Placa de condicionamento de corrente



Fonte: Autoria Própria (2017)

A saída da placa de condicionamento de corrente como projetado não excedeu os limites tolerados pelo conversor analógico digital, conforme observado pela forma de onda da saída da placa Figura 11.

Figura 11 – Forma de onda da saída da placa de condicionamento de corrente



Fonte: Autoria Própria (2017)

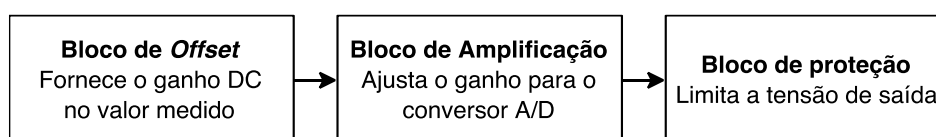
4.1.2.3 Aquisição das medidas de tensão

O condicionamento dos sinais de tensão é feito pelo mesmo circuito de condicionamento de corrente com pequenas adaptações. Para o condicionamento de tensão faz-se o uso apenas dos blocos: offset, amplificação e Proteção.

Diferente do condicionamento de corrente, os valores de tensão não precisam ser transformados, necessitando apenas da adequação para os níveis de tensão do microcontrolador e do *offset*. Portanto, o transformador de corrente foi substituído por um transformador de tensão e o resistor de *shunt* do bloco de transformação foi utilizado para que tenha uma corrente no secundário do transformador.

O funcionamento da placa de condicionamento de corrente pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 12.

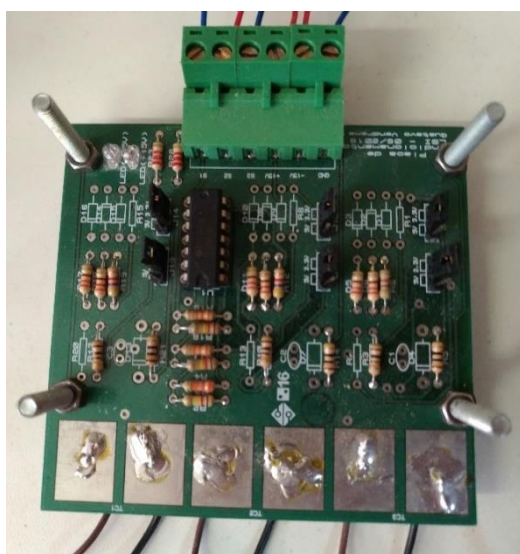
Figura 12 – Diagrama de blocos do condicionamento de tensão



Fonte: Autoria Própria (2017)

Para compor o elemento de condicionamento de tensão da bancada de teste, o circuito foi implementado numa placa de circuito impressa conforme Figura 13.

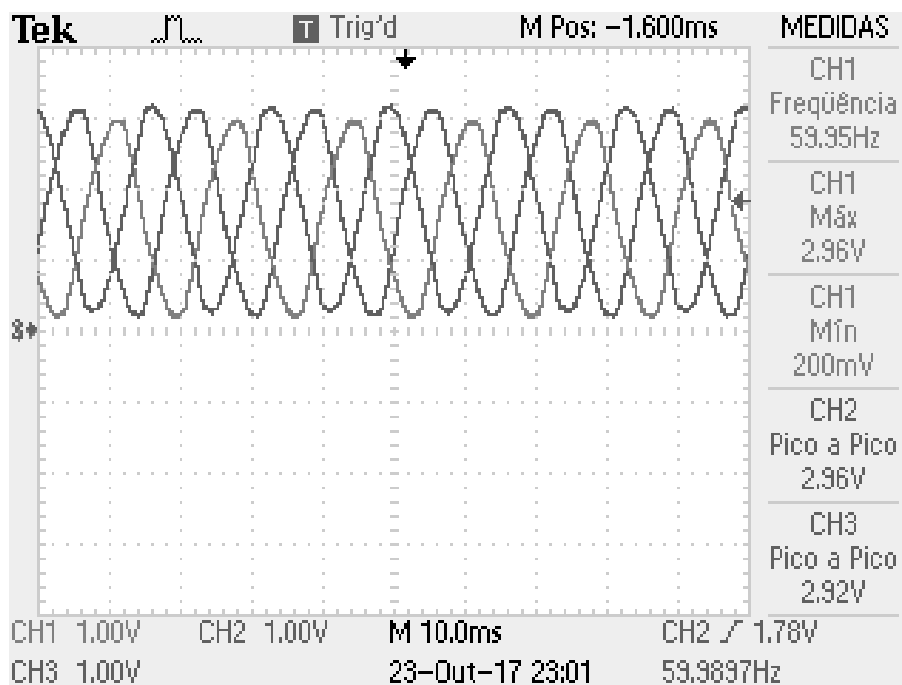
Figura 13 – Placa de condicionamento de tensão



Fonte: Autoria Própria (2017)

A saída da placa de condicionamento de tensão como previsto ficou entre 0 e 3,3V, a forma de onda na saída pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 – Forma de onda da saída da placa de condicionamento de tensão



Fonte: Autoria Própria (2017)

4.1.2.4 Aquisição da medida de temperatura

A medida de temperatura é feita pelo sensor LM35, do fabricante Texas Instrument. As características do sensor de temperatura podem ser vistas no Quadro 8:

Quadro 8 – Dados técnicos / LM35

Dados técnicos – LM35	
Tensão de operação	4 - 30V
Escala	10mV/°C
Temperatura de operação	-55°C a 150°C
Consumo	60uA

Fonte: TEXAS INSTRUMENT (2016)

Como o valor de tensão de saída do sensor é adequada aos limites permitidos pelo microcontrolador não é necessário realizar o condicionamento do sinal de temperatura, o que concorre para a redução da quantidade de componentes e consequentemente a redução do custo e tamanho da placa.

Para compor o elemento de sensor de temperatura o LM35, o dispositivo foi soldado a cabos para conexão com o conversor analógico digital e os terminais isolados com tubo termo retrátil conforme figura 15.

Figura 15 – Sensor de Temperatura



Fonte: Aatoria Própria (2017)

4.1.3 Microcontrolador e Radio – ESP8266

Para compor o elemento de processamento e de comunicação na bancada de testes, foi escolhido o microcontrolador ESP8266 NodeMCU ilustrado na Figura 16 que opera na frequência de 2,4GHz e faz uso do padrão IEEE 802.11 b/n/g. Os dados técnicos do módulo são apresentados no Quadro 9 do fabricante Espressif.

Quadro 9 – Dados técnicos / ESP8266

Dados técnicos - ESP8266 NodeMCU	
Tensão de operação	3 ~ 3,6V
Tensão de alimentação	5 ~ 10V
Corrente média de operação	80mA
Frequência de transmissão	2,4 ~ 2,5Ghz
Padrão de comunicação	IEEE 802.11 b/n/g
Sensibilidade Mínima	-91 dbm
Padrão de Criptografia	WPA/WPA2
Frequência do <i>Clock</i>	80MHz
Temperatura de operação	-40°C ~ 125°C

Fonte: Espressif (2016)

A escolha do microcontrolador se justifica devido a facilidade de ser encontrado no mercado e baixo custo frente a outras tecnologias como Zigbee. Outra vantagem é que o ESP8266 NodeMCU já tem embarcado o regulador de tensão, podendo o mesmo ser alimentado com tensão de até 10V e possuir o cristal oscilador já embarcado, eliminando a necessidade de componentes auxiliares.

Figura 16 – ESP8266 / NodeMCU



Fonte: Autoria própria (2017)

4.1.5 Motor de indução trifásico

O elemento eletromecânico usado na bancada de testes é um motor de indução trifásico do fabricante WEG, Figura 17, os parâmetros do referido motor podem ser vistos no Quadro 10.

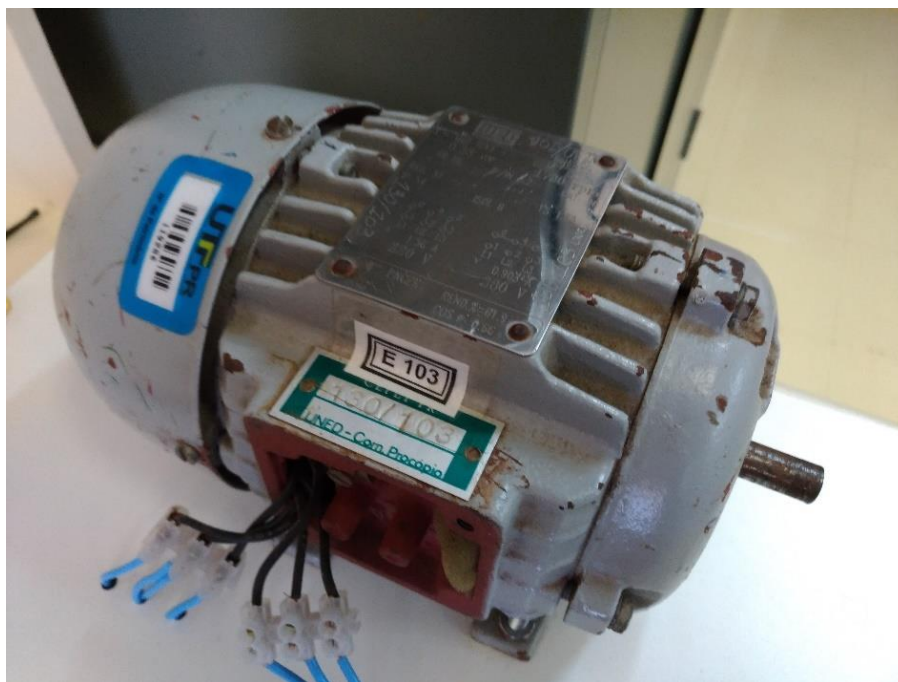
Quadro 10 – Dados técnicos / Motor WEG

Dados técnicos – Motor WEG	
Potência	1/3 CV
Polos	4
Velocidade nominal	1720 rpm
Rendimento	61,9%
Fator de potência	0,66

Fonte: WEG (2017)

Para que fosse obtido uma baixa corrente de partida e operação, o acionamento do motor de indução trifásico foi feito em estrela, resultando na tensão de 127 V sob cada bobina do motor.

Figura 17 – Motor de indução trifásico



Fonte: Autoria própria (2017)

4.2 Software

4.2.1 Estrutura do código sensor

A estrutura do código dos sensores pode ser dividida em dois estágios conforme descrito anteriormente na seção 3.1.3, sendo estes dois estágios são: i) Mapeamento dos caminhos para os dados, ii) Transmissão dos dados.

4.2.1.1 Mapeamento dos caminhos para os dados

O primeiro estágio, onde é mapeado os caminhos para os dados é realizado pela biblioteca “PainlessMesh”, desenvolvida por BlackEdder de licença pública.

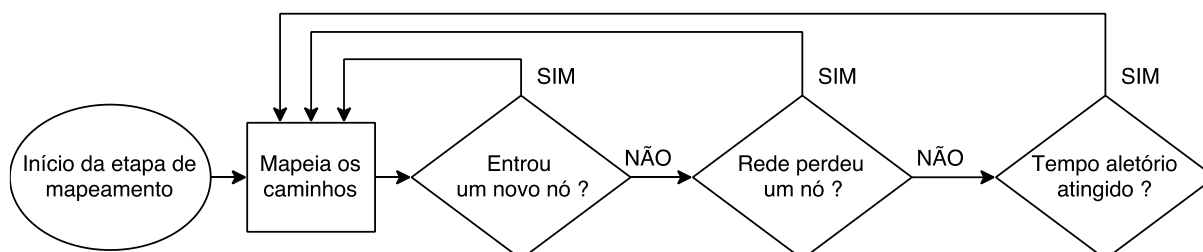
A estratégia utilizada pela biblioteca é a mesma descrita na seção 3.1.3 sendo que a decisão do caminho ocorre pelo caminho que apresenta a maior intensidade do sinal.

O estágio de mapeamento dos caminhos é executado quando:

- Uma nova conexão é realizada;
- Uma conexão é perdida;
- Periodicamente a cada tempo aleatório.

O funcionamento do estágio de mapeamento de caminhos pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 18 onde está descrito de forma reduzida as etapas deste estágio.

Figura 18 – Diagrama de blocos do estágio de mapeamento dos caminhos



Fonte: Autoria própria (2017)

A realização do mapeamento de caminhos mediante a estas condições possibilita que a rede esteja disponível a todo momento ao usuário. Outra função da biblioteca “PainlessMesh” é fornecer a criptografia para a rede, a qual é estabelecido uma senha cujo protocolo de segurança utilizado é o WPA2.

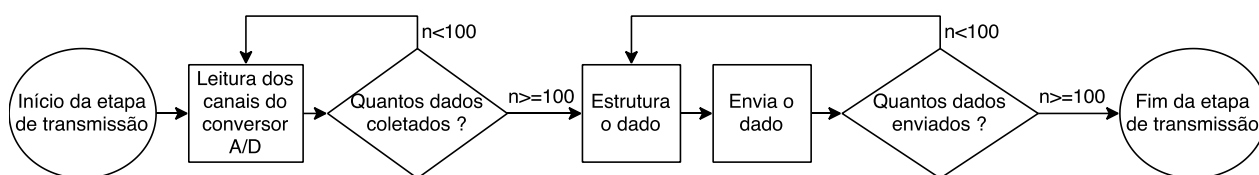
4.2.1.2 Transmissão dos dados

No segundo estágio de transmissão dos dados, com o objetivo de se obter uma maior estabilidade na rede, foi implementado uma estratégia para transmissão dos dados dividida em três etapas, sendo elas:

- Coleta dos dados: Microcontrolador e o conversor analógico digital faz a leituras das cem medidas de cada uma das sete variáveis monitoradas, “Tensão das três fases, Corrente das três fases e temperatura” e as armazena na memória;
- Estruturação dos dados: Dado é estruturado para a transmissão para o mestre na forma CSV – *Comma Separated Value*;
- Envio dos dados: Os dados estruturados são enviados ao mestre.

A etapa de transmissão dos dados é executada a cada minuto, seu funcionamento pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 19 onde está descrito todas as etapas deste estágio.

Figura 19 – Diagrama de blocos do estágio de transmissão dos dados



Fonte: Autoria própria (2017)

4.2.2 Estrutura do código mestre

O mestre, da mesma forma que os nós sensores, faz uso da biblioteca “PainlessMesh” e sua estrutura do código pode ser dividido em dois estágios sendo eles: i) Mapeamento dos caminhos para os dados, ii) Recepção dos dados

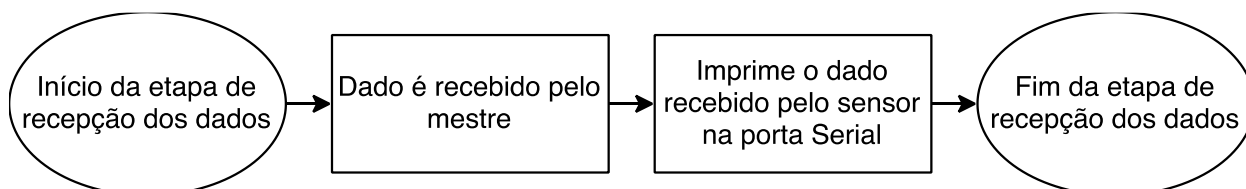
O estágio de mapeamento dos caminhos ocorre da mesma forma que os nós sensores e é executado sob as mesmas condições:

- Uma nova conexão é realizada;
- Uma conexão é perdida;
- Periodicamente a cada tempo aleatório.

O segundo estágio consiste em receber e fornecer ao usuário a mensagem enviada pelos nós sensores por meio da porta serial, este estágio é executado cada vez que uma nova mensagem é recebida.

O funcionamento do estágio de recepção dos dados pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 20 onde está descrito as etapas deste estágio.

Figura 20 – Diagrama de blocos do estágio de recepção dos dados



Fonte: Autoria própria (2017)

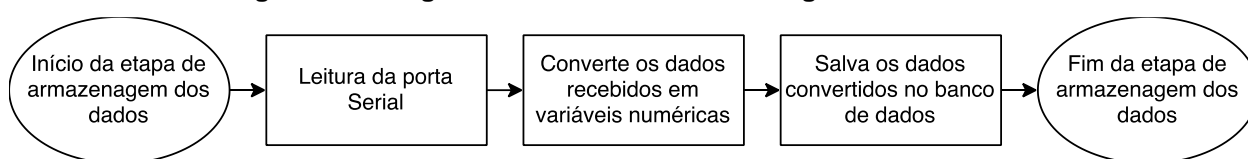
4.2.3 Estrutura do código armazenagem dos dados

O código para armazenagem dos dados foi desenvolvido no software MATLAB, sua estrutura conta com três etapas, e são executadas a cada dado recebido do mestre por meio da porta Serial, estas três etapas são:

- Leitura da porta serial;
- Converte os dados em CSV para variáveis numéricas;
- Salva os dados convertidos em variáveis numéricas num banco de dados específico para cada sensor.

O funcionamento da armazenagem dos dados pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 21 onde está descrito de forma reduzida as etapas deste estágio.

Figura 21 – Diagrama de blocos da armazenagem dos dados



Fonte: Autoria própria (2017)

4.3 Montagem da bancada de testes

Todos os componentes utilizados para o desenvolvimento da bancada de testes apresentam baixo custo e grande disponibilidade no mercado, resultando em uma estratégia de baixo custo para o monitoramento de máquinas elétricas.

A montagem final da bancada de testes se deu pela fixação e ligação dos elementos descritos na seção 4.1 e também a configuração dos parâmetros de transmissão por meio do software. Os dados técnicos da bancada estão apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Parâmetros da bancada de testes

Dados técnicos – Bancada de testes	
Tensão máxima	127V
Corrente máxima	5A
Quantidade de dados coletados	100
Frequência da transmissão dos dados	1 Minuto
Latência dos dados	200ms

Fonte: Autoria própria (2017)

Com a bancada de testes foi possível realizar os testes para validar a rede de sensores sem fio implementada, sendo ela capaz de monitorar e transmitir as medidas de corrente e tensão de todas as fases de operação da máquina elétrica bem como sua temperatura de operação viabilizando o diagnóstico de falhas.

5 TESTES

Para validação da rede de sensores sem fio foram realizadas duas análises i) Análise da consistência dos dados ii) Análise da perda dos dados, em três situações sempre operando no canal menos sobrecarregado visando aproximar-se de uma situação de operação em uma indústria, as três situações na qual os testes foram realizados foram:

- Sem Repetição;
- Com repetição;
- Múltiplos Sensores.

5.1 Testes sem repetição

O teste sem repetição foi realizado com o objetivo de verificar o funcionamento da rede na condição mais favorável possível. Para execução do teste as várias etapas realizadas foram:

- Bancada de testes foi instalada a 7 metros do mestre;
- Foi medido a intensidade do sinal da conexão entre sensor – mestre;
- A bancada de testes realizou as medidas e as enviou por 10 minutos, resultando no envio de 10 fluxos de dados;
- Os dados obtidos na transmissão foram dispostos num gráfico para análise da sua consistência;
- Foi feita a análise da perda de dados analisando quantos pacotes de dados foram transmitidos e recebidos.

A medida da intensidade do sinal foi disposta no Quadro 12, onde foi possível observar que a intensidade do sinal estava acima da sensibilidade mínima descrita pelo *datasheet* do fabricante para se estabelecer a conexão.

Quadro 12 – Intensidade do sinal sem repetição

Intensidade do sinal sem repetição	
Conexão	Intensidade do sinal (dbm)
Sensor – Mestre	-73

Fonte: Autoria própria (2017)

5.2 Testes com repetição

Os testes com repetição foram realizados com o objetivo analisar a capacidade da rede de sensores sem fio de se auto organizar e manter esta conexão. Para isto foram realizados testes com uma, duas e três repetições, sendo que em todas as situações a rede foi ajustada automaticamente pelos próprios sensores.

5.2.1 Uma repetição

Para execução do teste da rede se sensores sem fio com uma repetição, foi realizado:

- Instalação da bancada de testes a 5 metros do primeiro repetidor com uma parede de concreto entre eles;
- Instalação do repetidor a 5 metros entre o mestre e a bancada de teste com uma parede de concreto entre eles;
- Foi medido a intensidade do sinal da conexão entre mestre – repetidor e repetidor – sensor;
- Rede realiza as medidas por 10 minutos, resultando no envio de 10 fluxos de dados;
- Os dados obtidos na transmissão foram dispostos num gráfico para análise da sua consistência;
- Foi feita a análise da perda de perda de dados analisando quantos pacotes de dados foram transmitidos e recebidos.

A medida da intensidade do sinal foi disposta no Quadro 13, onde foi possível observar que ambas intensidades estavam acima da sensibilidade mínima descrita pelo *datasheet* do fabricante para a conexão.

Quadro 13 – Intensidade do sinal com um repetidor

Intensidade do sinal com uma repetição	
Conexão	Intensidade do sinal (dbm)
Sensor – Repetidor	-71
Repetidor – Mestre	-79

Fonte: Autoria própria (2017)

5.2.2 Duas repetições

A execução do teste da rede se sensores sem fio com duas repetições, foi realizada de maneira semelhante ao teste com um repetidor, apenas com a adição de mais um nó repetidor, sendo assim as etapas executadas foram:

- Instalação da bancada de testes a 5 metros do primeiro repetidor com uma parede de concreto entre eles;
- Instalação do segundo repetidor a 5 metros do primeiro repetidor com uma parede de concreto entre eles;
- Instalação do mestre a 5 metros do segundo repetidor com uma parede de concreto entre eles;
- Foi medido a intensidade do sinal entre Mestre – Repetidor 1, Repetidor 1 – Repetidor 2 e repetidor 2 – Sensor;
- Rede realiza as medidas por 10 minutos, resultando no envio de 10 fluxos de dados;
- Os dados obtidos na transmissão foram dispostos num gráfico para análise da sua consistência.
- Foi feita a análise da perda de perda de dados analisando quantos pacotes de dados foram transmitidos e recebidos.

A medida da intensidade do sinal foi disposta no Quadro 14, onde foi possível observar que ambas intensidades estavam acima da sensibilidade mínima descrita pelo datasheet do fabricante para a conexão.

Quadro 14 – Intensidade do sinal com dois repetidores

Intensidade do sinal com duas repetições	
Conexão	Intensidade do sinal (dbm)
Mestre – Repetidor 1	-73
Repetidor 1 – Repetidor 2	-77
Repetidor 2 – Sensor	-81

Fonte: Autoria própria (2017)

5.2.3 Três repetições

A execução do teste da rede se sensores sem fio com três repetições, foi realizada de maneira semelhante ao teste com um repetidor e dois, apenas com a adição de mais um nó repetidor, sendo assim as etapas executadas foram:

- Instalação da bancada de testes a 5 metros do primeiro repetidor com uma parede de concreto entre eles;
- Instalação do segundo repetidor a 5 metros do primeiro repetidor com uma parede de concreto entre eles;
- Instalação do terceiro repetidor a 5 metros do segundo repetidor com uma parede de concreto entre eles;
- Instalação do mestre a 5 metros do terceiro repetidor com uma parede de concreto entre eles;
- Foi medido a intensidade do sinal da conexão entre Mestre – Repetidor 1, Repetidor 1 – Repetidor 2, Repetidor 2 – Repetidor 3 e repetidor 3 – Sensor;
- Rede realiza as medidas por 10 minutos, resultando no envio de 10 fluxos de dados;
- Os dados obtidos na transmissão foram dispostos num gráfico para análise da sua consistência.
- Foi feita a análise da perda de perda de dados analisando quantos pacotes de dados foram transmitidos e recebidos.

A medida da intensidade do sinal foi disposta no Quadro 15, onde foi possível observar que ambas intensidades estavam acima da sensibilidade mínima descrita pelo datasheet do fabricante para a conexão.

Quadro 15 – Intensidade do sinal com três repetidores

Intensidade do sinal com três repetições	
Conexão	Intensidade do sinal (dbm)
Mestre – Repetidor 1	-73
Repetidor 1 – Repetidor 2	-78
Repetidor 2 – Repetidor 3	-79
Repetidor 3 – Sensor	-72

Fonte: Autoria própria (2017)

5.3 Testes com múltiplos sensores sem repetição

Os testes com múltiplos sensores foram realizados visando analisar a capacidade da RSSF de lidar com um maior fluxo de dados, para isto foram realizados testes com dois e três nós trabalhando simultaneamente.

Para realização dos testes com múltiplos sensores, como estava disponível apenas uma bancada de testes, foi preciso simular toda a aquisição e condicionamento dos sinais, armazenando os dados na memória dos nós.

5.3.1 Dois sensores

Para execução do teste da rede se sensores sem fio com dois sensores, foi realizado:

- Instalação da bancada de testes e um nó com os dados na memória a 7 metros do mestre;
- A bancada de testes realizou as medidas e as enviou por 10 minutos, bem como o nó;
- Os dados obtidos na transmissão foram dispostos num gráfico para análise da sua consistência;
- Foi feita a análise da perda de dados analisando quantos pacotes de dados foram transmitidos e recebidos.

5.3.2 Três sensores

A execução do teste da rede se sensores sem fio com três sensores, foi realizada de maneira semelhante ao teste com dois sensores, apenas com a adição de mais um nó sensor com os dados de funcionamento na memória, sendo assim as etapas executadas foram:

- Instalação da bancada de testes e dois nós com os dados na memória a 7 metros do mestre;
- A bancada de testes realizou as medidas e as enviou por 10 minutos, bem como os nós;
- Os dados obtidos na transmissão foram dispostos num gráfico para análise da sua consistência;

- Foi feita a análise da perda de dados analisando quantos pacotes de dados foram transmitidos e recebidos.

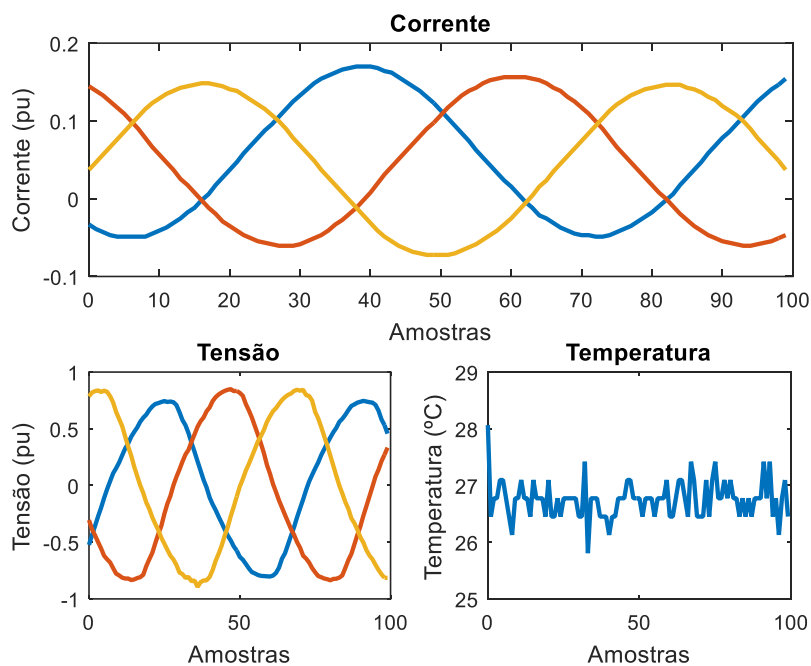
5.4 Resultado das análises

Nesta seção é apresentado de forma detalhada o resultado das análises realizadas. Em todos os testes realizados a rede de sensores sem fio apresentou ótimos resultados para ambas as análises, onde ela mostrou-se capaz de representar as formas de onda das variáveis monitoradas sem apresentar perda nos dados.

5.4.1 Análise da consistência dos dados

A análise da consistência dos dados foi realizada dispondo os dados recebidos pelo mestre num gráfico a fim de avaliar se a rede estava sendo capaz de por meio das medidas realizadas pelo nó sensor representar de maneira satisfatória as formas de onda de tensão e corrente de todas as fases do motor bem como a sua temperatura.

Em todos os testes realizados a rede foi capaz de representar as formas de onda monitoradas. Todos os testes foram realizados com o motor acionado, a Figura 22 representa os dados obtidos pelo mestre convertido os valores de tensão e corrente para pu e as medidas de temperatura para graus Celsius, no pior caso testado o de três repetições na figura é possível observar que as formas de onda da corrente e tensão de todas as três fases do motor bem como sua temperatura foram representadas satisfatoriamente.

Figura 22 – Dados com três repetições convertidos

Fonte: Autoria própria (2017)

5.4.2 Análise da perda dos dados

A análise da perda dos dados ocorreu por meio da comparação da quantidade de dados enviados pelo sensor e recebidos pelo mestre, sendo que em todas as condições testadas não foi apresentado perda nos dados resultando em uma eficiência total da transmissão de 100%.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi discutido a utilização de uma rede de sensores sem fio para o monitoramento de máquinas elétricas com o objetivo de diagnosticar possíveis falhas.

Foi realizado estudo relacionado a falhas em máquinas elétricas, as atuais estratégias e meios para o diagnóstico destas falhas, e as tecnologias atuais de comunicação sem fio.

Mediante ao estudo realizado foi proposto e implementado uma rede de sensores sem fio com o objetivo de viabilizar o diagnóstico de falhas em máquinas elétricas, no qual foi implementado o hardware e software para realização das medidas e transmissão dos dados.

A fim de validar a rede de sensores sem fio foi realizado testes em diversas situações, analisando a perda de dados e a capacidade de representar as variáveis monitoradas.

Do ponto de vista da pesquisa, a rede de sensores sem fio implementada viabiliza a obtenção de informações cruciais do funcionamento de diversas máquinas em campo de forma muito mais simples e com relativo baixo custo, colaborando com o desenvolvimento de novas estratégias para o diagnóstico de falhas em máquinas elétricas.

No tocante ao ponto de vista da indústria, a rede implementada pode ser usada para a detecção de falhas possibilitando assim a manutenção preditiva das mesmas. Assim, evita-se que haja uma interrupção não programada na produção, trazendo riscos a segurança dos que a operam e também perdas financeiras.

6.1 Possibilidades de trabalhos futuros

Com a rede de sensores sem fio implementada é possível realizar a coleta dos dados de funcionamento de múltiplas máquinas elétricas de forma muito mais simples que utilizando uma infraestrutura de cabos.

Neste contexto uma possibilidade de trabalho futuro seria a integração da rede implementada com um hardware dedicado para a realização do diagnóstico de falha de várias máquinas elétricas operando em uma indústria e a virtualização do processamento dos dados na nuvem.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÃO. **Plano de atribuição destinação e distribuição de faixas de frequência no Brasil**. Brasília, 2010.
- AMINIAN, M.; NAJI, H. R. **A Hospital Healthcare Monitoring System Using Wireless Sensor Networks**. *J Health Med Inform* 4: 121. 2013.
- ATMEL CORPORATION. **Atmel ATmega328/P datasheet**. San Jose, 2016.
- BARBARA, G. V.; VERDON, Q. **Memorial descritivo: desenvolvimento de hardware dedicado para condicionamento de sinais de corrente em motores com falhas**. 2016. 10 p. Relatório de iniciação científica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2016.
- BELLINI, A.; FILIPPETTI, F.; TASSONI, C.; CAPOLINO, G. A.; **Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines**. in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4109-4126, Dec. 2008.
- BENAVENTE, J. C. C. **Monitoramento ambiental de vinhedos utilizando uma rede de sensores sem fio que coleta dados com um intervalo de amostragem variável**. 2010. 177 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- BERG, J. **The IEEE 802.11 Standardization Its History, Specifications, Implementations, and Future**, George Mason University, Technical report GMU-TCOM-TR-8
- BLACKEDDER. **Painless Mesh**, GitLab Disponível em: <<https://gitlab.com/BlackEdder/painlessMesh>> Acesso em: 22 out. 2017, 23:36:17
- BONIFÁCIO, T. G. **Implementação de um protocolo mesh multi-hop baseado em algoritmo de roteamento geográfico para redes de sensores sem fio**. 157 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010
- BRAHIM, S. B.; BOUALLEGUE, R.; DAVID, J.; VUONG, T. H.; DAVID, M.; **Design and implementation of wireless sensor network node for rotating electrical machine**. 2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC), Messina, 2016, pp. 738-742.
- CARDOSO T. M.; MARQUES P. C. F. **Rede Mesh: topologia e aplicação**. Artigo. Faculdade Cenecista de Osório, Osório, 2012.
- CHONG, C.; KUMAR, S. P. **Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges**. in *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247-1256, 2003.
- CONCEIÇÃO, A. F. **Voz e vídeo sobre redes sem Fio IEEE 802.11**. 2006. 133p. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

DBELL. **How to Boost your Wi-Fi speed using right channels**, dbell Wi-Fi video doorbell support, 21 de Fev. 2016 Disponível em: <<http://support.dbell.ca/knowledge-base/how-to-boost-your-wi-fi-speed/>> Acesso em: 17 out. 2017, 15:51:17

DIGI INTERNATIONAL. **XBee/Zigbee – Datasheet**. Minnetonka,2009. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>> Acesso em: 22 mai. 2017, 17:49:15

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2016**: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf> Acesso em: 22 mai. 2017, 17:51:17

ESPRESSIF. **ESP8266EX Datasheet** Shanghai Zhangjiang High-Tech Park (2017) Disponível em: <http://espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf> Acesso em: 16 out 2017, 18:33:27

GODOY, W. F.; SILVA, I. N.; GOEDEL, A.; PALÁCIOS, R. H. C.; **Evaluation of stator winding faults severity in inverter-fed induction motors**. Applied Soft Computing (Print), v. 32, p. 420-431, 2015.

GODOY, W. F.; SILVA, I. N.; GOEDEL, A.; PALACIOS, R. H. C.; MORINIGO-SOTELO, D.; DUQUE-PEREZ, O.; **Sistemas Inteligentes Aplicados na Estimaco de Falhas de Rolamentos em Motores de Induo Trifsicos Alimentados por Inversores de Frequncia**. In: XXI Congresso Brasileiro de Automtica, 2016, Vitria. XXI Congresso Brasileiro de Automtica, 2016. v. 1. (a)

GODOY, W. F.; SILVA, I. N.; LOPES, T. D.; GOEDEL, A.; PALÁCIOS, R. H. C.; **Application of intelligent tools to detect and classify broken rotor bars in three-phase induction motors fed by an inverter**. IET Electric Power Applications (Print), v. 1, p. 1-10, 2016. (b)

GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. Nova York: Cambridge University Press, 2005.

HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G.; TALLAM, R. M.; LEE, S.; OBAID, R.; STACK, J. **Complete current-based induction motor condition monitoring: stator, rotor, bearings, and load**. *VIII IEEE International Power Electronics Congress, 2002. Technical Proceedings. CIEP 2002.*, 2002, pp. 3-8.

HILLS, R. **Sensing for danger**. Science and Technology Review. 2001. Disponível em: <<http://www.llnl.gov/str/JulAug01/Hills.html>>. Acesso em: 22 mai. 2017, 18:27:55

JAFARI, R.; ENCARNACAO, A.; ZAHOORY, A.; DABIRI, F.; NOSHADI, H.; SARRAFZADEH, M. **Wireless sensor networks for health monitoring**. *The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, 2005, pp. 479-481.

KORKUA, S.; JAIN, H.; LEE, W. J.; KWAN, C. **Wireless health monitoring system for vibration detection of induction motors**. *2010 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference - Conference Record*, Tallahassee, FL, USA, 2010, pp. 1-6.

LEHEMBRE, G. **Wi-Fi security – WEP, WPA and WPA2**. Hakin9, 2005.

LINS, T. **Internet Das Coisas: Adquirindo O Contexto IoT**, Laboratório Mobilis Computação Móvel Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2015. Artigo. Disponível em: <<http://www.decom.ufop.br/imobilis/internet-das-coisas-adquirindo-o-contexto/>> Acesso em: 22 mai. 2017, 18:10:10

LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ L. B.; MINI R. A. F.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. **Redes de Sensores Sem Fio**. Artigo. Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

LU, B.; WU, L.; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G.; GUTIERREZ, J. A. **On the application of wireless sensor networks in condition monitoring and energy usage evaluation for electric machines**. *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005.*, 2005, pp. 6 pp.

MICROCHIP. **2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface**. Microchip Technology Inc. 2008 Disponível em:< <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MCP3008.pdf>> Acesso em: 24 out. 2017, 13:13:17

MISEL, E. **Advantages/Disadvantages: WEP/WPA Network Security**. Bright Hub, Disponível em: < <http://www.brighthub.com/computing/smb-security/articles/78216.aspx>> Acesso em: 17 out. 2017, 14:11:17

MORE, S.; NIGHOT M. **An Agro Advisory For Pomegranate Field Using Wireless Sensor Network**. *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*, Pune, 2016, pp. 557-562.

NORDIC SEMICONDUCTOR. **Introduction to wireless networks**. Tiller, 2004. Disponível em: <http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nwp_005.pdf>Acesso em: 22 mai. 2017, 18:20:41

NORDIC SEMICONDUCTOR. **nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Preliminary Product Specification v1.0**. Tiller, 2008. Disponível em: < https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf > Acesso em: 22 mai. 2017, 18:22:02

NUNES, R. R. **Plataforma computacional para otimização de antenas multi-lóbulos eficientemente integradas a sistemas de comunicação sem fio**. 2012. 109 p. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, 2012.

OTHMAN, M. F.; SHAZALI, K. **Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System**. *Procedia Engineering*, Volume 41, 2012, paginas 1204-1210, ISSN 1877-7058,

RODRIGUES, T. N. **Abordagem dirigida a Modelos para Redes de Sensores sem Fio**. 2011. 103 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.

SARI, A.; KARAY, M. **Comparative Analysis of Wireless Security Protocols: WEP vs WPA**. Scientific Research Publishing 17 December 2015, Disponível em: <https://file.scirp.org/pdf/IJCNS_2015121715205514.pdf> Acesso em: 17 out. 2017, 14:13:17

SILEX TECHNOLOGY. **The Importance of Wireless Security**. SILEX TECHNOLOGY Europe GmbH Disponível em:<http://www.silexeurope.com/media/whitepaper/importance-wireless-security_2008.pdf> Acesso em: 16 out. 2017, 17:16:17

SOHRABY, K.; MINOLI, D.; ZNATI, T. **Wireless Sensor Network**, Wiley-Interscience, 2007.

SUETAKE, M.; DA SILVA, I. N.; GOEDEL, A.; ABDALLA, F.; SALVAIA, D.; **Industrial load torque generation for electric machines using fuzzy voltage control strategy of DC machine field winding**. In: 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2009, Tokyo. 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems. p. 1.

TEXAS INSTRUMENT. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors**. Dallas, 2016.

TRZYNADLOWSKI, A. M. **Control of induction motors**. Academic Press, 2001.

WEG. **Dados de placa Motor de indução trifásico**. Grupo WEG - Unidade Motores. 2017. Jaraguá do Sul – SC