



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Ferramenta para avaliação e inferência de parâmetros de redes industriais sem fio

Heitor Medeiros Florencio

Número de Ordem do PPgEEC: M451
Natal, RN, Julho 2015

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Florencio, Heitor Medeiros.

Ferramenta para avaliação e inferência de parâmetros de redes industriais sem fio / Heitor Medeiros Florencio. - Natal, RN, 2015.
89 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Redes de acesso local - Dissertação. 2. Redes Industriais - Dissertação. 3. Redes de sensores sem fio - Dissertação. 4. Redes neurais artificiais - Dissertação
I. Dória Neto, Adrião Duarte. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
III. Título.

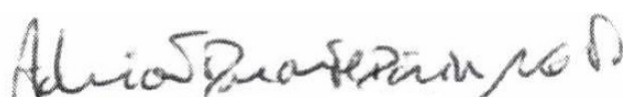
RN/UF/BCZM

CDU 004.725.5

Ferramenta para avaliação e inferência de parâmetros de redes industriais sem fio

Heitor Medeiros Florencio

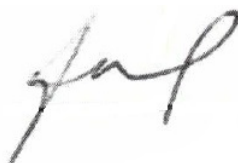
Dissertação de Mestrado aprovada em 20 de julho de 2015 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto (orientador) DCA/UFRN



Prof. Dr. Luiz Affonso Henderson Guedes de Oliveira DCA/UFRN



Prof. Dr. Ivanovitch Medeiros Dantas da Silva IMD/UFRN



Prof. Dr. Dennis Brandão EESC/USP

*Aos meus pais, Florêncio e
Rosângela, e minha irmã, Neuma,
pelo apoio familiar dado durante o
curso.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Florêncio e Rosângela, e minha irmã, Neuma, por estarem sempre ao meu lado durante o curso, apoiando todas as minhas decisões.

Agradeço à Gabriely, por todo apoio, paciência e carinho oferecido durante a realização do trabalho.

Agradeço ao meu orientador, prof. Adrião Duarte, por toda confiança dedicada ao meu trabalho e por todos os momentos de orientações. Sua dedicação à docência serve de inspiração para que eu possa prosseguir com meus objetivos.

À toda equipe do projeto Wireless e aos amigos do LAMP e do LAMII.

Agradeço especialmente ao engenheiro Daniel Lopes por todas as discussões e conselhos durante o curso e pela paciência em transmitir os conhecimentos de engenharia necessários para o desenvolvimento da dissertação.

Agradeço ao Instituto Metrópole Digital (IMD) por todo apoio de infraestrutura através do Núcleo de Pesquisa e Inovação em Tecnologia da Informação (nPITI).

Agradeço ao prof Pablo Javier por todo apoio, confiança e paciência durante os trabalhos realizados no IMD.

Agradeço à CAPES e à Petrobras pelo apoio financeiro.

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo apoio e momentos de descontração.

Resumo

As redes de sensores sem fio (RSSF) estão gradativamente ganhando espaço no ambiente industrial devido à possibilidade de conectar pontos de informação que eram inacessíveis com as redes cabeadas. Contudo, existem vários desafios na implantação e aceitação dessa tecnologia no meio industrial, sendo um deles a garantia de disponibilidade da informação, a qual pode ser influenciada por vários parâmetros, como a estabilidade do caminho de dados e o consumo de energia do instrumento de campo. Nesse sentido, neste trabalho foi desenvolvido uma ferramenta para avaliar e inferir parâmetros de redes industriais sem fio baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a. A ferramenta disponibiliza funcionalidades de avaliação quantitativa, avaliação qualitativa e avaliação por inferência durante um determinado tempo de execução da rede. As avaliações quantitativa e qualitativa são baseadas nas próprias definições dos parâmetros, como o parâmetro de estabilidade, ou em ferramentas da estatística descritiva, como média, desvio padrão e diagramas de caixa. Já na avaliação por inferência é utilizada a técnica inteligente de redes neurais artificiais para estimar alguns parâmetros da rede, como vida útil da bateria. Por fim, são apresentados os resultados do uso da ferramenta em diferentes cenários de redes, topologias em estrela e em malha, com o intuito de atestar a importância do uso da ferramenta na avaliação do comportamento dessas redes, como também, apoiar possíveis adequações ou manutenções do sistema.

Palavras-chave: Redes Industriais, Redes de sensores sem fio, Estatística descritiva, Redes neurais artificiais, WirelessHART, ISA 100.11a.

Abstract

Wireless sensor networks (WSN) have gained ground in the industrial environment, due to the possibility of connecting points of information that were inaccessible to wired networks. However, there are several challenges in the implementation and acceptance of this technology in the industrial environment, one of them the guaranteed availability of information, which can be influenced by various parameters, such as path stability and power consumption of the field device. As such, in this work was developed a tool to evaluate and infer parameters of wireless industrial networks based on the WirelessHART and ISA 100.11a protocols. The tool allows quantitative evaluation, qualitative evaluation and evaluation by inference during a given time of the operating network. The quantitative and qualitative evaluation are based on own definitions of parameters, such as the parameter of stability, or based on descriptive statistics, such as mean, standard deviation and box plots. In the evaluation by inference uses the intelligent technique artificial neural networks to infer some network parameters such as battery life. Finally, it displays the results of use the tool in different scenarios networks, as topologies star and mesh, in order to attest to the importance of tool in evaluation of the behavior of these networks, but also support possible changes or maintenance of the system.

Keywords: Industrial networks, Wireless sensor networks, Descriptive statistics Artificial neural networks, WirelessHART, ISA 100.11a.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Contribuições	4
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Redes industriais sem fio	5
2.1 Principais requisitos	5
2.2 Protocolos de comunicação sem fio: WirelessHART e ISA 100.11a	8
2.3 Eficiência energética	15
3 Elementos matemáticos para avaliação e inferência	24
3.1 Estatística descritiva	24
3.2 Redes neurais artificiais	27
3.2.1 Perceptron de múltiplas camadas (MLP)	33
3.2.2 Redes neurais recorrentes autorregressiva não linear com entradas exógenas	34
4 Ferramenta para avaliação e inferência	36
4.1 Aquisição e registro dos dados: PW-Logger	37

4.1.1	Drivers de comunicação	37
4.1.2	Registro dos dados	38
4.2	PW-DataAnalyzer	42
4.2.1	Avaliação quantitativa	42
4.2.2	Avaliação qualitativa	43
4.2.3	Avaliação por inferência	45
5	Estudo de casos	52
5.1	Estudo de caso 1	52
5.2	Estudo de caso 2	59
5.3	Estudo de caso 3	66
6	Conclusão	71
6.1	Trabalhos futuros	72
6.2	Publicações associadas	72
	Referências bibliográficas	73

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de uma rede WirelessHART	9
2.2	Exemplo de uma rede ISA 100.11a	10
2.3	Diferentes modos de salto de frequência suportados pelo ISA 100.11a. Fonte: [Silva 2013], p. 31	11
2.4	Estimador de vida útil de bateria - SiliconLabs. Fonte: Website da SiliconLabs.	19
2.5	Power Module Life Estimator - Emerson. Fonte: Website Emerson Process Management.	20
3.1	Representação gráfica do diagrama de caixa.	27
3.2	Neurônios interligados formando uma rede neural	28
3.3	Modelo de neurônio artificial de McCulloch-Pitts	30
3.4	Tipos de aprendizagem: supervisionada (a) e não supervisionada (b)	31
3.5	RNA simples de camada única	32
3.6	RNA simples de múltiplas camadas	32
3.7	Rede ARX com dois atrasos na entrada e na saída	35
4.1	Modelo de associação do <i>PW-DataAnalyzer</i> com o <i>PW-Logger</i>	36
4.2	Blocos de informações do <i>PW-Logger</i>	39
4.3	<i>PW-DataAnalyzer</i> e seus módulos de avaliação.	43
4.4	Processo de atraso de amostras	46
4.5	Modelo da rede neural	47
4.6	Fluxograma parcial do sistema de inferência da vida útil da bateria.	49
4.7	Fluxograma final do sistema de inferência da vida útil da bateria.	50

5.1	Rede ISA 100.11a adotada no estudo de caso 01	53
5.2	Gráficos de quantidade de pacotes transmitidos pelos dispositivos de campo de uma rede ISA 100.11a.	54
5.3	Gráficos de quantidade de pacotes falhos na transmissão dos dispositivos de campo de uma rede ISA 100.11a.	55
5.4	Gráficos de pacotes transmitidos e falhos dos dispositivos de campo de uma rede ISA 100.11a.	56
5.5	Gráficos de nível de potência dos sinais recebidos pelos dispositivos de campo de uma rede ISA 100.11a.	57
5.6	Gráfico de estabilidade do caminho entre os dispositivos LD-IS-01 e TT-IS-05.	58
5.7	Gráfico de estabilidade do caminho entre os dispositivos TT-IS-01 e YFGW-BBR001.	58
5.8	Gráfico de estabilidade do caminho e nível de potência do sinal dos vizinhos do dispositivo LD-IS-01.	59
5.9	Topologia adotada no estudo de caso 02.	60
5.10	Topologias de testes.	60
5.11	Linhas do tempo para o funcionamento das redes.	61
5.12	Gráficos de avaliação dos pacotes transmitidos pelos dispositivos de teste.	62
5.13	Gráfico de parâmetros de indicação das rotas primária e secundária do dispositivo ISA 100.11a.	63
5.14	Gráfico de inferência das rotas primária e secundária do dispositivo ISA 100.11a.	64
5.15	Gráfico de parâmetros de indicação das rotas primária e secundária do dispositivo Wireless HART.	65
5.16	Gráfico de inferência das rotas primária e secundária do dispositivo WirelessHART.	66
5.17	Gráfico da vida útil da bateria do dispositivo TT-WH-03.	66
5.18	Parte do gráfico da vida útil da bateria do dispositivo TT-WH-03.	67
5.19	Tela do sistema de inferência utilizando RNA.	68

5.20	Gráficos de validação da rede neural ARX.	69
5.21	Gráfico de inferência da vida útil da bateria do dispositivo TT-WH-03. . .	70

Lista de Tabelas

2.1	Tabela de estimação da vida da bateria da Honeywell. Fonte: 2014-HONEYWELL-alive-on-batteries	20
2.2	Tabela de estimação da vida da bateria da Emerson. Fonte: 2014-EMERSON-SmartPower	21
4.1	Tabela dos gráficos de avaliação quantitativa.	43
4.2	Tabela dos gráficos de avaliação qualitativa.	44

Capítulo 1

Introdução

Depois de tornar-se uma tecnologia indispensável nas nossas vidas, sejam nas tarefas domésticas, pessoais ou profissionais, as redes sem fio estão cada vez mais ganhando espaço no mundo da tecnologia e inovação. A tecnologia de automação, que não poderia ficar de fora, está incluindo essas redes nos sistemas de automação, com o objetivo de aumentar o desempenho desses sistemas.

A conveniência de ser capaz de conectar vários dispositivos sem a utilização de cabos tem conduzido o sucesso das redes de sensores sem fio (RSSF) na indústria [Willig et al. 2005]. Com isso, surge uma maior flexibilidade, baixo custo e facilidade de instalação e manutenção, redução de tempo, enfim pode-se resumir essas vantagens na economia de tempo e de recursos [Costa & Amaral 2012, Gomes et al. 2014]. Nota-se que os custos dos cabos não são os únicos custos numa rede cabeada no campo, existem custos expressivos com bandejas, canaletas, eletrodutos, caixas de passagem, unidades prensa-cabos e seladoras, aterramento de cabos e de suas blindagens, conexões frouxas ou corroídas, entre outros [Bega 2011]. Além disso, as redes industriais sem fio podem alcançar pontos de medição que, até o momento, eram inviáveis para as redes cabeadas.

Em uma RSSF industrial, sensores são embarcados em equipamentos industriais que monitoram parâmetros críticos, como temperatura, pressão e vibração [Gomes et al. 2014]. Assim, tornam-se notórias as vantagens das RSSF quando considerados ambientes agressivos, os quais contêm elementos químicos, vibrações ou partes móveis que podem danificar o cabeamento [Willig et al. 2005].

As RSSF industriais discutidas neste trabalho são baseadas no padrão IEEE 802.15.4, o qual define especificações para baixo consumo de energia dos nós sensores da rede, característica interessante para um cenário industrial. Porém, para uma consolidação dessas tecnologias na indústria é preciso que as redes sem fio garantam as vantagens já ci-

tadas sem perda de qualidade de serviço comparado as redes cabeadas já difundidas no mercado.

Existem vários desafios a serem enfrentados para implementação da comunicação sem fio no ambiente industrial, pois a utilização de um meio inerentemente não confiável pode ser agravado devido a presença de ruídos e interferências na faixa de espectro utilizada [Gomes et al. 2014]. As interferências que surgem no espectro são de fontes e tipos variados, sejam por rádios fora da rede operando na mesma faixa de frequência, máquinas e objetos fixos ou móveis que refletem, refratam ou difratam as ondas, entre outros. Com isso, é necessário o desenvolvimento de técnicas que garantam o melhor desempenho do sistema, considerando o menor consumo de energia, a maior velocidade de transmissão de dados e a maior confiabilidade dessas redes.

Além disso, faz-se necessário o conhecimento dos requisitos que garantem o correto funcionamento dos padrões sem fio no ambiente industrial. Alguns desses requisitos são definidos como recomendações na norma NAMUR-NE 124, como interoperabilidade, intercambiabilidade, disponibilidade, confiabilidade, tempo real, segurança dos dados, coexistência com múltiplas tecnologias e múltiplas aplicações, baixo consumo de energia, automonitoração, diagnóstico e integração transparente com sistemas de automação [Lugli 2014]. Outros requisitos foram definidos através do uso dessas redes em outros ramos e de pesquisas realizadas na área, como a capacidade autoconfiguração e auto-organização da rede, garantia da confiabilidade dos caminhos, baixa latência e comportamento previsível da rede [Kumar Somappa et al. 2014]. Apesar da necessidade de monitoramento e/ou controle de várias grandezas físicas, o tráfego de dados não necessita de uma largura de banda elevada.

Como já mencionado, para que as redes industriais sem fio sejam aceitas no mercado da automação industrial, é necessário que os requisitos citados anteriormente sejam atendidos. Porém, para conseguir verificar a validação desses requisitos, devem existir parâmetros que avaliem o funcionamento dessas redes através de ferramentas matemáticas ou, simplesmente, de inferência a partir do conhecimento dos especialistas, ou melhor, dos usuários da tecnologia. Esses parâmetros devem ser coletados, processados e disponibilizados para todos os usuários da tecnologia.

Muitos trabalhos desenvolvidos e em desenvolvimento baseiam-se no uso de técnicas inteligentes para melhorar o desempenho das RSSF industriais, sendo algoritmos de roteamento, consumo de energia e segurança os temas mais abordados. De acordo com [Kulkarni et al. 2011], os desenvolvedores de equipamentos de RSSF não estão completamente cientes do potencial que os algoritmos de técnicas inteligentes podem oferecer

e pesquisadores, na maioria das vezes, não estão familiarizados com todos os problemas reais. Com isso, faz-se necessário a inclusão de técnicas inteligentes para avaliar e inferir parâmetros das redes.

Nesse sentido, o desenvolvimento de uma ferramenta que incorpore ferramentas matemáticas e computacionais, como técnicas inteligentes, pode trazer grandes vantagens tanto para o desenvolvedor da tecnologia, que poderá validar ou não seu produto, como para os usuários da tecnologia, que poderão escolher a tecnologia mais confiável. Essas ferramentas de avaliação podem disponibilizar análises do estado de funcionamento dos dispositivos e da rede, ou melhor, disponibilizando parâmetros de diagnóstico dos dispositivos e da rede.

1.1 Motivação

Em geral, os profissionais das áreas de tecnologia da informação e tecnologia da automação estão cientes que as comunicações sem fio devem ser incorporadas aos sistemas de automação. Desde sistemas de automação residencial até os sistemas de automação industrial. Porém, para que uma tecnologia consiga penetrar no mercado, qualquer que seja a tecnologia, ela deve ser testada e aprovada. Com isso, as redes sem fio para ambientes industriais estão passando por essa etapa.

Os sistemas de monitoramento das redes industriais sem fio disponibilizados pelos fabricantes, na maioria das vezes, não disponibilizam todas as informações da rede. Ou, até mesmo, disponibilizam vários dados sem nenhuma informação relevante para o usuário da rede.

Com base no contexto apresentado anteriormente, o desenvolvimento de uma ferramenta que avalie o comportamento de uma rede industrial sem fio e faça a inferência do comportamento de parâmetros, como a vida útil da bateria, pode auxiliar em importante decisões na fase de projeto e manutenção do sistema. Previsão de troca de bateria de um ou mais instrumentos e alteração da localização dos dispositivos em uma rede em malha para evitar a perda de pacotes são exemplos de decisões possíveis de serem tomadas com o uso de uma ferramenta de avaliação.

1.2 Contribuições

Dentre as contribuições da ferramenta de avaliação e inferência para redes industriais sem fio, baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a, desenvolvida nesta dissertação está o fato de poder avaliar diversos parâmetros dessas redes, como estabilidade dos caminhos, quantidade de pacotes transmitidos e falhos, e nível de potência do sinal, para analisar o comportamento da rede e verificar possíveis falhas na fase de projeto. Essa é a maior contribuição desta dissertação pois a implantação de redes sem fio no chão de fábrica é recente e torna-se de extrema importância o conhecimento do desempenho dessas redes diante de diferentes situações.

1.3 Estrutura da dissertação

Neste primeiro capítulo foi apresentado uma introdução ao tema da dissertação, enfatizando na importância do desenvolvimento da ferramenta. Já o segundo capítulo apresenta uma visão geral das redes industriais sem fio, área foco da ferramenta desenvolvida. Continuando com a apresentação de conceitos, no capítulo 3 são apresentados alguns conceitos dos elementos matemáticos que foram utilizados para desenvolver a ferramenta. Após conhecer os conceitos, serão apresentados os módulos e as funcionalidades da ferramenta desenvolvida. Por fim, o capítulo 4 apresenta alguns resultados da aplicação da ferramenta em três estudos de casos e o capítulo 5 descreve as conclusões retiradas do desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 2

Redes industriais sem fio

Com o avanço da tecnologia tem sido mais comum o uso de comunicações sem fio (wireless) em ambientes profissionais e pessoais, seja por motivos de mobilidade, redução de custos ou variedade de aplicações. Com isso, tornou-se imprescindível a produção de equipamentos com a tecnologia wireless, que em conjunto conseguem formar uma grande rede de monitoramento e atuação a distância, ou melhor, sem a presença física de um humano. Essa tecnologia está bastante visível na atual revolução tecnológica que tem como objetivo conectar todas as coisas através de uma rede mundial, a internet das coisas.

As redes de sensores sem fio fazem parte desse grande grupo de tecnologias que pretendem interconectar vários equipamentos através da comunicação sem fio. Nesse capítulo será apresentada uma visão geral das redes de sensores sem fio (RSSF) industriais, incluindo características de dois principais protocolos de redes industriais sem fio: WirelessHART e ISA 100.11a.

2.1 Principais requisitos

Diante do aumento do uso das redes sem fio, tornou-se necessário a criação do grupo de redes de sensores sem fio (RSSF), que tem por objetivo interconectar sensores com capacidade de comunicação em uma rede sem fio. As redes de sensores sem fio (RSSF) são formadas por nós equipados com sensores ou atuadores com capacidade de comunicação via radiofrequência. Essas redes surgiram como alternativa para os sistemas de monitoramento que apresentavam pouca flexibilidade [Gomes et al. 2014]. Atualmente, as RSSF são amplamente utilizadas na construção de ambientes inteligentes com sistemas de automação e controle e são encontrados também em aplicações na área de casas inteligentes, transporte e monitoramento de saúde [Kumar Somappa et al. 2014].

Na automação industrial os benefícios do uso de tecnologias sem fio são múltiplos. Em primeiro lugar, a redução de custo e de tempo necessário na manutenção e instalação dos sistemas, que pode reduzir substancialmente a quantidade de materiais atrelados ao cabeamento, consequentemente facilitando na configuração ou reconfiguração do projeto da planta industrial. Essa redução é essencial em ambientes agressivos onde existem produtos químicos, vibrações ou partes móveis que podem danificar qualquer tipo de cabeamento [Willig et al. 2005]. Além disso, outros fatores como flexibilidade e diagnóstico tornam as redes de sensores sem fio industriais (RSSFI) ainda mais essenciais na melhoria dos sistemas de automação.

A implantação de sistemas com comunicação sem fio por si própria já apresenta vários problemas, muitos deles relacionados ao uso do meio sem fio, que está exposto a interferências de diversos tipos. Essas interferências podem ser de várias fontes, seja por outras tecnologias sem fio no mesmo raio de alcance ou pelas próprias propriedades das ondas, como reflexão, refração e difração. Quando aplicado ao ambiente industrial surgem novos obstáculos para garantir uma confiabilidade no envio dos dados dessas redes, um deles é a necessidade de equipamentos de baixo consumo de energia. Muitos desses sensores e atuadores podem estar alocados em unidades de monitoramento inviáveis para uma troca de bateria constante.

Existem vários requisitos a serem atendidos pelos protocolos de redes sem fio para um funcionamento adequado no meio industrial, abaixo segue os principais.

Interoperabilidade: É a capacidade de redes de diferentes fabricantes, mas de mesmo padrão, operarem em conjunto com um propósito específico.

Confiabilidade: É definido como a probabilidade de um defeito do sistema não ter ocorrido no intervalo $[0, t]$ [Silva 2013]. Com outras palavras, a confiabilidade é a capacidade de uma rede funcionar corretamente, como especificada, em condições normais e especiais, dentro de um período de tempo pré-determinado.

Disponibilidade: É definido como a probabilidade do sistema estar operacional no instante de tempo t .

Tempo real: É a capacidade da solução de comunicação sem fio atender cenários com requisitos de comunicação em tempo real em termos de parâmetros determinísticos

e de latência [Lugli 2014].

Segurança: É a definição de mecanismos que garantam o tráfego dos dados de forma segura e codificada no meio, como também o acesso à rede sem fio através de autenticação.

Coexistência e resistência a ruídos: É a capacidade de uma rede operar normalmente, resistindo aos ruídos presentes no espectro, em conjunto com outras tecnologias de comunicação sem fio que operem na mesma faixa de frequência.

Automonitoração e diagnóstico: É o requisito que recomenda a disponibilização de dados e estatísticas sobre vários parâmetros da rede, como nível de potência dos sinais, o estado da bateria, identificação de erros, latência, entre outros.

Eficiência energética: É o requisito que solicita um baixo consumo de energia dos dispositivos sensores da rede.

Autoconfiguração e auto-organização: É a capacidade dos dispositivos da rede operarem independente da intervenção humana durante longos períodos de tempo [Kumar Sompappa et al. 2014].

Qualidade de serviço (QoS): É a capacidade da rede de atender as especificações de requisitos de serviço com qualidade mínima ou máximo exigida pela aplicação. Existem requisitos de vários tipos, desde o tempo mínimo de transferência de um dado em uma determinada aplicação até a cobertura mínima que a rede deve operar.

Escalabilidade: É a capacidade das redes serem suficientes para acomodar novos nós sensores sem alterar a qualidade do serviço. As redes precisam ser escaláveis para fins de aumento de grandes números de dispositivos de campo.

2.2 Protocolos de comunicação sem fio: WirelessHART e ISA 100.11a

Os protocolos de comunicação para redes industriais sem fio se baseiam principalmente em normas padronizadas, como as normas das famílias IEEE 802.11 e IEEE 802.15. Ambas essas famílias de padrões foram concebidas para fins de aplicação diferentes de automação industrial. Os padrões baseados na IEEE 802.11 oferecem altas taxas de dados na ordem de dezenas de Mbits/s, variando a distância entre dispositivos até dezenas e centenas de metros, enquanto que os padrões baseados em IEEE 802.15 suportam apenas as taxas de centenas de kbits/s até alguns Mbits/s para poucas centenas de metros. No entanto, o IEEE 802.11 consome uma grande energia comparado ao IEEE 802.15. Portanto, para um baixo consumo de energia é preferível o uso dos padrões da família IEEE 802.15 [Christin et al. 2010].

Diante da existência de todos os requisitos para o ambiente industrial, foram desenvolvidos alguns protocolos de redes industriais sem fio baseados no padrão IEEE 802.15, dos quais serão citados apenas dois: WirelessHART e ISA 100.11a. O WirelessHART é resultado da inclusão de uma interface de comunicação sem fio no protocolo HART, através da revisão 7, pela HART Communication Foundation (HCF) (IEC, 2010). Quase em paralelo, a International Society of Automation (ISA) deu início aos trabalhos de definição de uma família de padrões de sistemas sem fio para o ambiente industrial, o ISA100, emergindo como primeiro padrão o ISA 100.11a [Petersen & Carlsen 2011, Standard 2009].

Conforme citado anteriormente, os dois protocolos baseiam-se na família de padrões IEEE 802.15, mais especificamente no padrão IEEE 802.15.4. Nesse padrão, as comunicações devem operar na faixa de frequência livre de 2,4 GHz ISM ocupando os canais de 11 a 26, cada um com largura de banda de 5MHz, e com modulação O-QPSK (Offset Quadrature Phase-Shift Keying). Contudo, o canal 26 não é utilizado em alguns países por regulamentações próprias. A taxa de comunicação é de no máximo 250 kbps, mas estudos experimentais em [Gomes et al. 2014] mostraram que a taxa de bits máxima real é em torno de 153 kbps.

Todos os elementos das redes dos dois protocolos têm suas características e atribuições bem definidas. Os elementos constituintes de uma rede WirelessHART são: gerente da rede, gerente de segurança, gateway (ponte de comunicação entre duas tecnologias), dispositivo de campo não roteador, dispositivo de campo roteador, adaptador e dispositivo portátil. Enquanto que em uma rede ISA 100.11a temos os seguintes elementos: gerente

da rede, gerente de segurança, gateway, dispositivo de campo não roteador, dispositivo de campo roteador backbone, dispositivo de campo roteador e dispositivo portátil. As figuras 2.1 e 2.2 mostram exemplos dessas redes, tanto para o protocolo WirelessHART como ISA 100.11a.

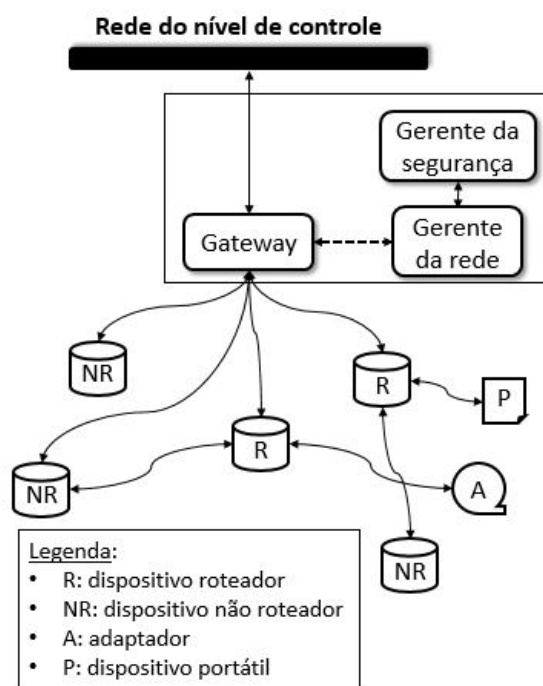


Figura 2.1: Exemplo de uma rede WirelessHART

A forma com que esses elementos estão arquitetados ou organizados é chamada de topologia. Ambos os protocolos utilizam a topologia da rede em malha (mesh). Nesta topologia, um dispositivo pode servir como roteador das mensagens de outro dispositivo até o seu destino final. Isto faz com que o alcance da rede seja maior, além de criar redundância de caminhos, atenuando problemas interferências e contribuindo para o aumento da confiabilidade da rede [Costa & Amaral 2012]. Além disso, eles empregam o mecanismo de múltiplos saltos de frequência na tentativa de maximizar a confiabilidade da rede.

A partir daqui é interessante considerar algumas características dos protocolos baseando-se nos requisitos para implantação dessa tecnologia nos sistemas de automação.

Interferência e coexistência

Além do uso da técnica de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA), os dois protocolos utilizam a técnica de salto de canais de frequência (Channel hopping) e a lista

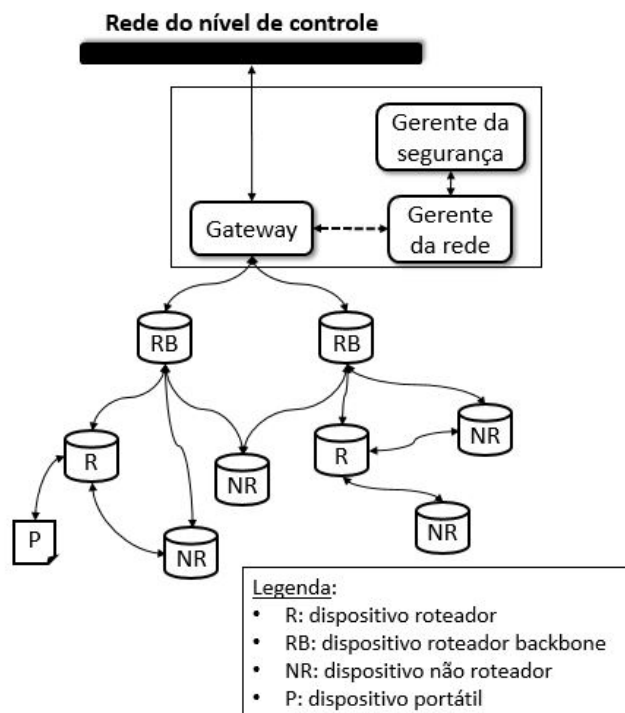


Figura 2.2: Exemplo de uma rede ISA 100.11a

negra de canais (channel blacklisting) para diminuir o efeito da interferência. O salto de canais de frequência é uma técnica em que a transferência de dados ocorre em frequências diferentes a cada período de tempo. O pacote de dados, chamado de superframe, é dividido em vários slots de tempo (time slots), determinado pelo TDMA, e em cada slot a transferência de dados é realizada em uma frequência diferente. Porém, existem algumas pequenas diferenças no modo de uso dessas técnicas. O padrão WirelessHART suporta até 15 canais que são utilizados alternadamente em um *time slot* fixo de 10 ms, ao contrário do ISA 100.11a que utiliza *time slot* configurável de 10 a 12 ms.

Além disso, o protocolo WirelessHART só define um modo de salto de canal, onde o canal é escolhido de forma pseudoaleatório, isto é, utilizando uma fórmula matemática que depende do valor ASN (Absolute Slot Number) e do valor de offset dos canais. O ASN é uma variável do sistema que é incrementada sempre que é criado um novo slot para transmissão de dados. E, por outro lado, o ISA 100.11a define três modos de saltos de frequência: slotted, lento e híbrido. A figura 2.3 mostra um exemplo de funcionamento desses três modos de saltos.

No primeiro modo de salto de frequência, cada comunicação ocorre em uma frequência diferente, seguindo alguns padrões pré-definidos. A ordem dos canais a ser seguida

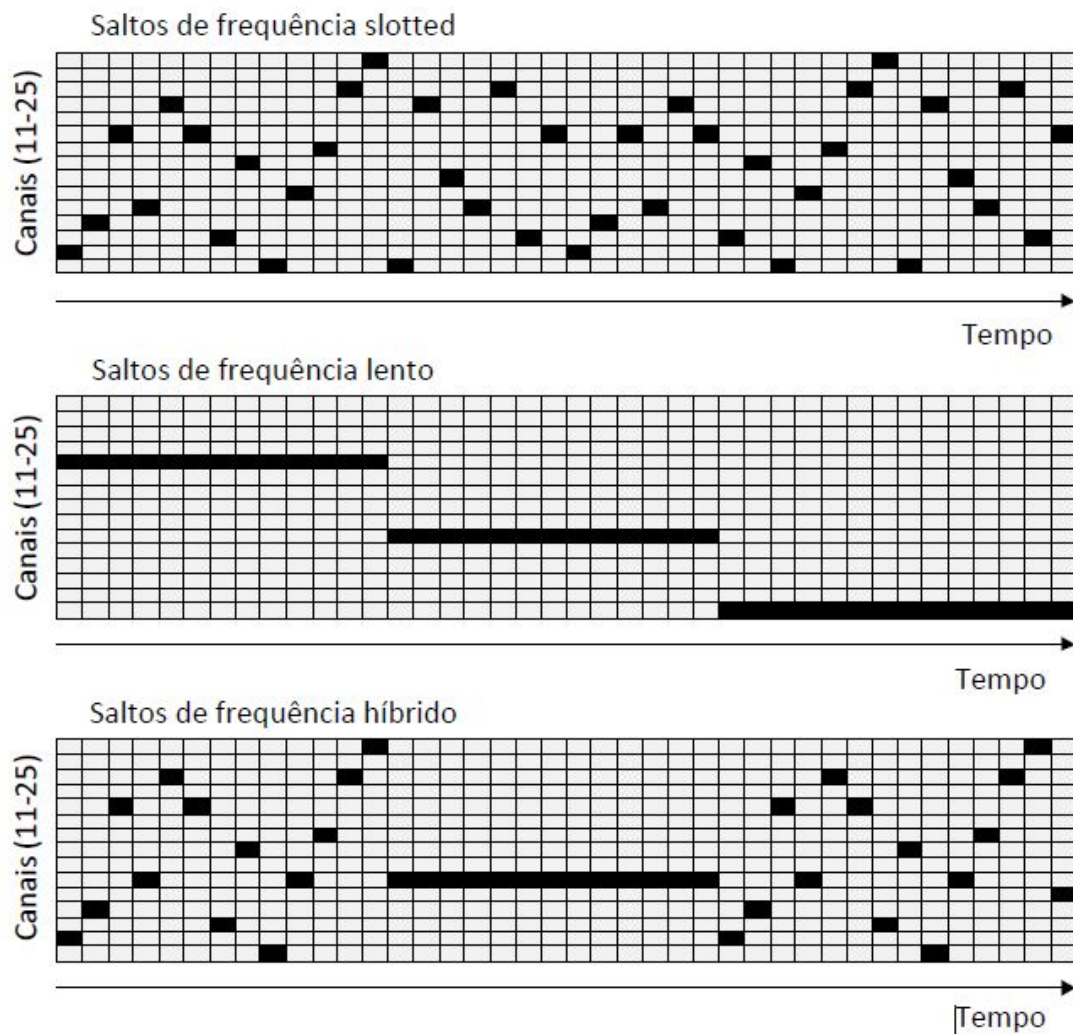


Figura 2.3: Diferentes modos de salto de frequência suportados pelo ISA 100.11a. Fonte: [Silva 2013], p. 31

é definida com a finalidade de otimizar a coexistência com redes IEEE 802.11. Por outro lado, no modo de saltos de frequências lento, os dispositivos modificam o canal de comunicação apenas em intervalos específicos (100ms a 400ms). A desvantagem desse modo está relacionada com o aumento no consumo de energia. Por fim, um modo de saltos de frequência híbrido utilizando ambas características dos modos anteriores pode ser utilizado para otimizar o envio de alarmes e retransmissões [Silva 2013].

Os canais que irão para a lista negra são definidos com base em dados estatísticos enviados pelos dispositivos a um gerenciador de rede, que tem o poder de interditar o uso de um determinado canal de frequência. Assim, o canal fica indisponível para aquele determinado dispositivo enviar dados. Um diferencial do protocolo ISA 100.11a é o uso

do mecanismo *adaptive hopping*, técnica semelhante ao *channel blacklisting* que difere na decisão do envio do canal para a lista negra. Nessa técnica a decisão da inclusão na lista negra é feita pelo próprio dispositivo, através de dados estatísticos de parâmetros de comunicação sem fio coletados pelo mesmo.

Confiabilidade e tolerância a falha

Além de definir técnicas como o uso do TDMA em conjunto com salto de canais de frequência e lista de negra de canais, os protocolos definem topologias que permitem o uso de rotas redundantes e o mecanismo de uso dessas rotas é definido pelo algoritmo de roteamento.

A especificação do WirelessHART define quatro tipos de roteamento: roteamento na origem, roteamento em grafo, roteamento baseado no superframe e roteamento de proxy. Todos esses tipos de roteamento utilizam como base as informações coletadas pelos dispositivos e enviadas para o gerente da rede, o qual é responsável por definir o roteamento [Silva 2013]. Já no protocolo ISA 100.11a a rede é organizada (camada de enlace) em sub-redes. Cada sub-rede é formada por um dispositivo roteador backbone, consequentemente existe roteamento tanto a nível de backbone como a nível de dispositivos de campo (nível de rede) [Costa & Amaral 2012]. No roteamento a nível de rede em malha, equivalente ao WirelessHART, o ISA 100.11a define o roteamento em grafo e na origem.

Um mecanismo interessante que foi adicionado ao ISA 100.11a é o endereçamento 6LoWPAN, que especifica a transmissão de pacotes Ipv6. Esse mecanismo pode ser utilizado na comunicação entre dispositivos roteadores backbones, podendo assim construir redes bastante escaláveis e com grande número de dispositivos interconectados.

Ao energizar uma rede, todos os dispositivos de campo, seja dispositivo final ou dispositivo roteador, procuram seus vizinhos para definir ligações(links) com eles. Esses links podem ser ativados ou não, dependendo da forma com que as rotas primárias e redundantes foram definidas. A definição das rotas primárias e redundantes é realizada pelo algoritmo de roteamento, que é específico de cada desenvolvedor, isto é, o algoritmo de roteamento é deixado em aberto nas especificações em ambos os protocolos. Com isso, cada empresa desenvolvedora de equipamentos dessas redes tem o papel de desenvolver o melhor algoritmo possível para ganhar o mercado.

Segurança

Em relação à segurança, o protocolo WirelessHART permite a combinação de criptografia AES (Advanced Encryption Standard) de 128 bits e o MIC (Message Integrity Code) para garantir a segurança ponto-a-ponto da informação. Já para garantir integridade na comunicação fim-a-fim, da origem até o destino, e a autenticação são utilizados quatro tipos de chaves: chave pública, usada quando a chave de rede não é relevante, chave de rede, compartilhada por todos os dispositivos existentes na rede para usar na geração MAC MICs, chave de *join*, para um novo dispositivo se juntar à rede, e chave de sessão, para confidencialidade e integridade de dados na comunicação fim-a-fim [Chen et al. 2010].

O ISA 100.11a, além de utilizar a técnica de criptografia AES-128 nas mensagens, equivalente ao WirelessHART, possui algumas características especiais para aumentar a segurança no tráfego da informação. Uma delas é o time stamp, ou seja, um tempo máximo para realizar a transmissão. Caso a informação não seja transmitida dentro desse tempo, pré-configurado pelo usuário, essa comunicação é vista como um possível ataque à rede a informação é descartada [Lugli 2014].

Com relação as desvantagens, verifica-se que nenhum dos protocolos fornece soluções para evitar a geração de colisões por uma fonte mal intencionada ou contra inúmeros pedidos de conexão [Lugli 2014].

Coexistência

Existem vários trabalhos sendo desenvolvidos para verificar a coexistência entre sistemas de comunicação sem fio que utilizam o mesmo meio de comunicação.

Em [Yang et al. 2010] foram realizados estudos das soluções atuais para evitar problemas de coexistência e dos modelos de análise desse fator. Nesse trabalho, concluiu-se que a essência do problema da coexistência está na colisão de uso do espectro e a principal forma de evitar é utilizando técnicas de diversidade na frequência, no tempo e no espaço. Muitas das soluções atuais já apresentam essas técnicas, porém a combinação dessas técnicas de diversidade na frequência, como salto de canais, e no tempo, como TDMA, não é especificada de forma clara nos protocolos. Para um melhor desempenho dessas técnicas devem ser definidos, também, algoritmos eficientes na escolha dos canais de comunicação, na definição dos slots, entre outros parâmetros definidos pelas técnicas. Existem outras conclusões apresentadas em [Yang et al. 2010] que não serão descritas

aqui.

Em [Rezha & Shin 2014] é realizado uma avaliação do desempenho de uma rede ISA 100.11a sob interferência de uma rede sem fio IEEE 802.11b. A avaliação é baseada na taxa de erro (PER), utilizando a probabilidade de perda de pacotes, o tempo de colisão, e no tempo de atraso fim-a-fim. Resultados de simulações indicaram que o protocolo ISA 100.11a, mesmo exposto a interferência do IEEE 802.11b, alcança uma PER aceitável e um atraso satisfatório para aplicações de monitoramento e controle de processos.

Interoperabilidade

Conforme já mencionado, espera-se que dispositivos de um mesmo protocolo e de diferentes desenvolvedores consigam se comunicar entre si, assim garantindo a característica de interoperabilidade. Alguns trabalhos mantêm esforços na avaliação desse fator, como em [Lopes et al. 2015].

De acordo com [Lopes et al. 2015], foram realizados testes de interoperabilidade com equipamentos dos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a. Nesses testes, foram adotados dispositivos de três fabricantes diferentes para o WirelessHART e dois para o ISA 100.11a, e realizadas algumas misturas com gerenciadores de rede e dispositivos de campo de diferentes fabricantes e de mesmo protocolo, obtendo sucesso em todos os testes. Com isso, o artigo mostrou que a indústria pode escolher os equipamentos que melhor atenderem as suas especificações, pois o quesito de interoperabilidade está sendo atendido.

Além desses fatores requisitados pela indústria, é necessário conhecer um pouco sobre as formas de comunicação com os outros setores do sistema de automação, especificações definidas na camada de aplicação dos protocolos. No ISA 100.11a, a camada de aplicação é orientada a objetos. Neste paradigma, um dispositivo real, por exemplo uma entrada analógica, é modelado em um objeto de software, que contém o valor e o status da variável. Já no WirelessHART, a publicação de dados de processo e set-points é realizada periodicamente na rede quando tem uma mudança significativa dos valores. A camada de aplicação é baseada em comandos HART, assim como no padrão HART6. Porém, a diferença entre as versões dos padrões 6 e 7 está na inclusão de comandos específicos para comunicações wireless.

E, por fim, quanto à eficiência energética, os protocolos WirelessHART e ISA 100.11a utilizam o padrão IEEE 802.15.4 na camada física. O padrão é utilizado em conjunto com a técnica TDMA, definida na camada de enlace, com o intuito de reduzir o consumo de

energia. Além disso, existem vários profissionais preocupados na avaliação desse parâmetro para garantir um desempenho adequado da tecnologia. É de fato preocupante, pois o alto consumo de energia dos dispositivos causa a falta de controle na vida útil da rede.

2.3 Eficiência energética

A eficiência energética é o requisito que garante o baixo consumo de energia dos dispositivos da rede, aspecto essencial de protocolos baseados no padrão IEEE 802.15.4. Nesse sentido, existe a necessidade de desenvolver tecnologias de redes de sensores sem fio que necessitem o mínimo de energia para o seu funcionamento, com isso aumentando a vida útil da rede e, conseqüentemente, protelando a manutenção do sistema.

Com a necessidade de prolongar a vida útil da rede, conseqüentemente a partir do prolongamento da vida útil dos dispositivos que fazem parte dela, deve ser considerado a minimização do consumo de recursos, com o intuito de reduzir o consumo de energia, nas etapas de projeto e implementação dessas redes.

Um sensor de uma rede de sensores sem fio é um pequeno dispositivo que inclui três componentes básicos: um subsistema de sensoriamento para aquisição de dados do ambiente, um subsistema de processamento para processar o dado e armazená-lo, e um subsistema de comunicação sem fio para transmitir o dado [Baidya & Baidya 2015]. Cada subsistema desses tem tarefas que consomem uma determinada quantidade de energia, como a inicialização da antena no subsistema de comunicação sem fio e a leitura do sensor no subsistema de sensoriamento. Porém, a maior parte da energia consumida em redes de sensores sem fio é devido às atividades de sensoriamento e comunicação [Collotta et al. 2014]. Com isso, o projeto dessas redes deve ponderar o uso de recursos com a energia consumida em todos esses sistemas.

Existem várias estratégias de diminuir o consumo de energia, sejam por técnicas de conservação de energia, técnicas de compressão de pacotes ou técnicas de roteamento. Muitas dessas estratégias estão sendo desenvolvidas baseando-se no melhoramento de mecanismos de roteamento com o intuito de reduzir o consumo de energia pelas rotas. Além disso, grande parte dessas estratégias utiliza o conceito de roteamento por cluters, que divide a rede em agrupamentos e escolhe um nó por agrupamento (nó cabeça) para transmitir os pacotes para outros agrupamentos ou para a estação base. Nessa perspectiva, foram desenvolvidos vários protocolos de roteamento por agrupamento (clustering), como LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), EEUC (Energy Efficient Unequal

Clustering) [Goyal n.d.], PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems) e HEED (A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks) [Beitollahzadeh et al. 2013].

Em [Arumugam & Ponnuchamy 2015] foi desenvolvido um protocolo que utiliza o LEACH como referência. O protocolo LEACH propõe que cada nó do agrupamento possa escolher qual será o nó cabeça do cluster, ou melhor, qual o nó que enviará o seu dado até a estação base. Entretanto, no protocolo desenvolvido por [Arumugam & Ponnuchamy 2015] é realizada uma agregação dos dados da rede para calcular um fator de energia residual de cada nó sensor, fator que irá definir qual será o nó cabeça do cluster, ou seja, qual nó irá transmitir as informações.

Mesmo que o consumo de energia seja um dos fatores mais críticos da rede, os protocolos de roteamento devem considerar todos os fatores cruciais, como consumo de energia e confiabilidade, na etapa de projeto da rede. Em [Kiani et al. 2015] é desenvolvido um protocolo de eficiência energética que reduz a sobrecarga do sistema e aumenta a confiabilidade. Esse protocolo utiliza o mecanismo de roteamento por clustering utilizando máquinas de aprendizagem por reforço para selecionar o melhor nó cabeça de cada agrupamento. A rede é baseada em aprendizagem por reforço com múltiplos agentes. Cada nó sensor da rede será um agente, cada agente pode ganhar ou perde uma recompensa, dependendo se a transferência de um pacote foi confiável e energeticamente eficiente, e o valor total de recompensa será o fator usado na seleção do nó cabeça.

Trabalhos que desenvolvem algoritmos de roteamento não são os únicos que garantem a eficiência energética. Em [Collotta et al. 2014], foi desenvolvido um sistema de gestão de recursos energético a fim de reduzir o consumo médio de energia de cada nó sensor. O sistema foi baseado em lógica fuzzy, mecanismo esse que incorpora a experiência, a intuição e o conhecimento do especialista no sistema. O modelo desenvolvido avalia a variação de temperatura detectada pelo sensor e, com base no mecanismo de inferência, modifica a taxa de amostragem com o objetivo de reduzir o consumo de energia do sensor.

Em [Beitollahzadeh et al. 2013] é proposto uma redução no consumo de energia utilizando algoritmos de roteamento por clustering e técnicas inteligentes, como lógica fuzzy e redes neurais. O algoritmo escolhe o melhor nó sensor a partir de inferências fuzzy que tem como dados de entrada a energia consumida e parâmetros de localização do nó (distância, centralização e dispersão).

Além dos trabalhos resultantes de pesquisas, existem também considerações da utilização de recursos com redução de consumo descritas nas próprias normas dos protocolos

de comunicação. A própria definição do elemento Gateway nas tecnologias de redes de sensores sem fio já tem o propósito de garantir um baixo consumo de energia da rede. De acordo com [Standard 2012],

*Legacy protocols were not designed to operate over wireless networks. They do not access information in a manner that conserves energy, and they often are intolerant of delayed access to quiescent devices that are conserving energy. The gateway support functionality of this standard is, in large part, intended to enable the construction of gateways that adapt legacy protocols to the requirements of low-energy-consumption wireless devices.*¹

Nesse sentido o elemento Gateway realiza a adequação dos pacotes recebidos por outras redes, como redes de computadores do padrão Ethernet cabeado, para trafegar a informação pelas redes de sensores com baixo consumo.

No mesmo protocolo, definido pela norma [Standard 2012], foi definido a utilização da técnica de tunelamento nas redes de sensores sem fio industriais, a qual permite o transporte de um pacote de dados de um protocolo de comunicação através de uma rede baseada em outro protocolo. No entanto, o tunelamento não é um mecanismo adequado para aplicações que requerem um baixo consumo de energia, pois os tamanhos dos pacotes de protocolos que não são definidos para comunicação de baixo consumo são, na maioria dos casos, grandes. Esse fator pode causar a sobrecarga do pacote, com isso influenciando na energia consumida pelo sensor. Contudo, a norma definiu um mecanismo que implementa o tunelamento com a inclusão de técnicas que minimizam a sobrecarga de pacotes, por consequência aumentando a eficiência energética, chamado de Foreign protocol application communication (FPAC).

Apesar da definição de mecanismos utilizados para a implementação de protocolos com baixo consumo de energia, existem também as definições das formas de fonte de energia que os sensores podem ser alimentados. De acordo com as normas [Standard 2012] e [Standard 2010], os dispositivos de campo podem ser alimentados por rede de distribuição de energia (incomum), bateria limitada, bateria recarregável, dispositivos de captação de energia do ambiente, como solar e eólica, ou a combinação dessas fontes citados.

¹Protocolos legados não foram projetados para operar sobre redes sem fio. Eles não acessam as informações de maneira que conserve energia, e eles, geralmente, são intolerantes com atrasos de acesso para dispositivos em repouso, que estão conservando energia. As funcionalidades de suporte do gateway desta norma são, em grande parte, destinadas a permitir a construção de gateways que se adaptam a protocolos legados para os requisitos de dispositivos sem fio de baixo consumo de energia.

Baseados nessas várias formas de fonte de energia alguns pesquisadores estão avaliando o uso de energias proveniente do ambiente. Em [Semente et al. 2013] foi desenvolvido e avaliado um circuito carregador de bateria para nós sensores usando painéis solares.

Observa-se que a maioria das pesquisas desenvolvidas ou em desenvolvimento, as quais têm como principal objetivo a redução do consumo de energia, estão focadas na etapa de projeto do sistema. Porém, o conhecimento do consumo de energia da rede é um parâmetro essencial nas etapas de implantação e manutenção preventiva do sistema, as quais, na maioria das vezes, são executadas pelo usuário da tecnologia. A falta de previsão do período que a rede estará funcionando corretamente, desde a partida da rede até o esgotamento das fontes de energia dos dispositivos, pode tornar a tecnologia inadequada para aplicações industriais. Sendo assim, é de extrema importância que o usuário tenha sabedoria da vida útil da rede, ou melhor, do tempo restante que todos os elementos da rede estarão funcionando corretamente.

As normas referentes aos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a define regras para oferecer informações ao usuário sobre o tempo de vida útil dos dispositivos, possibilitando o conhecimento da vida útil da rede. De acordo com a norma [Standard 2012],

*The energy source status of devices is critical to proper system management. All devices shall provide energy supply information to the system manager [...]*²

*EnergyLife indicates the device's energy life by design. A positive value provides energy life in days; a negative value provides energy life magnitude in hours. A value of 0xFFFF indicates a continuous power source and no constraining device energy limitations [...]*³

Observa-se que a norma [Standard 2012] obriga que o desenvolver informe ao usuário o parâmetro de vida útil do dispositivo. Da mesma forma, a norma [WirelessHART] também define que o parâmetro de vida útil, chamado de "BatteryLife", o qual deve ser informado em unidade de dias.

Por fim, é necessário entender um pouco mais sobre o termo de vida útil da rede ou dos dispositivos e conhecer algumas formas de se obter tal parâmetro.

²O estado da fonte de energia dos dispositivos é fundamental para a gestão do sistema. Todos os dispositivos devem fornecer informação da fonte de energia para o gerenciador do sistema [...]

³O parâmetro *EnergyLife* indica a vida útil do dispositivo. Um valor positivo fornece a vida útil em dias; um valor negativo fornece a vida útil em horas. Um valor de 0xFFFF indica uma fonte de energia contínua e sem limitação de fonte de energia [...]

Tempo de vida útil da bateria

O tempo de vida útil da bateria, do dispositivo ou da rede é o principal parâmetro para indicar aos consumidores das redes de sensores sem fio quando será necessário realizar uma manutenção no sistema para troca ou recarga das baterias dos sensores de campo. Garantindo, assim, a manutenção preventiva e evitando uma falha da rede devido à falta de alimentação. Porém, essa garantia só será possível se a estimativa desse parâmetro for realizada adequadamente.

Já existem alguns estimadores de vida útil da bateria ou do dispositivo aplicados às tecnologias de redes de sensores sem fio. A empresa "Silicon Labs", que desenvolve produtos na área de redes de sensores sem fio, internet das coisas, entre outras, disponibiliza em seu website um estimador de tempo de vida de bateria como pode ser visto na figura 2.4.

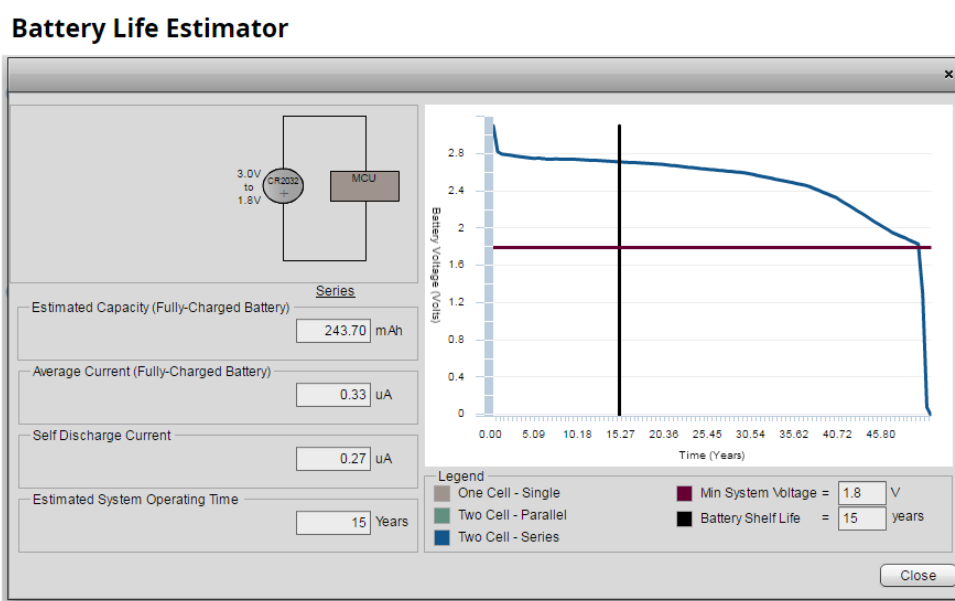


Figura 2.4: Estimador de vida útil de bateria - SiliconLabs. Fonte: Website da Silicon-Labs.

A empresa Emerson Process Management, que desenvolve produtos industriais utilizando o protocolo WirelessHART, também oferece em seu website um estimador online ("Power Module Life Estimator") específico para os dispositivos de tecnologia WirelessHART que utilizam o módulo de bateria da empresa. A figura 2.5 apresenta a tela do estimador online.

Observa-se que no estimador online mostrado na figura 2.5 é possível alterar o tipo do dispositivo, como transmissor de temperatura ou de pressão, a taxa de atualização,

EMERSON
Process Management

SMART WIRELESS | CONTACT US | HELP

Power Module Life Estimator

Step 1. Choose Emerson Smart Wireless Device
To select, click on the device's image.

EMERSON SMART WIRELESS DEVICES

- Rosemount 3051S Scalable Pressure Transmitter
- Rosemount 648 Wireless Temperature Transmitter
- Rosemount 702 Wireless Discrete Transmitter**
- Rosemount 3051 Wireless Pressure Transmitter
- Rosemount 648T High Density Temperature Transmitter
- Rosemount 3051S Multi/Variable™ Wireless Pressure Transmitter
- Rosemount 2051 Wireless Pressure Transmitter
- Rosemount 248 Wireless Temperature Transmitter
- Rosemount 6081 Analytical (pH/ORP & Conductivity)
- CSI 9420 Vibration Wireless Transmitter
- Roxar CorrLog Wireless Corrosion Monitoring Transmitter
- Roxar SandLog Wireless Sand/Erosion Monitoring Transmitter
- Rosemount 708 Wireless Acoustic Transmitter
- Fisher 4320 Position Monitor
- TopWorx 4310 Position Monitor
- Rosemount 2160 Wireless Vibrating Fork Liquid Level Switch
- Rosemount 3308A Wireless Guided Wave Radar Level Transmitter

Your Smart Wireless device: Rosemount 702 Wireless Discrete Tr

Step 2. Other Data

Update Rate: 4 sec

Operating Condition: Operating in a well formed network

Average Ambient Device Temperature:

Occurance

Click Ave Temp

Close to Hot Process Unit: 185 °F (85 °C)

Hottest Ambient Temperature Recorded on Earth: 136 °F (58 °C)

Average Temperatures of Tropic Zones: 86 °F (30 °C)

Room Temperature: 70 °F (21 °C)

Freezing Point of Water: 32 °F (0 °C)

Average Temperature of Arctic Zones: 0 °F (-18 °C)

Close to Cryogenic Process: -40 °F (-40 °C)

Reset

Step 3. Calculation Results

Estimated Power Module Life:

4.1

Years

DISCLAIMER: The contents of this estimator are presented for informational purposes only, and while effort has been made to ensure their accuracy, they are not to be construed as warranties or guarantees, express or implied, regarding the products or services described herein or their use or applicability. All sales are governed by our terms and conditions, which are available on request. We reserve the right to modify or improve the designs or specifications of our products at any time without notice.

Printable Version

v2.1

Figura 2.5: Power Module Life Estimator - Emerson. Fonte: Website Emerson Process Management.

podendo variar de 1 segundo até 120 minutos dependendo do dispositivo, a condição de operação e a temperatura média do ambiente o qual o dispositivo estará exposto.

Além disso, algumas empresas também disponibilizam em tabelas a estimacão do tempo de vida útil dos dispositivos. Na tabela 2.1 é apresentada uma estimacão da vida útil da bateria para o transmissor XYR 6000 da empresa "Honeywell Process Solutions", a qual desenvolve produtos industriais baseados no protocolo ISA 100.11a.

Udpate Rate (sec.)	Battery Life Estimate (yrs.)
60	10.0
30	7.8
10	6.0
5	5.1
1	3.3

Tabela 2.1: Tabela de estimacão da vida da bateria da Honeywell. Fonte: 2014-HONEYWELL-alive-on-batteries

A empresa "Emerson Process" também disponibiliza uma tabela com as estimações em dias para todos os seus produtos. Na tabela 2.2 é mostrada uma tabela com as estimativas de alguns produtos da empresa.

Power module life estimates in years							
Update	4 sec	16 sec	60 sec	300 sec	20 min	40 min	60 min
3051S	2.2	5.8	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
648	2.8	6.9	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
848	0.7	2.4	6.3	10.0	10.0	10.0	10.0
248	2.8	6.9	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
702	4.1	8.8	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

Tabela 2.2: Tabela de estimação da vida da bateria da Emerson. Fonte: 2014-EMERSON-SmartPower

Esses estimadores online e dados contidos em tabelas dos fabricantes são realmente importantes, porém, como apresentado na subseção "Consumo de Energia", a obrigação do desenvolver é informar ao usuário esse valor como um parâmetro de diagnóstico do nó sensor da rede, independente da forma de estimar o dado.

Esse parâmetro de vida útil pode ser definido através de dois fatores: o estado de carga da bateria ("SoC", state of charge) e a corrente consumida pelo sensor. O primeiro fator é influenciado por vários outros fatores como temperatura, tipo construtivo e número de ciclos de carga e descarga da bateria. Já o segundo, a corrente consumida, depende apenas do valor da carga a qual a bateria é aplicada, podendo ser uma carga com valor estático ou dinâmico. Por exemplo, a vida útil de uma bateria com estado de carga, ou capacidade, igual a 1500 mAh quando aplicada a um dispositivo tem um consumo de 15 mA pode ser estimado conforme mostrado na equação 2.1.

$$\text{Vida útil estimada da bateria} = \frac{1500mAh}{15mA} = 100\text{horas.} \quad (2.1)$$

De acordo com [Rukpakavong et al. 2014], o desafio é encontrar uma técnica precisa de estimação do tempo de vida útil que considere temperatura, auto descarga, bem como outros fatores que influenciam na vida útil do sensor. Nesse contexto, [Rukpakavong et al. 2014] propõe fórmulas e processos para estimar o tempo de vida do sensor dinâmico considerando, além dos fatores já citados, o tipo construtivo e a taxa de descarga da bateria. Com essa proposta pode-se conseguir uma estimação com uma pequena faixa de precisão.

Porém, no modelo proposto por [Rukpakavong et al. 2014] não foram considerados os

detalhes eletroquímicos da bateria, os quais descrevem os processos eletroquímicos que ocorrem na carga e descarga, incorporando características não lineares da bateria. Esses processos são definidos quando a estimação segue modelos matemáticos já definidos na literatura.

A predição do tempo de vida da bateria pode ser realizada a partir de experimentos físicos ou através de modelos matemáticos que descrevem a descarga de energia do sensor. Esses modelos foram desenvolvidos ao longo dos anos por diversos pesquisadores, os quais desenvolveram diversos tipos de modelos. Desde os modelos que consideram apenas as correntes de descargas constante no tempo (modelos lineares), modelos que consideram a média das correntes (lei de Peukert), até modelos eletroquímicos, que consideram as características não lineares do sistema [Schneider 2011].

De acordo com [Oliveira 2012], a bateria só é capaz de fornecer energia ao sistema enquanto o valor da carga é superior ao nível de cutoff, que é valor limite inferior de carga em que a bateria consegue fornecer uma tensão suficiente para o sensor manter-se operacional. Com isso, o tempo de vida útil da bateria também pode ser definido como o tempo que a bateria demora a atingir o nível de cutoff.

Contudo, modelos matemáticos que envolvem descrição detalhadas no processo de descarga da bateria muitas vezes não são possíveis de serem implementados em sensores devido ao seu custo computacional, pois as redes de sensores sem fio são caracterizadas pelo baixo consumo de energia e baixo custo no armazenamento de informações. Logo, é necessária a inferência do parâmetro de vida útil da bateria através de modelos com baixo custo computacional.

Nesse seguimento, [Lajara et al. 2015] propôs alguns modelos que estimam o estado da carga (SoC) de uma bateria através da coleta de alguns dados do sensor, como tensão, temperatura e número de ciclos de carga e descarga da bateria. Foi utilizado um hardware aberto composto por um microcontrolador MSP430F1611, um transceptor wireless CC2420 e outras interfaces. Com isso, foram realizadas estimações com diferentes técnicas inteligentes, como regressão linear simples e regressão linear segmentada usando somente o nível de tensão, regressão linear usando potência, número de ciclos e temperatura, regressão linear usando 5 principais parâmetros de um grupo de 20 a partir do uso de análise de componentes principais (PCA) e, por fim, o uso de redes neurais variando a quantidade de neurônios em 2 e 4. A pesquisa desenvolvida em [Lajara et al. 2015] concluiu que modelos mais complexos, como modelos baseados em redes neurais, são mais precisos e apresentam uma boa exatidão, mesmo em casos de diferentes temperaturas e ciclos de carga e descarga.

Nesse sentido, o presente trabalho incluiu as redes neurais artificiais como a técnica inteligente utilizada para inferir parâmetros necessários para avaliação de uma rede de sensores sem fio, considerando protocolos que se aplicam ao ambiente industrial. Além das redes neurais, foram incluídos outros elementos matemáticos para avaliação dos parâmetros das redes industriais. Portanto, torna-se necessário uma breve conceituação dos elementos matemáticos utilizados na ferramenta.

Capítulo 3

Elementos matemáticos para avaliação e inferência

Neste capítulo serão apresentados os elementos matemáticos utilizados para avaliação e inferência na ferramenta. Esses elementos consistem de ferramentas estatísticas, através de medidas de localização e dispersão, e de técnicas inteligentes para extrair e modelar as principais características do conjunto de dados recebido das redes.

3.1 Estatística descritiva

A estatística descritiva tem como objetivo resumir as principais características de um conjunto de dados por meio de tabelas, gráficos e resumos numéricos. Sendo extremamente importante saber escolher a forma adequada de resumir os dados [Guimarães 2008]. O recolhimento dos dados é uma tarefa necessária para o entendimento de um sistema, porém não é suficiente. Para que um sistema possa ser entendido por uma máquina ou um ser humano, é essencial o desenvolvimento de um modelo matemático que represente o sistema de forma clara e objetiva.

Além disso, mesmo que seja possível apresentar todos os dados de uma forma clara e objetiva, talvez ainda não seja suficiente para o entendimento daquele conjunto de informações. É necessário uma análise dos dados que evidencie as principais características daquele conjunto de dados, como também os dados esporádicos. A estatística descritiva é reponsável por essa tarefa de evidenciar as principais características, como também de formular um modelo através de métricas estatísticas, que traduzam o comportamento dos dados coletados. Alguns métricas, como média aritmética, mediana, variância e desvio padrão, já são bastante conhecidas.

Média aritmética

A média aritmética é a soma de todos os valores do conjunto dividido pelo tamanho do conjunto. Essa média é a métrica mais comum de utilizar em medidas de tendência central, representando o ponto em que os dados se dispersam ao redor. Considerando $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ um conjunto de dados de tamanho "n". A média aritmética é dada pela equação 3.1.

$$\text{media} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

Mediana

A mediana é o dado que ocupa a posição central dentre todos os dados contidos no conjunto. Por exemplo, seja $[3, 5, 14, \mathbf{38}, 39, 40, 41]$ o conjunto de dados, a mediana desse conjunto é o valor 38. Já se o conjunto de dados for $[3, 5, 14, \mathbf{38}, \mathbf{39}, 40, 41, 42]$, o valor da mediana é $\frac{38+39}{2} = 38.5$. Através do valor da mediana é possível dividir o conjunto de dados em dois grupos de dados de mesmo tamanho: o conjunto de dados que tem valores menores que o valor da mediana e o conjunto que tem valores maiores que mediana.

Variância e desvio padrão

A variância e o desvio padrão são métricas estatística que auxiliam as medidas de localização, como média e mediana, na descrição do conjunto de dados. Essas métricas fazem parte do conjunto de medidas chamado de medidas de dispersão, que indicam se os dados estão, ou não, pertos uns dos outros. A variância é definida pela divisão do somatório dos quadrados dos desvios das amostras com relação à média aritmética pelo tamanho do conjunto de amostras menos um, conforme mostra a equação 3.2.

$$\text{variancia} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \text{media})^2}{n - 1} \quad (3.2)$$

Porém, como a variância consiste de uma média os quadrados dos desvios, ficando a unidade de desvio elevada ao quadrado, a utilização dessa medida pode causar erros de interpretação. Nesse caso, tornou-se necessário definir uma medida de dispersão que

interpretasse o quão dispersos estão os dados, gerando a medida de desvio padrão, que pode ser calculado de acordo com a equação 3.3.

$$\text{desvio padrão} = \sqrt{\text{variancia}} \quad (3.3)$$

Os resultados apresentados pelas medidas de localização e dispersão, como média aritmética e desvio padrão, já oferecem uma boa representação do conjunto de dados. No entanto, existem parâmetros que são coletados por um longo período de tempo, gerando assim uma grande quantidade de amostras, que podem apresentar uma grande variabilidade. Nesse sentido, existem ferramentas estatísticas destinadas a analisar conjunto de dados com ampla variabilidade, como o diagrama de caixa ou *box plot*.

Análise exploratória: diagrama de caixa

Um diagrama de caixa, ou *box plot*, é uma análise estatística que avalia a distribuição dos dados, permitindo avaliar características como tendência central, dispersão e assimetria. A análise de um conjunto de dados através da média aritmética, da mediana ou do desvio padrão não consegue visualizar todas as características da estrutura dos dados. As medidas de tendência central, as vezes, podem causar uma interpretação errada dos dados devido a existência de um único valor discrepante dentro de um conjunto estreito. Para solucionar alguns problemas de interpretação a análise por diagrama de caixa utiliza as seguintes medidas:

- Mediana
- Mínimo (menor valor do conjunto)
- Máximo (maior valor do conjunto)
- Primeiro quartil (Q1)
- Terceiro quartil (Q3)

O valor da mediana, definido anteriormente, divide o conjunto de dados em dois grupos de mesmo tamanho. Um desses grupos é composto pelos dados com valores menores que o valor da mediana e o outro conjunto com os valores maiores. Porém, somente com a mediana não é possível observar se existe uma simetria entre os dados. Nesse sentido, o diagrama de caixa utiliza medidas separatrizes: primeiro e terceiro quartil. Essas medidas não são de tendência central, mas, equivalente a mediana, permitem dividir o conjunto de dados em dois grupos.

Os quartis são valores que dividem um grupo em quatro partes. Existem três valores de quartis: o primeiro quartil, o segundo quartil e o terceiro quartil. O primeiro quartil (Q_1) divide o conjunto nos seguintes grupos de dados: o grupo que apresenta 25% dos dados que tem o valor menor que o valor Q_1 e o outro grupo composto pelo restante dos dados. Já o terceiro quartil (Q_3) divide o conjunto nos dados que apresenta 75% dos valores menores que Q_3 . Por fim, o valor do segundo quartil é o mesmo valor que a mediana.

A figura 3.1 mostra a representação gráfica do diagrama de caixa.

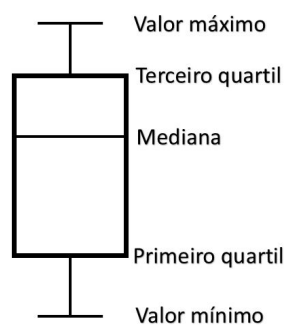


Figura 3.1: Representação gráfica do diagrama de caixa.

Em resumo, observa-se na figura 3.1 que 50% dos dados estão contidos na caixa e as linhas fora da caixa indicam os limites inferior e superior do conjunto. Assim, nota-se o quanto disperso estão os dados, quanto mais estreito o diagrama menor a dispersão dos dados. E com a linha dentro da caixa, que representa a mediana, é possível perceber se os dados são, ou não, simétricos. Se a linha dentro da caixa é equidistante dos limites, os dados são simétricos.

3.2 Redes neurais artificiais

Uma rede neural artificial (RNA) é um sistema que interliga várias unidades de processamento de forma paralela com o objetivo de armazenar informações e disponibilizar para uso. O termo “neural” vem da forma com que essas redes foram idealizadas: baseando-se no cérebro humano.

O cérebro humano é uma rede de neurônios ou células nervosas capazes de receber sinais de outros neurônios vizinhos, integrar os sinais vindos de vários outros neurônios de forma a tirar uma conclusão, gerar e conduzir um sinal elétrico dentro do mesmo e transmitir um sinal a um outro neurônio capaz de recebê-lo [de Campos & Saito 2004]. A

partir do conhecimento das características dos neurônios, foram desenvolvidos modelos computacionais dos mesmos, chamados de neurônios artificiais ou unidades de processamento. A junção desses neurônios artificiais deu origem a ideia de uma rede neural artificial.

As redes neurais artificiais, conhecidas também como processadores maciçamente paralelamente distribuídos, se assemelham ao cérebro pela capacidade de adquirir o conhecimento através de um processo de aprendizagem e de armazenamento do conhecimento através de forças de conexão entre neurônios, também chamadas de pesos sinápticos [Haykin 2001]. A junção desses pesos é conectada a uma função de ativação, que gera um sinal para ser transmitido aos próximos neurônios. Na figura 3.2 é mostrado um esboço de uma RNA formada por alguns neurônios artificiais.

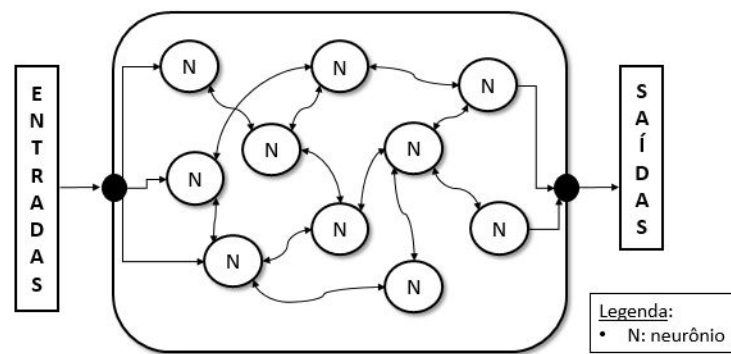


Figura 3.2: Neurônios interligados formando uma rede neural

O aprendizado de uma rede neural é definido pelo processo de aprendizagem, a qual a rede está associada. Esses processos são algoritmos capazes de modificar os pesos sinápticos da rede alcançando o objetivo de armazenar a informação desejada. A união desses pesos, junto à organização dos neurônios e às funções de ativação, define um mapeamento das entradas e saídas da rede, o qual pode representar tanto uma relação linear quanto uma relação não-linear.

Os principais estímulos para o uso dessas redes são a capacidade de aprender a partir de exemplos e a generalização das informações aprendidas. Essa generalização está relacionada com a capacidade de aprender a partir de um conjunto reduzido de exemplos, a qual torna-se uma característica essencial em aplicações que não é possível a coleta de todo o conjunto de situações do problema.

Além de generalizar as informações, as RNAs têm capacidades que as tornam poderosas no ramo das técnicas inteligentes, as quais estão listadas abaixo.

- **Não-linearidade:** Uma RNA pode ser não-linear desde que exista algum neurônio modelado de forma não-linear. +
- **Mapeamento de entrada-saída:** O mapeamento de entrada e saída permite que a rede funcione como um gerador de função genérica. Tal função que é determinada pelos pesos sinápticos da rede, os quais são ajustados após o treinamento na rede.
- **Adaptabilidade:** O aprendizado da rede pode ser alterado através de um novo treinamento da rede, permitindo que a RNA seja adaptável a qualquer nova situação do problema, até mesmo em tempo real.
- **Informação contextual:** O estado de um neurônio é afetado pela ativação de outros neurônios.
- **Tolerância a falhas:** Para que a resposta global da rede seja degradada seriamente o dano deve ser extenso, isto é, o dano deve ocorrer em quantidade razoável de neurônios. Caso apenas um neurônio venha a falhar na rede, a tarefa principal é realizada normalmente, existindo perda apenas no desempenho.

Todas as capacidades citadas acima estão relacionadas com o neurônio, os pesos sinápticos, a função de ativação ou o processo de aprendizagem, assim é essencial ter uma visão geral do que é um neurônio artificial.

Modelo do neurônico artificial

Um neurônico artificial é uma unidade de processamento inspirada no neurônio biológico. Essa unidade calcula a cada instante o seu potencial de ativação e a sua saída a partir dos pesos das conexões com seus neurônios vizinhos (pesos sinápticos) e da função de ativação definida. A figura 3.3 mostra o modelo de um neurônio artificial proposto pelos pesquisadores McCulloch e Pitts.

O potencial de ativação (“u”) de um neurônio é definido pelo somatório de todos os pesos multiplicados pelas entradas, enquanto que a saída (“y”) é a resposta do potencial de ativação aplicado a função de ativação. Essas relações estão descritas na própria figura.

As funções de ativação são meramente funções matemáticas, geralmente com valores de saídas nas faixas de 0 a +1 e -1 a +1. Na literatura existem várias funções matemáticas que são utilizadas como função de ativação nas RNAs, abaixo segue algumas delas.

- Função linear;
- Função limiar;
- Função sigmoide;

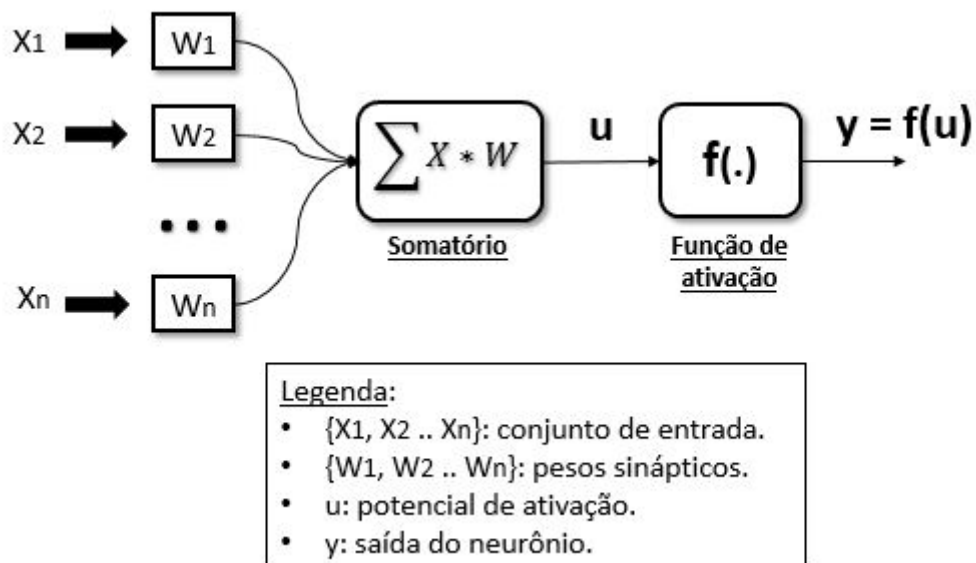


Figura 3.3: Modelo de neurônio artificial de McCulloch-Pitts

- Função seno;
- Função gaussiana;
- Função logarítmica;
- Função tangente hiperbólica.

As interligações desses neurônios formam as RNA, porém a maneira que essas redes são estruturadas está intimamente ligada com o processo de aprendizagem usado para treinar a rede. Dessa forma, torna-se essencial o conhecimento desses processos de aprendizagem.

Processos de aprendizagem

Um processo de aprendizagem é caracterizado por adaptar os parâmetros livres de uma rede neural, nesse caso os pesos sinápticos, através de uma estimulação pelo ambiente no qual a rede está inserida [Haykin 2001].

Existem vários tipos de formas de aprendizagem que são classificados de acordo com a maneira como a rede se relaciona com o ambiente, isto é, a forma de ajuste dos pesos. Esses processos são classificados em quatro grandes grupos: aprendizagem supervisionada, aprendizagem não supervisionada, aprendizagem semi supervisionada e aprendizagem por reforço. Entretanto, esse último grupo geralmente não é utilizado no âmbito das RNA.

Na aprendizagem supervisionada assume-se a presença de um “professor” que disponibiliza as repostas corretas. No treinamento dessas redes são informadas as entradas e as saídas desejadas da rede, ou melhor, as respostas do professor. As alterações dos pesos são computadas de forma que a resposta da rede seja igual a resposta do professor. Nessa forma de aprendizagem existe a presença do erro, um valor da diferença entre o valor desejado (resultado do professor) e o valor da saída da rede. Esse valor é repassado para um algoritmo de treinamento que modifica os pesos da rede, conforme a estrutura apresentada na figura a de 3.4. Já na aprendizagem não supervisionada, não existe a figura do “professor”, conseqüentemente não existe o valor de erro. Os pesos são ajustados apenas considerando as entradas da rede e o algoritmo de treinamento. A figura b de 3.4 apresenta uma estrutura básica da aprendizagem não supervisionada. Na outra forma de aprendizagem, a aprendizagem semi supervisionada, a rede aprende com um número limitado de entradas com respostas e entradas sem respostas.

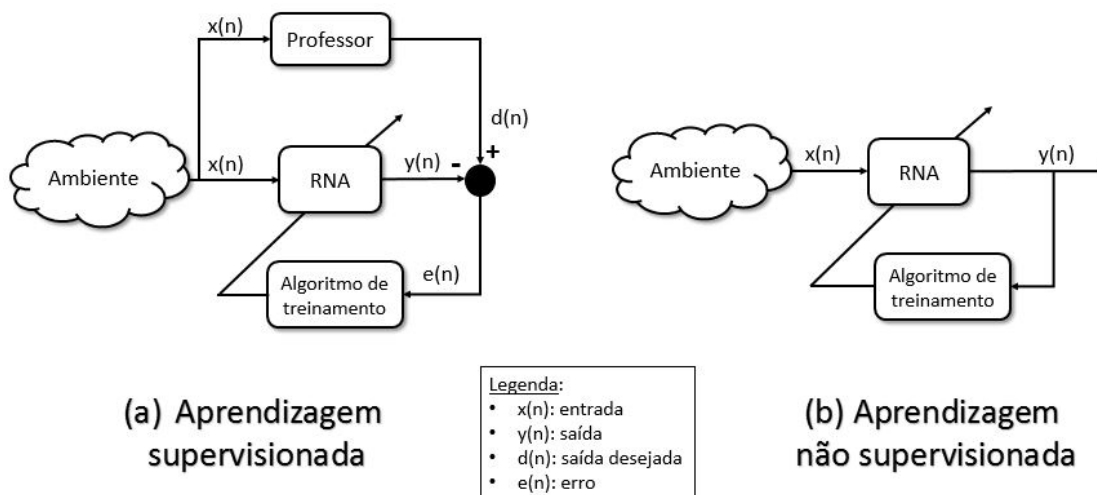


Figura 3.4: Tipos de aprendizagem: supervisionada (a) e não supervisionada (b)

Baseando-se no modelo de McCulloch e Pitts e na aprendizagem supervisionada o pesquisador Rosenblatt propôs o primeiro modelo de uma rede neural simples para esse tipo de aprendizagem, denominado de Perceptron [Haykin 2001].

Em todos os grupos de aprendizagem existe o bloco de algoritmo de treinamento, que define uma regra de aprendizagem. Existem vários tipos de regras que podem construir esse bloco, como a regra de hebb, competitiva, de boltzmann e por correção de erro. Além das formas de aprendizagem a estruturação desses neurônios em uma rede neural também define outros grupos de redes neurais, os quais diferem pelas suas arquiteturas.

Arquiteturas de RNAs

As redes neurais em geral organizam os neurônios em forma de camadas. Na forma mais simples existe uma camada de entrada de nós fontes que se projeta em uma camada de saída de neurônios (nós computacionais), como mostrado na figura 3.5 [Haykin 2001].

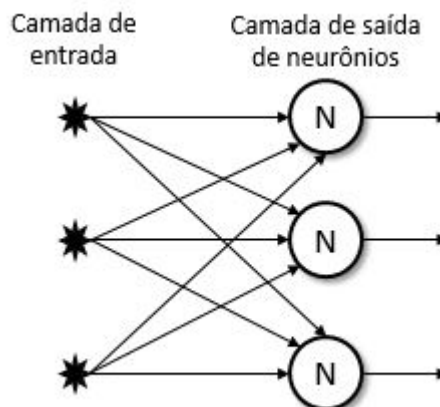


Figura 3.5: RNA simples de camada única

Em outra forma, existem pelo menos mais uma camada além das camadas de entrada e de saída, chamada de camada oculta. As redes formadas pela camada de entrada, pela camada de saída e por uma ou algumas camadas ocultas são denominadas de redes neurais de múltiplas camadas. O termo oculto indica que a saída do neurônio não é ligada diretamente a saída da rede neural, assim ficando invisível para o usuário da rede. A figura 3.6 mostra um esboço de uma rede com camadas ocultas.

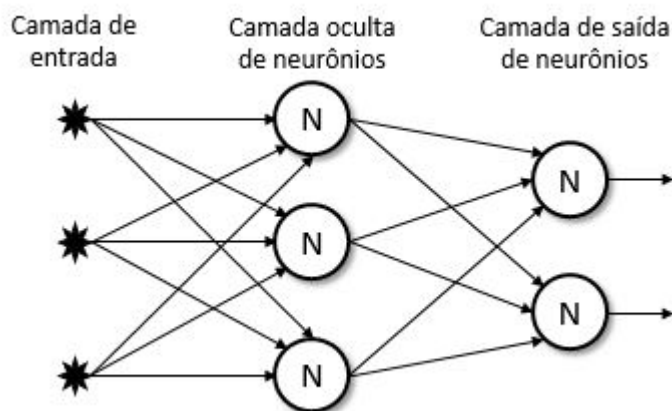


Figura 3.6: RNA simples de múltiplas camadas

A função dos neurônios ocultos é intervir entre a entrada externa e a saída da rede de maneira útil. Adicionando-se uma ou mais camadas ocultas, tornamos a rede capaz de extrair estatísticas de ordem elevada, sendo uma característica particularmente valiosa quando o tamanho da camada de entrada é grande [Haykin 2001].

Além dessas arquiteturas existem outras arquiteturas de RNAs, por exemplo as redes recorrentes que utilizam de múltiplas camadas atrelado ao conceito de realimentação, as competitivas, entre outras.

As redes neurais baseadas na arquitetura de múltiplas camadas são geralmente chamadas de perceptrons de múltiplas camadas (MLP), devido a popularização do modelo do perceptron, citado anteriormente. Essas redes tiveram uma crescente popularização com o surgimento do algoritmo da retropropagação de erro (error backpropagation). Esse algoritmo da retropropagação é fundamentado na regra de aprendizagem por correção de erro e é bastante conhecido devido ao seu sucesso na resolução de diversos problemas difíceis, por exemplo o problema do ou-exclusivo, aplicado juntamente com as MLPs.

3.2.1 Perceptron de múltiplas camadas (MLP)

Os perceptrons de múltiplas camadas têm sido aplicados com sucesso para resolver diversos problemas difíceis, através do seu treinamento de forma supervisionada com um algoritmo muito conhecido como algoritmo de retropropagação de erro (backpropagation), o qual é baseado na regra de aprendizagem por correção de erro [Haykin 2001].

O desenvolvimento do algoritmo de treinamento backpropagation mostrou que é possível treinar eficientemente redes com camadas intermediárias, resultando no modelo de RNAs mais utilizado atualmente, as MLPs [Lopes 2009].

Basicamente, a aprendizagem por retropropagação de erro consiste em dois passos através das diferentes camadas da rede: um passo para frente, a propagação, e um passo para trás, a retropropagação. Durante o passo de propagação, os pesos sinápticos da rede são todos fixos. Durante o passo para trás, os pesos sinápticos são todos ajustados de acordo com uma regra de correção de erro.

O algoritmo de retropropagação é derivado da regra delta, que funciona ajustando-se o vetor de pesos de acordo com o gradiente do erro. O gradiente é representado pela derivada do erro pelos pesos no instante atual e o erro é a subtração da saída desejada pela saída real. Na fase de retropropagação o sinal de erro segue um sentido contrário da informação, da camada de saída até a camada de entrada, ajustando os pesos de acordo

com uma parcela da sua contribuição no erro. Essa contribuição de cada peso sináptico no erro está relacionada com o quanto cada peso deveria ser ajustado na fase de propagação.

As RNA têm uma metodologia de construção e execução bem definida, a qual normalmente segue os passos abaixo.

1. Criação das camadas de neurônios: definição da quantidade de camadas ocultas e de neurônios por cada camada, como também as funções de ativação dos neurônios das camadas.
2. Criação das ligações das camadas: definição das ligações entre os neurônios das camadas.
3. Definição de pesos sinápticos iniciais aleatórios.
4. Treinamento da RNA: processo em que é informado o conjunto de amostras de treinamento da rede para realizar o ajuste dos pesos.
5. Validação da RNA: processo em que são escolhidas algumas amostras do conjunto de exemplos para validar o aprendizado da rede.

Uma desvantagem das redes neurais de múltiplas camadas adiante, por exemplo a MLP, é não considerarem o contexto de entrada e de saída do ambiente. Os valores de um passado recente, os estados e as decisões tomadas recentemente não são considerados no processo de aprendizagem dessas redes neurais. Quando existe um problema que necessita desse conhecimento passado, ou dessa memória, a solução é voltada as redes neurais recorrentes, em especial as redes neurais recorrentes autorregressiva não linear com entradas exógenas (NARX).

3.2.2 Redes neurais recorrentes autorregressiva não linear com entradas exógenas

As redes recorrentes autorregressiva não linear com entrada exógenas (NARX) diferem das redes alimentadas adiante pela existência de fluxo de dados de forma retroalimentada, onde a saída de um neurônio pode servir de entrada para o mesmo ou para outro neurônio qualquer da RNA. Essas redes apresentam recursos computacionais capazes de representar sistemas dinâmicos não lineares, como também a capacidade de implementar alguns tipos de máquinas de estados finitos. Além disso, estudos indicaram que essas redes são tão potentes quanto as máquinas de turing [Lin et al. 1998, Siegelmann et al. 1997].

Estudos demonstram que parte das dificuldades estão atribuídas a dependências de longo prazo ou memória de longo prazo, isto é, quando uma saída desejada no tempo T

depende de entradas presentes nos tempos $t < T$ [Lin et al. 1998]. Esses problemas são melhores solucionados pelas redes NARX, que além de tudo convergem mais rápido e generalizam melhor que outras redes recorrentes [Siegelmann et al. 1997].

Uma rede ARX consiste de uma rede neural MLP que realimenta o conjunto de entradas com valores passados da entrada e da saída, ou melhor, recebe valores anteriores a entrada atual e a saída atual. Matematicamente, a operação da rede é definida pela fórmula abaixo:

$$y(t) = FY(x(t - d_x), \dots, x(t - 1), x(t), y(t - 1), \dots, y(t - d_y))$$

onde, $x(t)$ representa a entrada da rede no tempo t , $y(t)$ é a saída da rede no tempo t , d_x o número de atrasos da entrada, d_y o número de atrasos na saída e, por fim, a função FY , que é mapeada pela MLP. A figura 3.7 mostra o exemplo de uma rede ARX com dois atrasos na entrada e na saída.

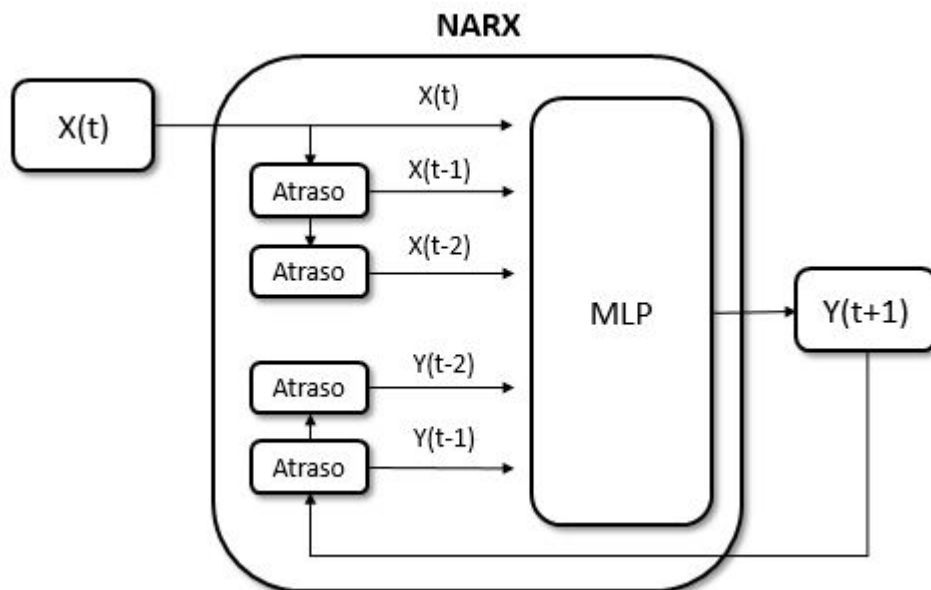


Figura 3.7: Rede ARX com dois atrasos na entrada e na saída

Essa característica de considerar valores atrasados da entrada e saída fundamenta a melhor performance das redes neurais NARX nos problemas de dependências de longo prazo.

Capítulo 4

Ferramenta para avaliação e inferência

Conforme descrito no capítulo 2, existem diversos requisitos que os protocolos de redes sem fio devem atender para serem aceitos na indústria. Os protocolos WirelessHART e ISA 100.11a já descrevem em suas especificações diversas técnicas para a garantia da maioria dos requisitos necessários para implementação da tecnologia sem fio no ambiente industrial. Porém, muitos dos parâmetros que indicam a qualidade do funcionamento dessas redes não são visíveis facilmente pelos usuários da tecnologia. E, em alguns casos, não existem parâmetros que qualifique o conjunto de dados informados pela rede.

Nesse sentido, a ferramenta desenvolvida nessa dissertação tem como objetivo apresentar de forma visual e intuitiva os dados disponíveis pelos dispositivos em redes industriais sem fio baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a. A ferramenta, nomeada por *PW-DataAnalyzer*, recebe os dados coletados da rede, tarefa realizada pelo software *PW-Logger*, e gera gráficos de avaliação da rede, de acordo com a escolha do usuário da ferramenta.

A figura 4.1 apresenta o modelo de associação do *PW-DataAnalyzer* com o *PW-Logger* para a geração das avaliações.

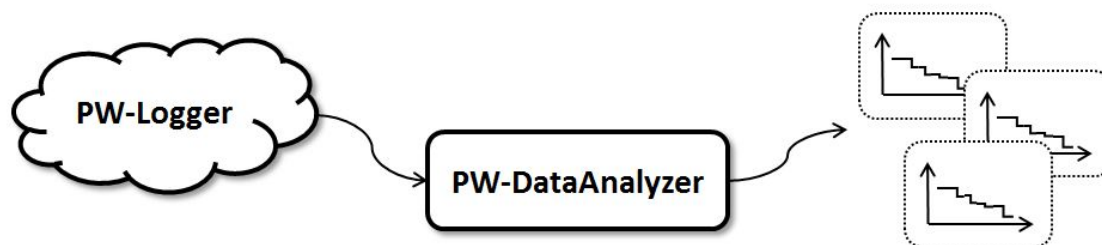


Figura 4.1: Modelo de associação do *PW-DataAnalyzer* com o *PW-Logger*

4.1 Aquisição e registro dos dados: PW-Logger

O *PW-Logger* é uma ferramenta de aquisição e registro de dados de redes baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a. Sua principal função é realizar o interfacamento do módulo de registro dos dados com os *drivers* de comunicação que coletam as informações das redes [OLIVEIRA 2015] [TOMÉ 2015]. Tais *drivers*, desenvolvidos em outros trabalhos, implementam os protocolos HART-IP (Highway Addressable Remote Transducer over Internet Protocol) e GSAP (Gateway Service Access Point), os quais são, respectivamente, protocolos padrões das especificações WirelessHART e ISA 100.11a.

4.1.1 Drivers de comunicação

Os drivers de comunicação utilizados no *PW-Logger* podem se comunicar com redes WirelessHART e ISA 100.11a, desde que as portas dos protocolos estejam abertas para troca de informações. Para as redes do protocolo WirelessHART é utilizado o driver que implementa o protocolo HART-IP, que realiza o empacotamento de um pacote HART em um pacote IP. Já para as redes do protocolo ISA 100.11a é utilizado o driver que implementa o protocolo GSAP, que é representado pelo armazenamento de informações da rede em objetos e é definido na especificação do ISA 100.11a com o objetivo de estabelecer uma interface entre o gateway e o cliente.

O protocolo HART-IP é uma opção de interface de comunicação com dispositivos HART para enviar pacotes encapsulados na comunicação TCP(Transmission Control Protocol)/IP ou UDP(User Datagram Protocol)/IP. A comunicação é realizada através da conversação entre um servidor HART-IP, sendo um dispositivo HART que responde a requisições, e um cliente HART-IP, podendo ser uma aplicação que envia as requisições do usuário. Tais requisições são baseadas no conjunto de comandos da camada de aplicação do protocolo HART, como os comandos comuns do HART e os comandos wireless adicionados na especificação do HART 7.

A comunicação dos dispositivos no HART-IP é estabelecida através de uma conexão do tipo TCP ou UDP com o servidor, que tem como porta padrão a 5094, podendo ser alterada pelo fabricante [OLIVEIRA 2015]. Após a conexão estabelecida, basta o usuário enviar um comando HART para o endereço do dispositivo HART presente na rede. Para a coleta dos dados são enviados comandos para a *backbone*, que, por sua vez, se comunica direto com o gerenciador da rede, e para os próprios dispositivos de campo instalados na

rede. As respostas de todos esses comandos são registrados pelo *PW-Logger*, conforme descrito na seção 4.1.2.

De maneira equivalente, o protocolo GSAP é uma especificação responsável por permitir a comunicação entre o gateway e uma aplicação cliente baseada no protocolo TCP [TOMÉ 2015], porém no protocolo GSAP não é definido a troca de pacotes via uma comunicação UDP. Após o estabelecimento de uma conexão TCP com o gateway, a aplicação fica responsável por solicitar dados através dos comandos GSAP. Para que seja retornado dados sobre o dispositivo, é necessário enviar inicialmente o comando que cria uma sessão de conversação. Dentro dessa sessão é permitido o envio de comandos para coletar informações da rede, como dispositivos disponíveis, topologia, quantidade de pacotes trafegados nos caminhos, entre outras.

Por fim, tanto o driver para comunicação com redes WirelessHART, baseado no HART-IP, quanto o driver para comunicação com redes ISA 100.11a, baseado no GSAP, foram incorporados na ferramenta *PW-Logger* para o registro de informações da rede.

4.1.2 Registro dos dados

A principal funcionalidade do *PW-logger* é monitorar, de forma online, os dados relevantes das redes industriais sem fio baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a, por meio dos drivers citados em 4.1.1. Algumas dessas informações são disponibilizadas pelas aplicações web dos gerenciadores de rede, ou até mesmo, disponibilizadas através de servidores Modbus ou OPC. Contudo, existem informações relevantes para usuários que gostariam de entender melhor a tecnologia que não são concedidas facilmente pelos fabricantes. Um exemplo é o parâmetro de quantidade de links ou, quando a tecnologia dispõe de tal mecanismo, os grafos que o dispositivo de campo pertence.

Nesse sentido, o *PW-Logger* foi desenvolvido para disponibilizar a maior quantidade de informações possíveis relacionadas as redes WirelessHART e ISA 100.11a. Essas informações disponibilizadas independem dos fabricantes, pois as requisições são feitas aos drivers que implementam comunicações baseadas em HART-IP e GSAP. A interface da ferramenta *PW-Logger* é dividida em quatro partes:

- Informações dos dispositivos da rede.
- Informações dos vizinhos.
- Informações dos grafos.
- Informações dos links.

A figura 4.2 mostra as telas de cada bloco de informações do *PW-Logger*.

Devices	Device Type	Join Status	Address	Device ID	Power State	Battery (V)	Battery Life	TimeStamp
YFGW-SM001	System Manager	JOINED_AND_CONFIGURED	FE80000000000000000000004E7B0A0D6728	00000000A1000A0	Line Powered	0.0	0	0:0:0
YFGW-GW001	Gateway	JOINED_AND_CONFIGURED	FE80000000000000000000004E7C0A0D6728	000BEEF600BEEF	Line Powered	0.0	0	0:0:0
TT-IS-01	IO+Router	JOINED_AND_CONFIGURED	FC0000000022FF0000021F0F0064000F	0022FF0000021F0F	>75%	0.0	1184	15:16:8.374
TT-IS-03	IO+Router	JOINED_AND_CONFIGURED	FC0000000022FF0000021FA0064001A	0022FF0000021F1A	>75%	0.0	894	15:16:9.999
TT-IS-05	IO+Router	JOINED_AND_CONFIGURED	FC0000000022FF0000021F2C0064002C	0022FF0000021F2C	>75%	0.0	586	15:16:10.744
TT-IS-04	IO+Router	JOINED_AND_CONFIGURED	FC0000000022FF0000021F3400640034	0022FF0000021F34	>75%	0.0	1376	15:16:11.635
YFGW-BR001	Backbone Router	JOINED_AND_CONFIGURED	FE80000000000000000000004E7D0A0D6728	0022FF0000022051	Line Powered	0.0	0	0:0:0
LD-IS-01	IO+Router	JOINED_AND_CONFIGURED	FC0000000022FF0000021F51006400C9	0022FF0000021F51	>75%	0.0	952	15:16:12.566

(a) Informações dos dispositivos

Device: TT-IS-03

Neighbors	Clock Source	Link Status	DPDU TX	DPDU TXfail	DPDU RX	DPDU RXfail	RSSI	Quality
TT-IS-04	Secondary Cloc...	available	24992	14	14	0	-42	Excellent Signal...
YFGW-BBR001	Primary Clock S...	available	209519	1444	4149	0	-52	Excellent Signal...

(b) Informações dos vizinhos

Neighbor:

Superframe ID	Slot Number	Link Period	Channel Offset	Link Option	Link Type
2	87	400	1	TX	Periodic Manag...
2	106	800	1	TX	Periodic Manag...

(c) Informações dos links

Graph: 1 ▼

Graph Members
YFGW-BBR001
TT-IS-04

(d) Informações dos grafos

Figura 4.2: Blocos de informações do *PW-Logger*

Observa-se que cada linha na figura 4.2(a) apresenta informações de um dispositivo da rede. Abaixo segue a descrição da cada parâmetro.

Devices TAG do dispositivo.

DeviceType Tipo do dispositivo.

Join Status Estado atual do dispositivo na rede.

Address Endereço IPV6 do dispositivo.

DeviceID Identificador do dispositivo, representado pelo endereço EUI-64 do dispositivo.

Power State Estado da fonte de energia.

Battery (V) Tensão da bateria.

Battery Life Vida útil da bateria dada em dias.

TimeStamp Horário da última amostra.

No bloco de informações dos vizinhos, cada linha apresenta informações de um vizinho do dispositivo escolhido na caixa de seleção de dispositivos (*Device*). Por exemplo, na figura 4.2(b) são apresentadas as informações dos vizinhos(TT-IS-04 e YFGW-BBR001)

do dispositivo TT-IS-03. Abaixo segue a descrição de cada parâmetro do bloco de vizinhos.

Neighbors TAG do vizinho.

Clock Source Status do vizinho como fonte de clock para o dispositivo.

Link Status Status do caminho entre o vizinho e o dispositivo.

DPDU TX Quantidade de pacotes transmitidos.

DPDU TXfail Quantidade de pacotes falhos na transmissão.

DPDU RX Quantidade de pacotes recebidos.

DPDU RXfail Quantidade de pacotes falhos na recepção.

RSSI Potência do sinal.

Quality Qualidade do sinal.

A maioria das informações apresentadas no bloco de informações dos dispositivos são disponibilizadas pelo fabricantes em seus sistemas de monitoramento da rede. Porém, algumas das informações concedidas no bloco de informações dos vizinhos não são disponibilizadas pelos fabricantes, como o parâmetro *clock source*. Esse parâmetro informa se o vizinho é ou não um dispositivo que serve de fonte de sincronização para o dispositivo principal. De acordo com [Standard 2012],

*The system manager configures each DL clock recipient to treat one or several of its neighbors as DL clock sources. Such DL clock sources may be designated as preferred or secondary, based on the attribute dlmo.Neighbor[].ClockSource. A DL clock recipient should adjust its clock value whenever it has an interaction with a preferred DL clock source.*¹

Observa-se no trecho acima que um dispositivo deve ficar sempre sincronizado com o relógio do vizinho definido como fonte de clock preferencial. O gerenciador da rede é o responsável por ajustar o relógio dos seus vizinhos, porém quando não existe um caminho direto com o gerenciador é necessário que os vizinhos propagem o valor do relógio. De acordo com [Standard 2010],

¹O gerente do sistema configura cada relógio para considerar um ou vários dos vizinhos como fonte de relógio. Tais fonte de relógio devem ser designados como preferencial ou secundária, com base no atributo dlmo.Neighbor[].ClockSource. Um relógio deve ser ajustado seu valor sempre que ocorrer uma interação com uma fonte de relógio preferencial.

*When a network access point does not source the network clock it shall synchronize to the network devices acting as its clock parents.*²

Na norma [Standard 2010] também é estabelecido o conceito de sincronização do relógio através dos vizinhos, porém, diferentemente da norma [Standard 2012], não existem o conceito de fonte de relógio preferencial e secundário, existe apenas ser ou não ser fonte de relógio.

As informações dos dispositivos e seus vizinhos são essenciais para informar a qualidade da comunicação entre os dispositivos. Nesse sentido, torna-se essencial, também, apresentar as informações dos caminhos (links) e dos grafos, para aqueles protocolos que definem o conceito de roteamento por grafo. As figuras 4.2(c) e 4.2(d) mostram as interfaces que monitoram essas informações de links e grafos.

As informações dos links estão diretamente ligadas a um dispositivo e um vizinho, sendo necessário escolher o dispositivo na caixa de escolha da figura 4.2(b) e o vizinho na caixa de escolha da figura 4.2(c). Abaixo segue a descrição de cada parâmetro do bloco de links.

Superframe ID Identificador do superframe que o link está alocado.

Slot Number Número do slot que o link está alocado.

Link Period O período de repetição do link no superframe (parâmetro disponível apenas para o protocolo ISA 100.11a).

Channel Offset Valor de offset de canal do link.

Link Option Direção do link (transmissão ou recepção).

Link Type Tipo do link (Normal ou Broadcast).

Essas informações do bloco de links são geralmente ocultadas pelos fabricantes, na maioria das vezes com o intuito de evitar o acúmulo de informações sem uma boa interpretação. Porém, esses parâmetros são essenciais para aqueles usuários que pretendem diagnosticar bem a tecnologia.

Por fim, existe o bloco de informações de grafos, como pode ser visto na figura 4.2(d). O bloco só contém um parâmetro, o *Graph Members*, que informa quais os grafos que o caminho, formado pelo dispositivo e seu vizinho, pertence.

Além da funcionalidade de monitorar os parâmetros de forma online, o *PW-Logger* também é responsável por criar um registro desses dados periodicamente e salvar esses

²Quando um ponto de acesso da rede não fornecer o relógio da rede, o relógio deve sincronizar com os dispositivos que atuavam como seus pais de fonte de relógio.

registros em uma ou, quando necessário, em várias planilhas de dados. Porém, a visualização desses vários dados em uma planilha não oferece alguma interpretação vantajosa para os usuários. Assim, no sentido de apresentar as informações da rede de forma vantajosa para técnicos, engenheiros, desenvolvedores e gerentes das redes industriais sem fio, baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a, foi desenvolvida a ferramenta principal dessa dissertação: o *PW-DataAnalyzer*.

4.2 PW-DataAnalyzer

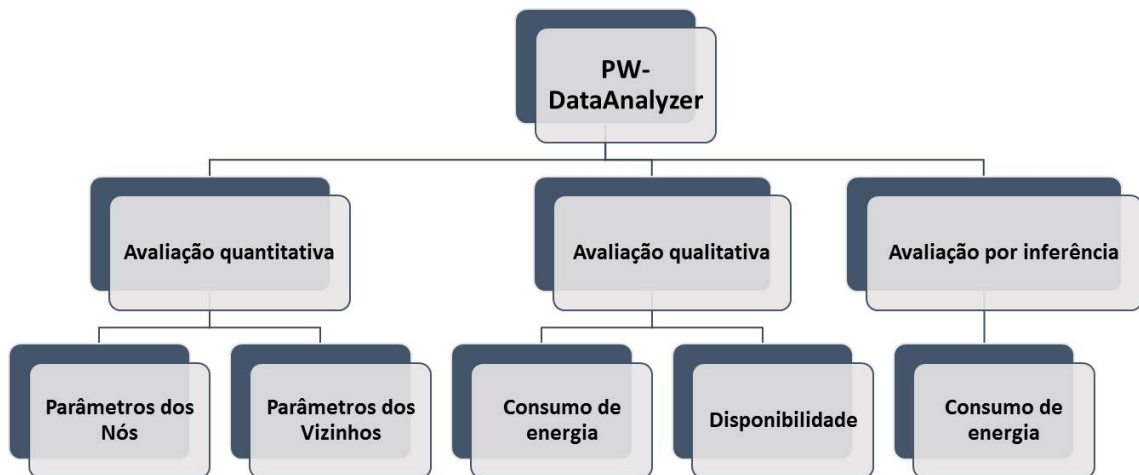
O *PW-DataAnalyzer* é uma ferramenta para avaliação de redes industriais sem fio, através de dados coletados e registrados pela ferramenta *PW-Logger*, descrita em 4.1. Os dados são coletados de redes industriais baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a e em funcionamento por um determinado período de tempo, com o período entre amostras determinado pelo usuário na ferramenta *PW-Logger*.

A ferramenta realiza três tipos de avaliações: avaliação quantitativa, avaliação qualitativa e avaliação por inferência. Na avaliação quantitativa são apresentados gráficos dos dados sem inserir características ou métricas das redes sem fio. Já na avaliação qualitativa são apresentados resultados a partir de métricas, como estabilidade de um caminho. E, por fim, a avaliação por inferência utiliza da técnica inteligente redes neurais artificiais para inferir um parâmetro da rede. Tais parâmetros avaliados foram escolhidos através da análise dos requisitos para implementação da tecnologia no ambiente industrial, requisitos definidos em 2.1. Na figura 4.3 são apresentados os módulos de avaliação e seus respectivos grupos de gráficos de avaliação.

4.2.1 Avaliação quantitativa

Na avaliação quantitativa, os dados são apresentados através de gráficos temporais. Cada amostra do gráfico é referente a uma amostra na planilha de dados gerada pelo *PW-Logger*. A tabela 4.1 apresenta os diversos tipos de gráficos que são gerados como forma de avaliação.

Nessa avaliação os dados não sofrem processamento ou modificação, os dados registrados na planilha são apenas impressos no gráfico.

Figura 4.3: *PW-DataAnalyzer* e seus módulos de avaliação.

Avaliação Quantitativa	
Grupo	Gráficos
Parâmetros dos nós	Vida útil da bateria
	Tensão da bateria
Parâmetros dos vizinhos	Quantidade de pacotes
	Nível de potência do sinal
	Quantidade de links
	Fonte de clock

Tabela 4.1: Tabela dos gráficos de avaliação quantitativa.

4.2.2 Avaliação qualitativa

Já na avaliação qualitativa, os dados armazenados nas planilhas são processados ou analisados para a geração de novos dados de interesse do usuário. Esses dados resultantes do processamento são apresentados, também, através de gráficos temporais e diagrama de caixa. A tabela 4.2 apresenta os diversos tipos de gráficos.

Nota-se que grande parte das avaliações qualitativas, mostradas na tabela 4.2, utilizam um dado que não foi registrado na planilha de dados, a estabilidade. Esse parâmetro é de grande importância para a confiabilidade e disponibilidade da rede, pois um caminho

Avaliação Qualitativa	
Grupo	Gráficos
Consumo de energia	Estabilidade e nível de potência do sinal do caminho
	Estabilidade e vida útil dos vizinhos
Disponibilidade	Inferência de rotas
	Estabilidade do caminho

Tabela 4.2: Tabela dos gráficos de avaliação qualitativa.

com péssima estabilidade pode levar a perda de vários pacotes da rede, consequentemente, levando a redução da confiabilidade do sistema. A estabilidade de um caminho de transmissão pode ser definida conforme mostra a equação 4.1.

$$\text{Estabilidade do caminho} = \left(1 - \frac{\text{Quantidade de pacotes falhos}}{\text{Quantidade de pacotes transmitidos}}\right) * 100\%. \quad (4.1)$$

Esse parâmetro de estabilidade é utilizado nas avaliações de consumo de energia e de disponibilidade. Nas avaliações de consumo de energia são definidos dois tipos de gráficos de avaliação: estabilidade do caminho versus potência do caminho, que oferece uma visão geral do estado dos caminhos de um dispositivo origem com seus vizinhos, e estabilidade do vizinho versus vida útil da bateria do vizinho. Nessa segunda avaliação, o parâmetro de estabilidade do vizinho é apresentado através da média e do desvio padrão da estabilidade de todos os caminhos daquele vizinho com outros dispositivos. Essa avaliação torna-se importante quando o dispositivo de campo está incluso numa rede em malha e o usuário deseja conhecer a qualidade de seus vizinhos, como também qual vizinho consome menos energia na transmissão.

Em relação ao grupo de disponibilidade, são definidos dois tipos de avaliações: estabilidade do caminho, o qual utiliza a equação 4.1, e a inferência de rotas primária e secundária. Essa segunda avaliação, como o próprio nome já diz, agrupa alguns dados para avaliar quem são as rotas primária e a secundária daquele dispositivo. Os termos rotas primária e secundária só são utilizados quando a rede é definida em topologia em malha, possibilitando assim que alguns dispositivos sirvam de roteadores para transmitir informações até o gerente da rede. Essa avaliação foi idealizada a partir do desconhecimento de quais vizinhos estavam sendo utilizados como rotas em testes de redes em malha. Nos testes foram observados que os vizinhos que estavam recebendo mais pacotes do dispositivo origem eram os vizinhos que tinha maior quantidade de links ou que estavam servindo de fonte de relógio para o dispositivo. Com isso, para realizar a inferência

de quais são as rotas primária e secundária do dispositivo são avaliados os parâmetros de quantidade de links de transmissão e dispositivos fonte de relógio.

4.2.3 Avaliação por inferência

Nesta avaliação foi definido o modelo de apenas um parâmetro: a vida útil da bateria. Esse modelo foi baseado na técnica inteligente redes neurais artificiais e será aplicado para inferir amostras futuras do parâmetro.

Conforme visto na seção 2.3, a vida útil da bateria torna-se um parâmetro essencial para a avaliação de qualquer sistema que utilize nós sensores com a tecnologia sem fio, os quais necessitam de fonte de energia com capacidade de fornecimento limitada. Esse parâmetro informa o tempo restante que a bateria consegue fornecer energia para o funcionamento correto do instrumento e a disponibilização de tal parâmetro é obrigatório para os dois protocolos que estamos trabalhando. Percebe-se que a precisão dessa informação influencia, principalmente, no planejamento da manutenção do sistema. Em setores que a parada do sistema de automação resulta na redução do lucro, a previsão desse parâmetro é primordial.

As normas não definem a forma com que esse parâmetro é estimado, como também a maioria das empresas não disponibilizam tal algoritmo de estimação. Com isso, torna-se necessário avaliar as informações disponibilizadas pelos fabricantes. Mesmo com uma estimação atual correta, não se tem controle das condições de consumo futuras, pois as diversas interferências que surgem influenciam na estabilidade dos caminhos, que podem resultar em uma retransmissão de pacotes, que, conseqüentemente, resulta no aumento do consumo de energia. Além disso, variações de temperatura e mudanças na arquitetura da rede também influenciam no consumo de energia, alterando de forma inesperada a vida útil da bateria do nó sensor.

Nesse sentido, a avaliação por inferência utiliza dados da rede em funcionamento durante um determinado período de tempo, em conjunto com a potencialidade das redes neurais de apreender o comportamento não linear, para inferir a vida útil da bateria em instantes futuros. Porém, conforme visto na seção 3.2.2, as redes neurais comuns não são modeladas para aprender comportamentos temporais, como o comportamento da vida útil da bateria, que calcula o valor atual a partir dos parâmetros de consumo e do valor passado. Para tal comportamento, será utilizada uma rede neural ARX com 10 (dez) atrasos na entrada.

Modelo de RNA ARX

A rede neural implementada recebe como entrada um vetor de dados de vida útil da bateria, sendo que 1 dado de entrada é a amostra coletada no tempo "n" e os outros dados são os valores atrasados dessa amostra. Essas amostras são retiradas do objeto criado na importação dos dados do PW-Logger. O objeto criado armazena um vetor com os valores de vida útil da bateria para cada instrumento, sendo assim necessário realizar um processamento para gerar os conjuntos de treinamento para a rede neural.

O conjunto é gerado a partir de um processo de atraso de amostras, que cria uma lista de vetores, a partir do vetor original, para serem os vetores de entrada dos conjuntos de treinamento da rede neural. O processo de atraso de amostras é mostrado na figura 4.4.

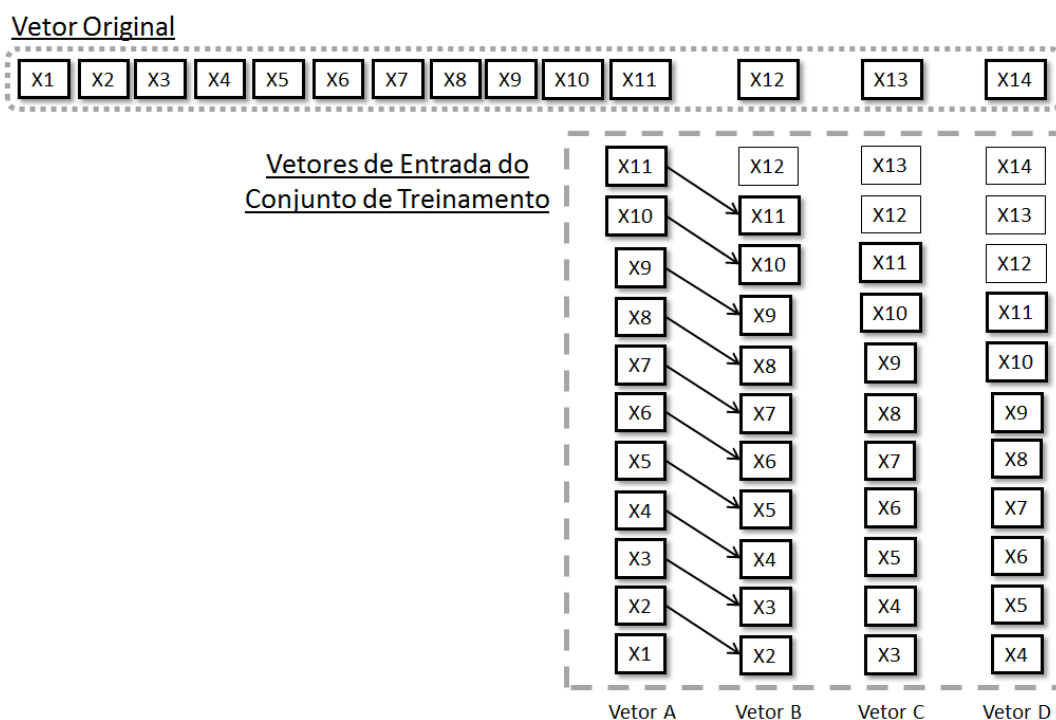


Figura 4.4: Processo de atraso de amostras

Os conjuntos de treinamento da rede são formados pelos vetores de entrada, obtidos de acordo com o processo mostrado na figura 4.4, e pelos vetores de saída ideal. A saída ideal de cada vetor de entrada é sempre a amostra seguinte do conjunto de dados. Por exemplo, o vetor A, resultante do processo de atraso mostrado na figura 4.4, tem como saída ideal o valor "X12", e o vetor B tem como saída ideal o valor "X13". Com isso, o armazenamento de todos esses vetores (entradas e saída ideal) gera os conjuntos de treinamento da rede neural ARX.

Conforme introduzido na seção 3.2.2, uma rede neural ARX é simplesmente uma rede MLP que recebe como entrada valores passados da entrada e da saída, porém a saída presente no sistema modelado é o valor futuro da entrada, por isso não faz sentido atrasar a saída da rede neural. Portanto, a rede se resume ao modelo mostrado na figura 4.5.

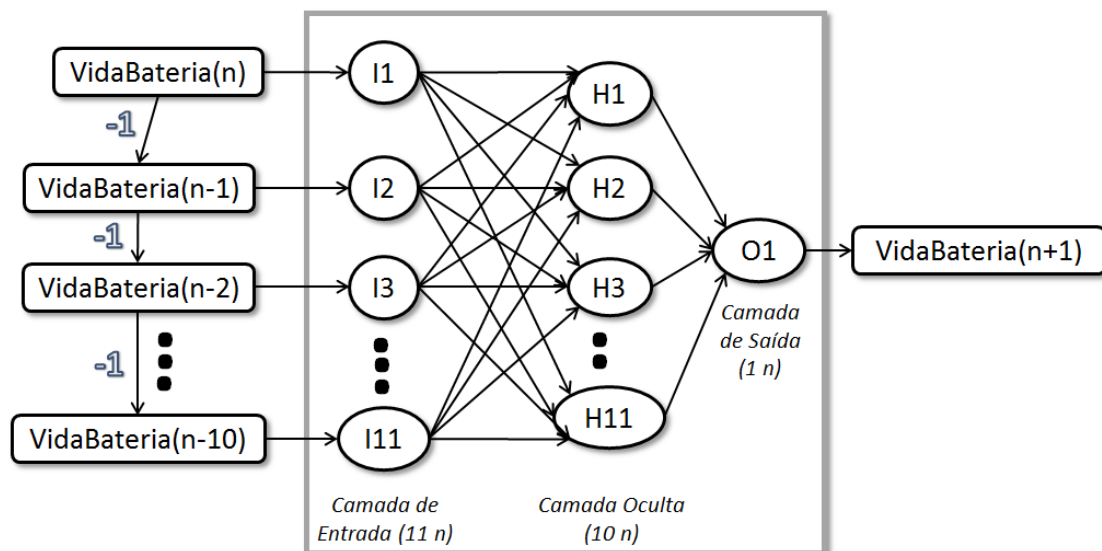


Figura 4.5: Modelo da rede neural

Como a ferramenta é implementada na linguagem Java, foi decidido utilizar o *Framework* Encog para implementação da rede neural artificial em software.

Implementação da RNA: Encog

O Encog é um *framework* para implementação de técnicas inteligentes em Java, como também em outras linguagens como C# e .Net. Ele suporta algoritmos como máquinas de vetores de suporte, redes neurais artificiais, redes bayesianas, programação genética e modelos oculto de Markov [Heaton 2010]. Existem vários tipos de arquiteturas, como mapas auto-organizáveis, redes de hopfield, redes neurais com funções de ativação de base radial, bem como, vários tipos de algoritmos de treinamento, como algoritmo da retropropagação, algoritmo de Levenberg-Marquardt e algoritmo de Nelder-Mead, disponíveis para construir uma rede neural utilizando esse *framework*. Além disso, o *framework* também define diversas funções de ativação para as camadas, como função linear, função logarítmica, função gaussiana, função senoide e função sigmoide.

No presente trabalho será utilizado o Encog para implementar a rede neural apresentada na figura 4.5. A primeira parte da implementação consiste nas etapas de criação e de

definição da arquitetura da rede, as quais são apresentadas no trecho de código 4.1.

```
1 network = new BasicNetwork();
2
3 //Camada de entrada
4 network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationLinear(), false,
    inputSize));
5 //Camada oculta
6 network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationLOG(), false, 10));
7 //Camada de saída
8 network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationLinear(), false, 1));
9
10 network.getStructure().finalizeStructure();
```

Código 4.1: Criação da RNA

A escolha da função logarítmica e da quantidade de neurônios na camada oculta foi devido aos desempenhos obtidos durante alguns testes realizados com dados reais. Essa estrutura de rede será treinada de acordo com o trecho de código mostrado em 4.2.

```
1 network.reset();
2
3 train = new NelderMeadTraining(network, trainingSet);
4
5 int epoch = 1;
6 do {
7     train.iteration();
8     epoch++;
9 } while ((train.getError() > minError) && (epoch < maxEpoch));
10
11 train.finishTraining();
```

Código 4.2: Treinamento da RNA

O método *reset()*, utilizado na linha 1 do trecho de código 4.2, inicializa aleatoriamente os pesos da rede (*network*). Essa rede, com pesos iniciais já configurados, é inclusa no objeto de treinamento (*train*), o qual define como algoritmo de treinamento o Nelder-Mead, para que seja realizado o treinamento da rede. Essa etapa de treinamento é realizada até que o erro da iteração seja menor que o erro mínimo ou até que a quantidade de épocas ultrapasse o limite definido, sendo essas etapas definidas nas entre as linhas 5 e 9 do trecho de código 4.2. O erro mínimo definido é 0.01 e o limite de épocas é 100. A

etapa de finalização do treinamento é definido na linha 11 do trecho 4.2, onde são fixados os pesos finais da rede.

Inferência da vida útil da bateria

O sistema de inferência da vida útil da bateria, que recebe como dados as amostras do parâmetro de vida útil da bateria e retorna a inferência da vida útil da bateria em amostras futuras, pode ser compreendido através do fluxograma mostrado na figura 4.6.

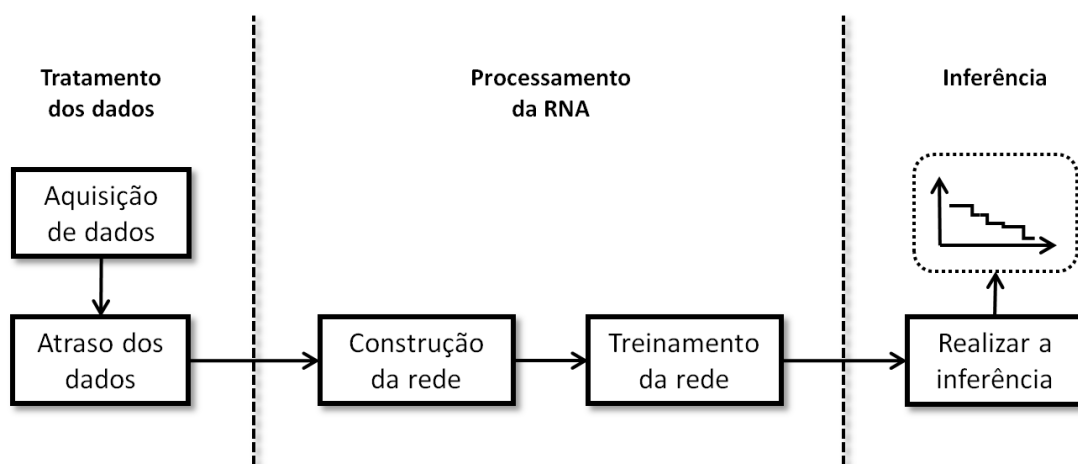


Figura 4.6: Fluxograma parcial do sistema de inferência da vida útil da bateria.

Observe na figura 4.6 que para realizar o tratamento dos dados de vida útil da bateria são realizadas duas etapas: a aquisição e o atraso dos dados. Na aquisição dos dados é utilizada a ferramenta de aquisição e registro dos dados das redes WirelessHART e ISA 100.11a, como apresentado na seção 4.1. Já a etapa de atraso dos dados foi explicado na seção 4.2.3. Logo após a etapa de tratamento dos dados existe a etapa de processamento da rede neural, a qual foi explicado na seção 4.2.3.

Por fim, a última etapa se resume a utilização da rede neural para realizar a inferência do parâmetro. Nessa etapa a rede neural já foi processada e precisa apenas ser empregada. A utilização da rede se resume em pegar o vetor de entrada do último conjunto de treinamento, aplicar à rede e obter a saída da rede para compor o seu conjunto dados de inferência. Esse mesmo dado de saída deve ser inserindo no vetor de entrada, sendo necessário a eliminação da amostra mais antiga do vetor, para que no próximo instante a rede processe o vetor de entrada, já considerando o valor inferido no último processamento. A quantidade de vezes que esse procedimento de processamento da rede deve ser executado é, aproximadamente, 1/3 do conjunto de treinamento, sendo esse valor definido

através de testes executados na pesquisa.

O sistema apresentado na figura 4.6 parece ser ideal para o propósito do trabalho, porém ele pode apresentar desempenhos bem diversos para os mesmos conjuntos de treinamento devido à utilização do algoritmo de Nelder-Mead. Esse algoritmo de treinamento apresenta péssimos desempenhos para alguns valores iniciais dos pesos. Para sanar tal problema, o sistema de inferência implementado inclui a etapa de escolha da rede mais especialista, que se resume a um laço de 10(dez) repetições de treinamento da rede que, no final, escolhe a rede que obteve melhor desempenho. O fluxograma final do sistema de inferência é mostrado na figura 4.7.

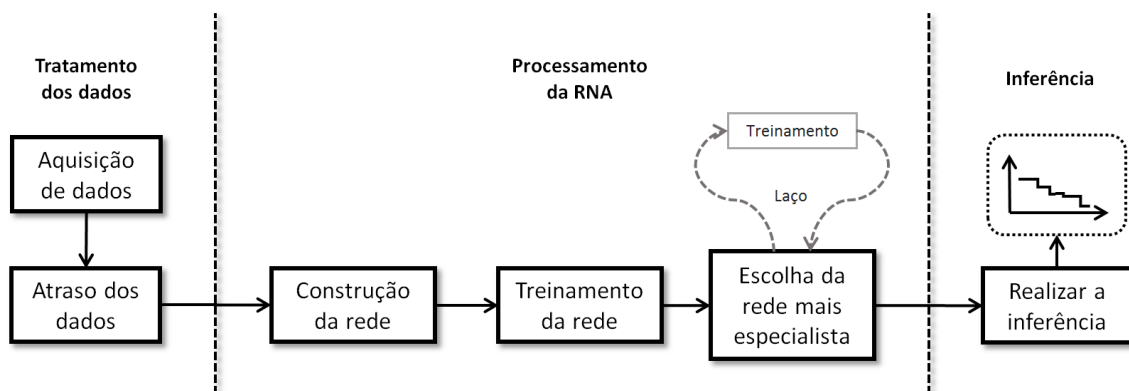


Figura 4.7: Fluxograma final do sistema de inferência da vida útil da bateria.

A escolha da rede mais especialista é baseada na média dos erros de validação da rede. Como visto em 4.2.3, não existe realimentação da saída na entrada, a rede é treinada apenas com os vetores de entradas e de saída dos conjuntos de treinamento. Porém, para realizar a inferência a saída da rede precisa ser inclusa como um dos valores do vetor de entrada do próximo instante. Nesse sentido, a validação da rede utiliza esse mesmo paradigma. Na validação a rede recebe apenas o vetor de entradas do primeiro conjunto de treinamento para gerar o valor da saída da rede, sendo esse um dos valores do vetor de entrada na próxima execução da rede, e assim por diante. O valor da saída da rede é comparado com o valor ideal de saída naquele instante, gerando um erro de validação da rede. Todos esses erros de validação serão contabilizados para gerar a média de erros de validação, e assim, tornando-se o parâmetro de escolha da rede mais especialista.

O termo especialista vem justamente do fato da rede conhecer somente o primeiro vetor de entrada dos conjuntos de treinamento e obter o melhor desempenho na especialização da rede, sendo a média dos erros de validação a métrica utilizada para definir o melhor desempenho entre os desempenhos obtidos nos diversos treinamentos.

Com base em todos os métodos de avaliação da rede apresentados, seja quantitativo, qualitativo ou por inferência, tornou-se necessário a validação da ferramenta em situações reais das redes industriais baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA100.11a. Os testes para validação da ferramenta serão apresentados no capítulo seguinte.

Capítulo 5

Estudo de casos

Neste capítulo, serão apresentadas alguns casos de aplicação da ferramenta. O primeiro estudo de caso apresenta uma análise de uma rede da tecnologia ISA 100.11a com 5 dispositivos de campo em visada pro gateway. No segundo estudo de caso é realizado um teste de mudança de rotas com uma rede em malha composta por 5 dispositivos de campo. E, por fim, o terceiro caso apresenta uma avaliação por inferência da vida útil da bateria utilizando uma rede WirelessHART com apenas 1 dispositivo.

5.1 Estudo de caso 1

O primeiro caso analisado refere-se a uma rede em malha formada por dispositivos de campo fabricados pela empresa Yokogawa, os quais são baseados no protocolo ISA 100.11a. Todos os dispositivos, incluindo o *gateway*, estão alocados dentro de um laboratório de teste, onde todos os dispositivos de campo estão com visada para o *gateway*. Portanto, mesmo que os dispositivos sejam configurados para operar em uma rede em malha, os dispositivos de campo ainda podem ter uma comunicação direta com o *gateway*, formando assim uma rede em estrela. Na figura 5.1 é mostrado a topologia da rede retirada da ferramenta web de monitoramento da rede do próprio fabricante.

Na figura 5.1 os dispositivos de campo estão nomeados pelos últimos 4 (quatro) bits do endereço EUI-64, com exceção do *gateway*(GW), *backbone*(BBR) e gerenciador de segurança (SM). Com isso, abaixo segue o endereço EUI-64 de cada dispositivo com sua respectiva TAG.

1F0F TT-IS-01

1F1A TT-IS-03

1F34 TT-IS-04

1F2C TT-IS-05

1F51 LD-IS-01

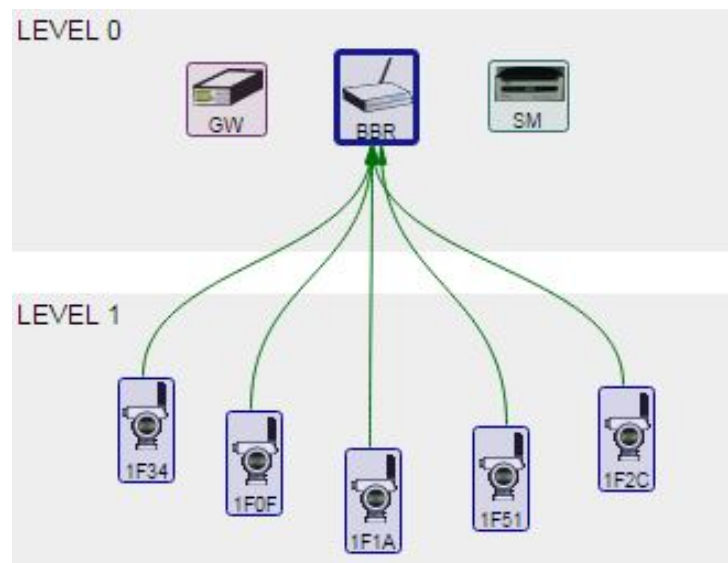


Figura 5.1: Rede ISA 100.11a adotada no estudo de caso 01

A avaliação da rede apresentada na figura 5.1 foi realizada através de amostras coletadas a cada 10 minutos, por um período de, aproximadamente, 12 dias seguidos. Após esses dias de funcionamento, foi retirado um arquivo de registro de dados através da ferramenta *PW-Logger* e realizado as avaliações quantitativa dos dados, conforme os resultados apresentados a seguir.

A primeira avaliação quantitativa foi em relação aos pacotes transmitidos, recebidos e falhos na rede. Na figura 5.2 são apresentados os gráficos de quantidade de pacotes transmitidos pelos dispositivos de campo.

Na figura 5.2 pode se deduzir que todos os dispositivos de campo tem visada com o *gateway*, pois, em todos os casos, o vizinho que recebe a maior quantidade de pacotes dos dispositivos é o *gateway*. Além disso, é possível perceber quando foram utilizadas as outras rotas do dispositivo, ou até mesmo, se foram utilizadas. Observa-se na figura 5.2(c) que o dispositivo só tem pacotes transmitidos para o *gateway*, pois a quantidade de pacotes transmitidos para os outros vizinhos é zero.

Na maioria das vezes, em uma rede em malha, os dispositivos de campo só tentam enviar pacotes por mais de um vizinho quando ocorre alguma falha de transmissão. Por exemplo, um dispositivo de campo A, que tem como vizinhos o dispositivo B e o *gateway*, prefere enviar o dado diretamente para o gerente da rede, através do *gateway*, em vez de enviar o pacote pelo dispositivo B, com isso evitando um maior consumo de energia. Se, por acaso, ocorrer uma falha na transmissão para *gateway*, o dispositivo A tenta enviar o pacote através do dispositivo B.

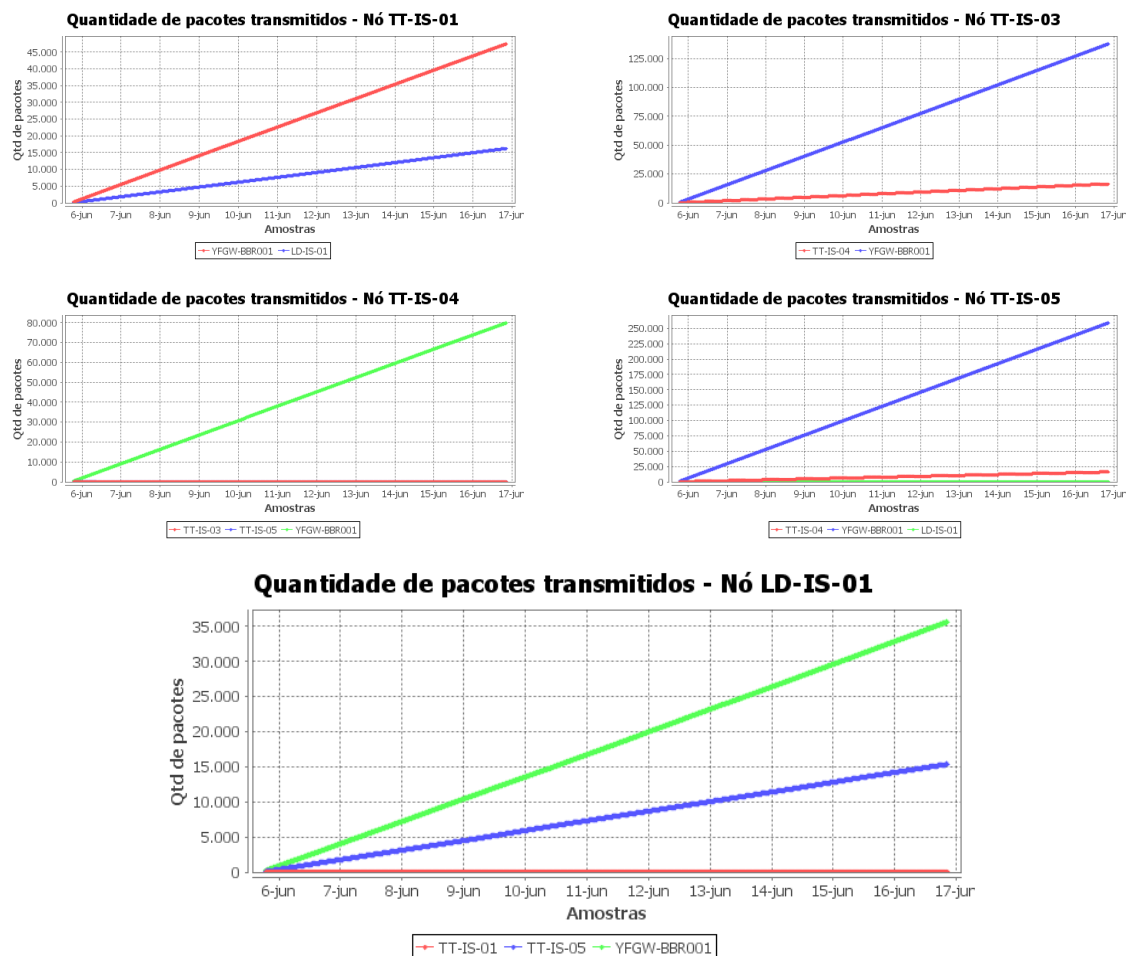


Figura 5.2: Gráficos de quantidade de pacotes transmitidos pelos dispositivos de campo de uma rede ISA 100.11a.

Nesse sentido, torna-se essencial a avaliação dos pacotes falhos na transmissão. Os gráficos na figura 5.3 mostram o quantitativo de pacotes falhos na transmissão de todos os dispositivos de campo da rede, equivalente aos gráficos de pacotes transmitidos em 5.2.

Com os gráficos apresentados na figura 5.3, é possível deduzir momentos que houve alguma disparidade na quantidade de pacotes falhos. Por exemplo, através do gráfico da figura 5.3(b), observa-se que, no dia 10 de junho, houve um aumento considerável na quantidade de pacotes falhos entre o dispositivo TT-IS-03 e seu vizinho YFGW-BBR001 (backbone). Outra vantagem é a possibilidade de observar quando a rota redundante está sendo utilizada, ou melhor, quando os outros vizinhos, além do *gateway*, estão sendo utilizados. De acordo com os gráficos apresentados nas figuras 5.3(d) e 5.3(e), é possível verificar que existem pacotes perdidos em mais de um vizinho dos dispositivos TT-IS-05 e LD-IS-01.

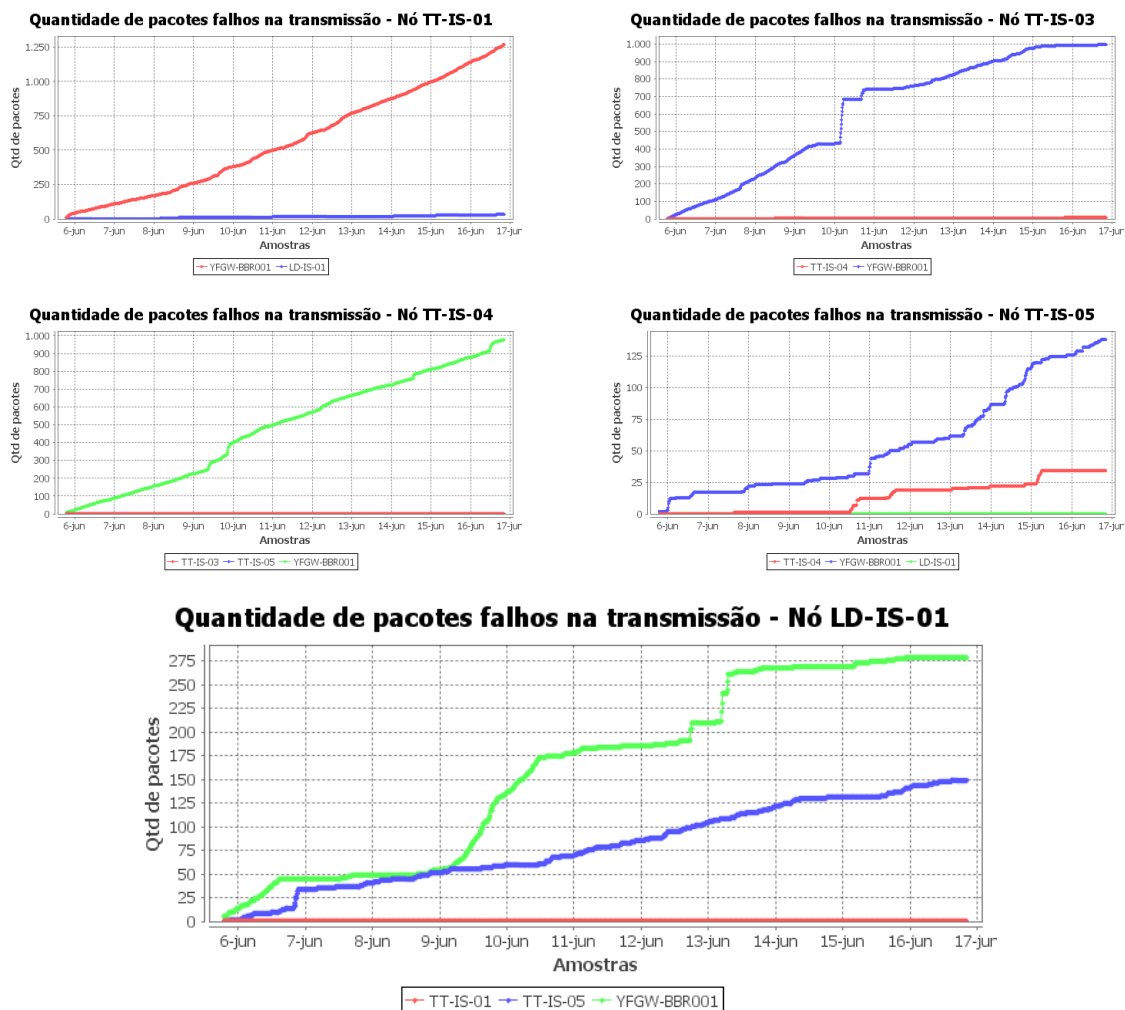


Figura 5.3: Gráficos de quantidade de pacotes falhos na transmissão dos dispositivos de campo de uma rede ISA 100.11a.

Com o intuito de avaliar em um mesmo gráfico a quantidade de pacotes transmitidos e falhos na transmissão, foi criado um tipo de gráfico de avaliação para tal objetivo. As figuras 5.4 apresentam os gráficos de transmissão e falha dos dispositivos de campo.

Porém, mesmo que o usuário fique ciente dos caminhos de transmissão que estão com maior quantidade de pacotes falhos, com os gráficos apresentados até agora o usuário não consegue entender o porquê de algum caminho apresentar uma maior quantidade de pacotes falhos. Para sanar tal dúvida, foi criado um gráfico que apresenta o valor do nível de potência do sinal de cada vizinho de um dispositivo. Na figura 5.5 são apresentados os gráficos de nível de potência do sinal recebido de todos os dispositivos de campo pelos seus vizinhos.

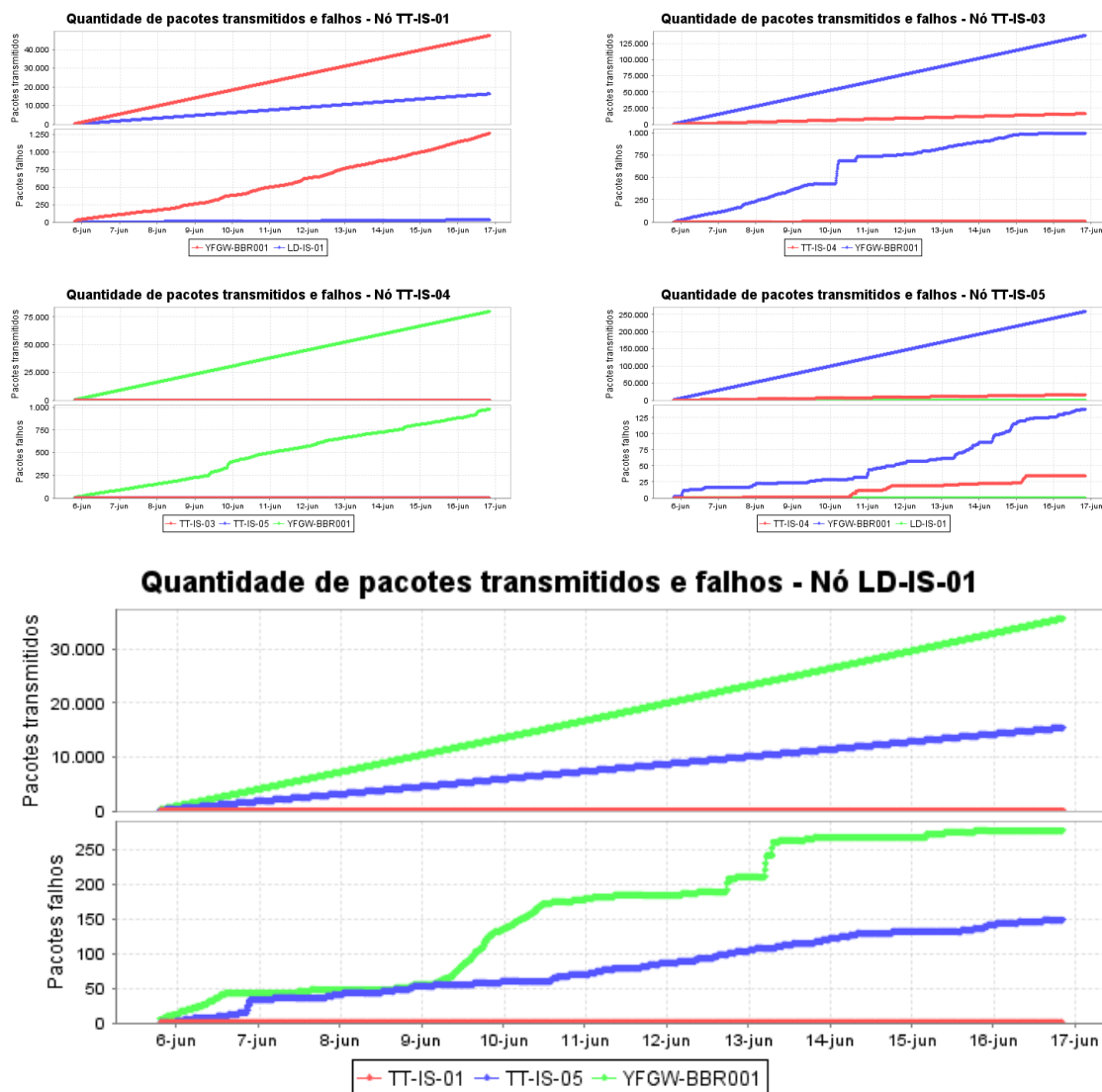


Figura 5.4: Gráficos de pacotes transmitidos e falhos dos dispositivos de campo de uma rede ISA 100.11a.

Com os gráficos de nível de potência do sinal é possível deduzir em quais horários ou momentos ocorreram algum tipo de interferência ou alteração na rede que fez com que os níveis dos sinais fossem alterados. Observa-se que, aproximadamente, nos dias 14, 15 e 16 de junho houveram alterações no caminho de comunicação entre os dispositivos TT-IS-05 e LD-IS-01, pois, através dos gráficos mostrados nas figuras 5.5(d) e 5.5(e), pode-se verificar que os níveis de potência diminuíram para a faixa de -65 dBm.

Já que observou-se que o caminho entre os dispositivos TT-IS-05 e LD-IS-01, a ferramenta oferece um gráfico para avaliação da estabilidade desse caminho no período de funcionamento da rede, mostrado na figura 5.6.

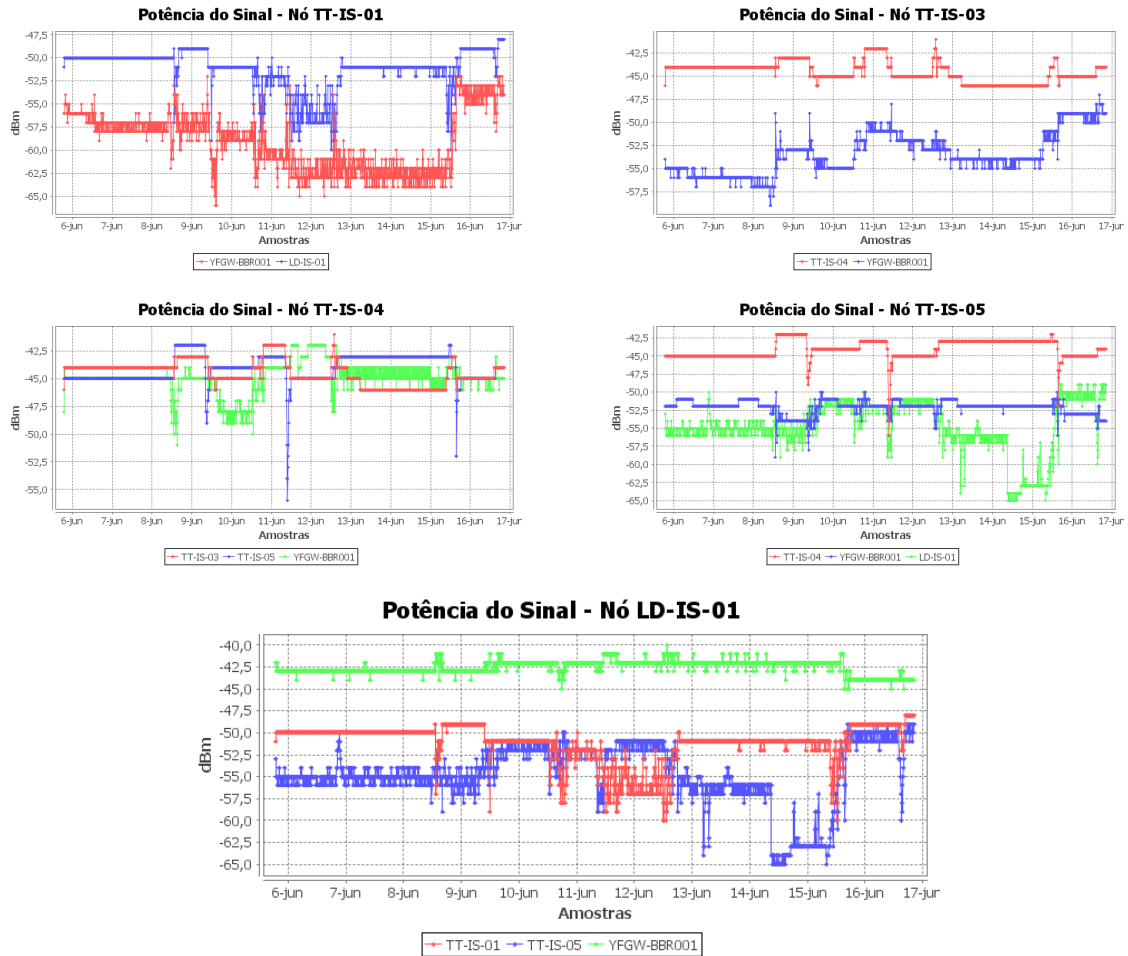


Figura 5.5: Gráficos de nível de potência dos sinais recebidos pelos dispositivos de campo de uma rede ISA 100.11a.

Nota-se na figura 5.6 que a estabilidade está variando, mas ainda com um nível de estabilidade aceitável, próximo de 100%. Porém, analisando a figura 5.5(a), observa-se que o nível de potência do sinal no caminho entre o TT-IS-01 e o YFGW-BBR001 está bastante instável. Nesse caso, é interessante analisar como essa instabilidade no nível do sinal está afetando a estabilidade do caminho entre esses dois elementos da rede. Na figura 5.7 é apresentada a estabilidade desse caminho.

Facilmente, pode-se deduzir que a inconstância do sinal no caminho pode ser um fator para a redução da estabilidade do caminho, como observado na figura 5.7. E, por fim, foi desenvolvido um gráfico de avaliação qualitativa que avalia as estabilidades dos caminhos juntamente com os níveis de potência. Para tal avaliação, definidas análises temporais e análises de variabilidade através de diagrama de caixa.

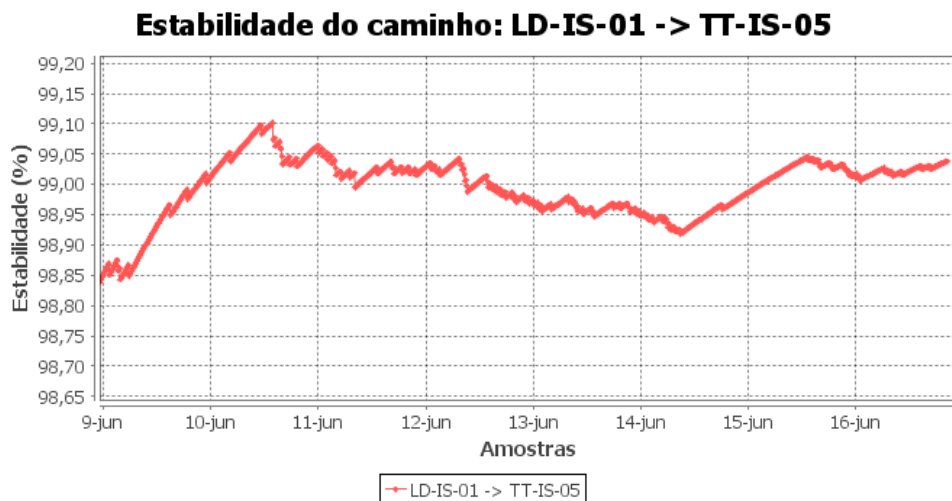


Figura 5.6: Gráfico de estabilidade do caminho entre os dispositivos LD-IS-01 e TT-IS-05.

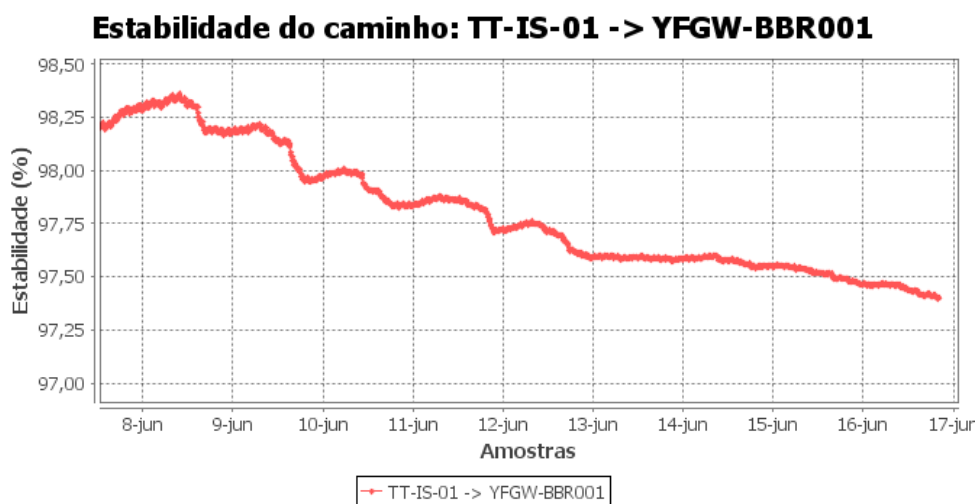


Figura 5.7: Gráfico de estabilidade do caminho entre os dispositivos TT-IS-01 e YFGW-BBR001.

Através do gráfico apresentado na figura 5.8, é possível avaliar o conjunto de valores coletados de estabilidade dos caminhos formados pelo dispositivo LD-IS-01 com seus vizinhos, como também os valores coletados de nível de potência do sinal. O objetivo desse gráfico é analisar como está a estabilidade e o nível de potência dos vizinhos do dispositivo escolhido para avaliação, que no caso da figura 5.8 é o LD-IS-01. Por exemplo, através do gráfico da figura 5.8, nota-se que o vizinho que está com o nível de potência mais fraco e mais disperso é o TT-IS-05, porém o YFGW-BBR001 apresenta um conjunto de valores de estabilidade mais disperso que os valores de estabilidade do TT-IS-05.

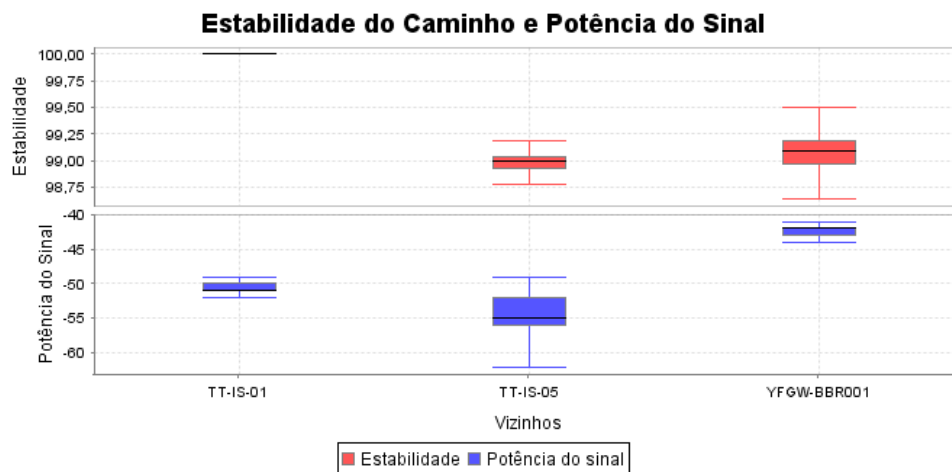


Figura 5.8: Gráfico de estabilidade do caminho e nível de potência do sinal dos vizinhos do dispositivo LD-IS-01.

A avaliação através do gráfico de "estabilidade do caminho e potência do sinal", como visto na figura 5.8, pode auxiliar na alteração da topologia da rede, devido a descoberta de algum vizinho que esteja com um nível fraco do sinal e grande perda de pacotes. Não somente esse gráfico, mas todos os gráficos da ferramenta podem auxiliar numa possível alteração da rede para melhorar o desempenho.

5.2 Estudo de caso 2

Neste segundo estudo de caso, serão apresentados os resultados de um procedimento de testes para avaliar as mudanças de rotas de um único dispositivo, quando exposto a um comportamento diferente. O teste teve como objetivo principal determinar, através de uma análise do comportamento da rede sem fio em determinadas situações, quais parâmetros, acessíveis aos usuários, podem indicar quais são as rotas primária e secundária definidas para um instrumento. Para tal teste foi necessário configurar uma rede em malha com cinco dispositivos de campo, onde quatro desses têm visada com o *gateway* e, apenas, um dispositivo não tem. Na figura 5.9 é mostrada a topologia adotada para o teste.

Inicialmente, a rede foi configurada com todos os cinco instrumentos, conforme apresenta a figura 5.9. Todos os dispositivos estavam com visão para o *gateway*, inclusive o elemento que não deveria ter visão. Com isso, após a configuração da rede, um instrumento foi colocado em situações que ficasse com visão para os outros dispositivos de campo e sem visada para o *gateway*. Esse dispositivo é considerado o dispositivo de teste da rede, conforme a indicação na figura 5.9, e são as rotas de tráfego de dados dele

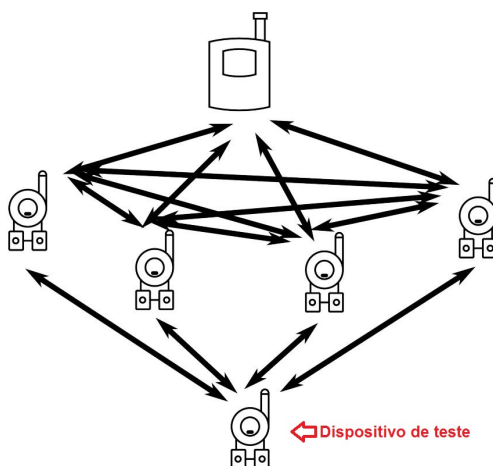


Figura 5.9: Topologia adotada no estudo de caso 02.

que serão avaliadas no teste. Entende-se que depois que o dispositivo de campo perde a comunicação com o *gateway*, ele deve começar a trafegar informações através de outra rota. Então, para entender melhor como o dispositivo de teste se comporta na perda de uma das suas rotas de transmissão, ou melhor, da sua melhor rota de tráfego, a cada iteração do teste, é removido da rede o instrumento com que o dispositivo teste mantém a maior quantidade de pacotes transmitidos. Nessa situação, a cada interação, o dispositivo procura uma nova rota para trafegar seus dados até o *gateway*.

O teste foi realizado com as duas tecnologias de redes industriais avaliadas nesta dissertação: WirelessHART, com equipamentos da empresa Emerson, e ISA 100.11a, com equipamentos da empresa Yokogawa. Na figura 5.10 são apresentados as topologias, com a nomenclatura dos dispositivos presentes na rede, para as duas tecnologias testadas.

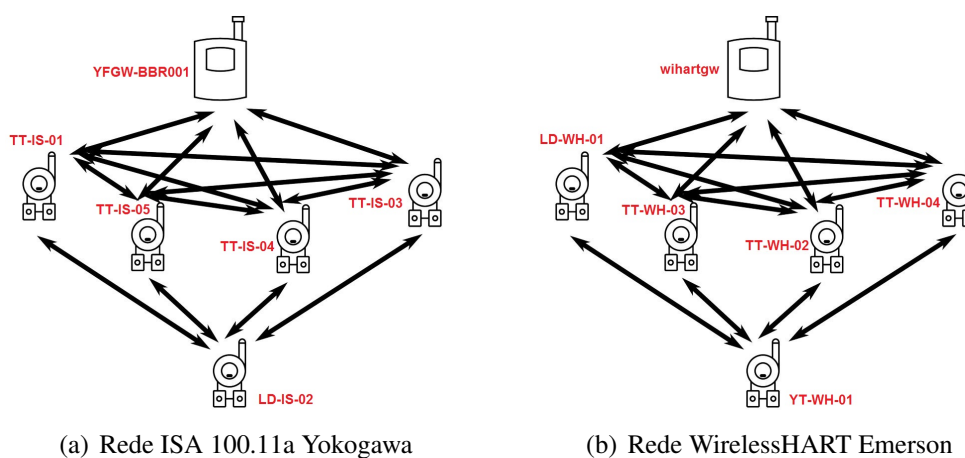
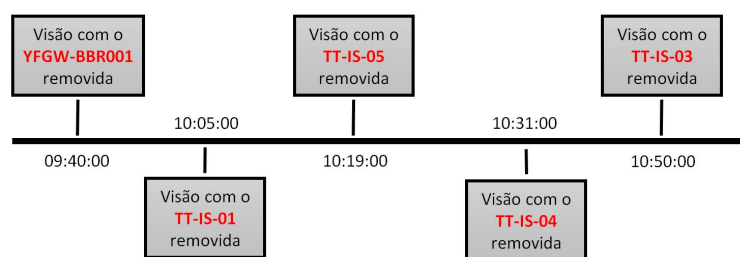
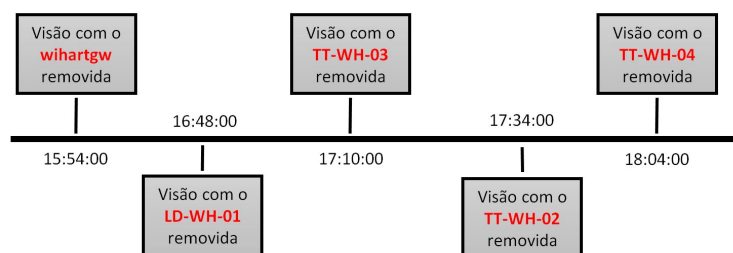


Figura 5.10: Topologias de testes.

Observa-se que o dispositivo LD-IS-02 e o dispositivo YT-WH-01 serão os dispositivos de teste utilizados nessa avaliação. Para identificar quais os parâmetros que indicam quais são as rotas primárias e secundárias dos dispositivos, foram utilizadas as avaliações quantitativa dos pacotes transmitidos, da quantidade de links de transmissão disponíveis e do parâmetro de fonte de clock desses dispositivos de teste. Porém, para que seja possível realizar uma avaliação da mudança de rota é necessário identificar quais os dispositivos disponíveis na rede, quais foram removidos e em que horários eles foram removidos. Na figura 5.11 são mostradas linhas do tempo que representam o funcionamento das redes, indicando os momentos que cada dispositivo foi removido da visão do dispositivo de teste.



(a) Rede ISA 100.11a Yokogawa

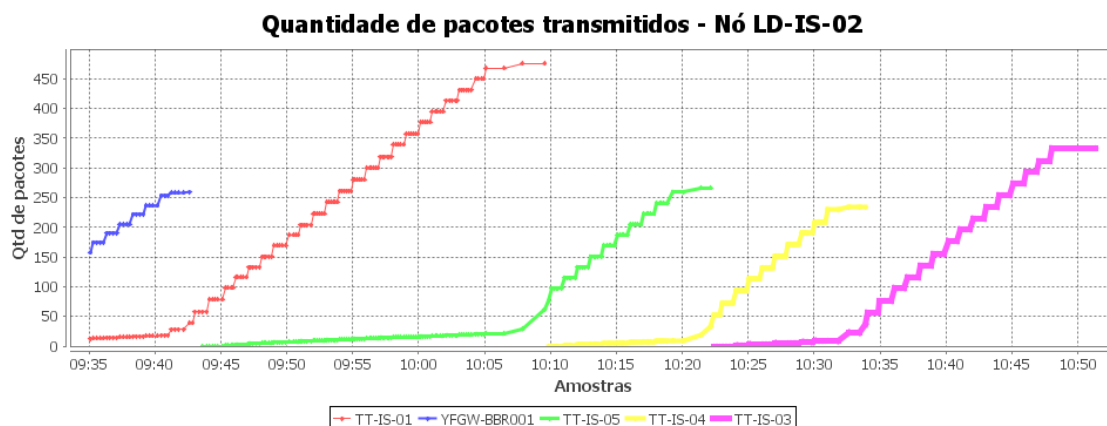


(b) Rede WirelessHART Emerson

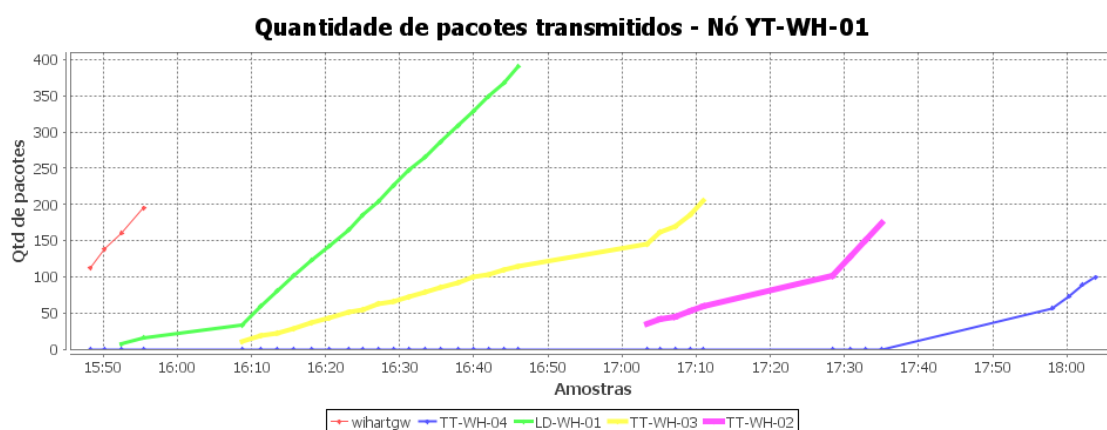
Figura 5.11: Linhas do tempo para o funcionamento das redes.

A partir do gráfico apresentado na figura 5.11, é possível verificar que o primeiro dispositivo a ser removido da visão do dispositivo de teste é sempre o gerenciador da rede. Após isso, os dispositivos removidos são escolhidos de acordo com a quantidade de pacotes transmitidos. Na figura 5.12 são mostrados os gráficos de pacotes transmitidos pelos dispositivos de teste das duas redes, definidos na figura 5.10.

Observando os gráficos da figura 5.12 junto com as remoções informadas nas linhas do tempo da figura 5.11, torna-se verídico a informação que o vizinho removido é sempre o que tem a maior quantidade de pacotes transmitidos para o dispositivo de teste, assim obrigando que os dispositivos de teste procurem um outro vizinho para transmitir os pacotes.



(a) Pacotes transmitidos pelo LD-IS-02 na rede ISA 100.11a Yokogawa



(b) Pacotes transmitidos pelo YT-WH-01 na rede WirelessHART Emerson

Figura 5.12: Gráficos de avaliação dos pacotes transmitidos pelos dispositivos de teste.

Dotados da avaliação dos pacotes transmitidos pelos dispositivos de teste, pode-se deduzir quais as rotas estão sendo utilizadas com maior frequência, consequentemente, qual é a rota preferencial ou primária do dispositivo de teste. Com base nesses dados, testes com outros parâmetros foram realizados para verificar quais os parâmetros, disponíveis para a ferramenta, são indicadores de rotas primária e secundária. Nesses testes, definiu-se que a quantidade de links de transmissão e os dispositivos configurados como fonte de relógio são parâmetros que indicam quais são essas rotas.

Na figura 5.13 é mostrado um gráfico, para a rede da tecnologia ISA 100.11a, que engloba os três parâmetros avaliados: quantidade de pacotes transmitidos, quantidade de links de transmissão e dispositivos fonte de clock.

Com base nos resultados apresentados nos gráficos da figura 5.13, é possível verificar que o dispositivo que estabelece a função de fonte de relógio (*clock*) com o LD-IS-02

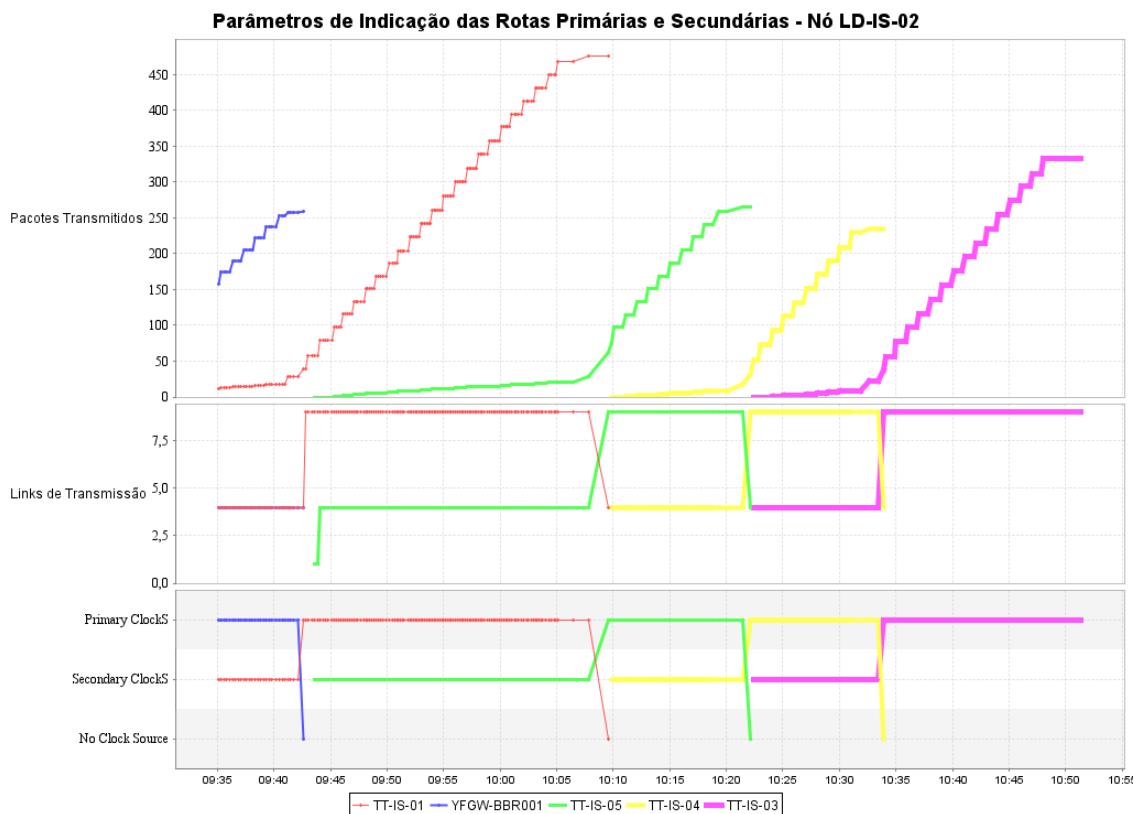


Figura 5.13: Gráfico de parâmetros de indicação das rotas primária e secundária do dispositivo ISA 100.11a.

é sempre o que tem a maior quantidade de links e o que recebe a maior quantidade de pacotes do LD-IS-02. Pode-se então, deduzir que esse dispositivo está definido como a rota preferencial ou primária naquele momento de funcionamento da rede. Por exemplo, no início do funcionamento da rede, o *gateway* (YFGW-BBR001) era o dispositivo definido como fonte de clock primário para o LD-IS-02, como também, o dispositivo que tinha maior quantidade de links, junto com o TT-IS-01, e que tinha a maior quantidade de pacotes recebidos do LD-IS-02, sendo assim a rota primária para o envio dos dados.

Após o *gateway* ter sua visão com o LD-IS-02 removida, o dispositivo de teste escolheu o TT-IS-01, que já era uma rota secundária do LD-IS-02, para torna-se a rota primária para o tráfego de informações. Então, o TT-IS-01 ficou sendo o dispositivo com maior quantidade de links, configurado com a fonte de clock primária e o dispositivo com maior quantidade de pacotes recebidos do LD-IS-02. No momento que o TT-IS-01 tornou-se a rota primária, o dispositivo TT-IS-05 foi configurado como uma rota secundária para o LD-IS-02, tanto que a quantidade de pacotes no caminho entre eles começou a crescer, como pode ser visto no período entre 09:45 e 10:05 do gráfico de pacotes transmitidos na

figura 5.13. Esse comportamento de escolha de outras rotas primária e secundária, e de definição de maiores quantidades de links de transmissão e fontes de clock, foram repetidos até que o dispositivo de teste (LD-IS-02) não tivesse dispositivo para manter uma conexão, momento definido em, aproximadamente, 10:52.

Através das avaliações desses três parâmetros, foi definido um gráfico que realiza a inferência das rotas primárias e secundárias. A inferência das rotas foi realizada considerando o parâmetro de fonte de clock e a quantidade de links definidos no caminho, da mesma forma que analisamos anteriormente. Na figura 5.14 é apresentado o resultado da inferência de rotas para o teste realizado com a tecnologia ISA 100.11a, sendo o dispositivo de teste o LD-IS-02.

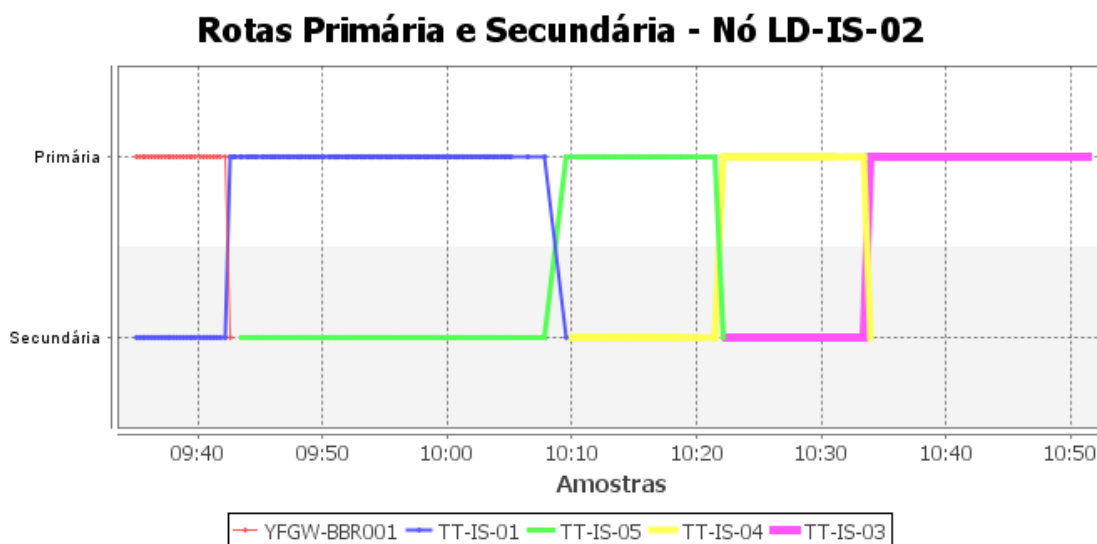


Figura 5.14: Gráfico de inferência das rotas primária e secundária do dispositivo ISA 100.11a.

Da mesma forma, foi realizado o teste para a tecnologia WirelessHART, sendo o dispositivo de teste o YT-WH-01. Na figura 5.15 é mostrado o gráfico de parâmetros que indicam quais são as rotas primárias e secundárias do dispositivo.

Nos resultados apresentados na figura 5.15 existe um período que o dispositivo de teste, o YT-WH-01, não definiu quantidade de links e fontes de relógio, como também, não tem amostras de quantidade de pacotes, o que aparece é apenas resultado da interpolação de dados do gráfico. Nesse momento, o fato é que o dispositivo de teste ficou sem visão para o único dispositivo da rede, que seria o TT-WH-04, o qual voltou a ser vizinho do YT-WH-01 minutos depois.

Porém, os resultados tiveram as mesmas conclusões que os resultados com o teste da

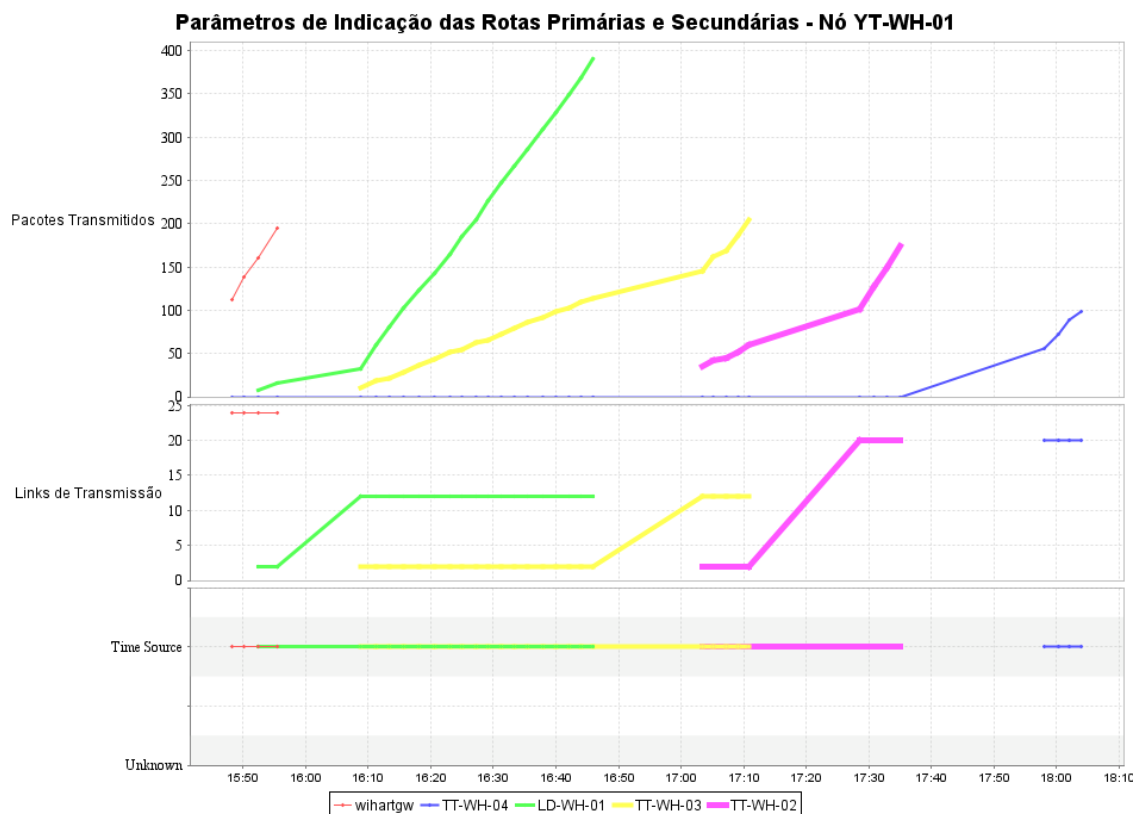


Figura 5.15: Gráfico de parâmetros de indicação das rotas primária e secundária do dispositivo Wireless HART.

rede ISA 100.11a. O YT-WH-01 sempre transmiti mais pacotes para o dispositivo que tiver maior quantidade de links de transmissão e que for fonte de clock para o dispositivo de teste, YT-WH-01. Lembre-se que no protocolo WirelessHART, só existem duas definições de fonte de clock: é ou não uma fonte de clock. Essa definição é diferente do protocolo ISA 100.11a, porque nesse último são definidos três estados de fonte de clock: é uma fonte de clock preferencial, é uma fonte de clock redundante e não é fonte de clock.

Por fim, foi realizado a inferência de rotas primária e secundária, como mostrado na figura 5.16. E, da mesma forma que o gráfico 5.15, no período de, aproximadamente, 17:35 e 17:57 o dispositivo ficou sem visão com o último dispositivo da rede.

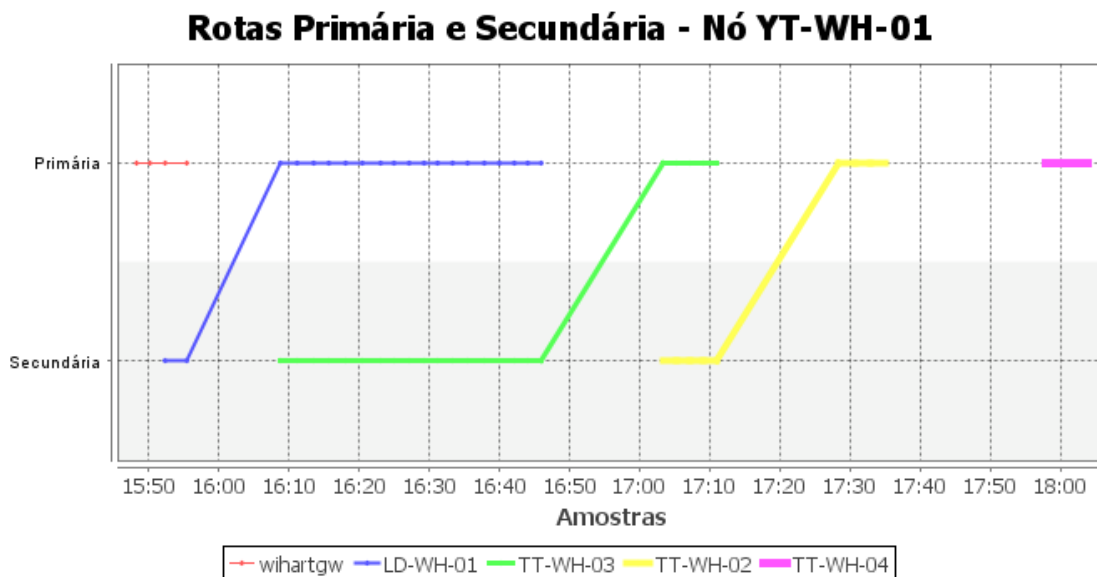


Figura 5.16: Gráfico de inferência das rotas primária e secundária do dispositivo WirelessHART.

5.3 Estudo de caso 3

Por fim, foi realizado o terceiro estudo de caso. Este estudo baseia-se em uma rede da tecnologia WirelessHART Emerson formada por apenas um dispositivo de campo. Com base nos dados recebidos, foi avaliado a vida útil da bateria do único dispositivo de campo, o TT-WH-03. A figura 5.17 apresenta o gráfico de vida útil da bateria do dispositivo no período de tempo registrado pelo *PW-Logger*.

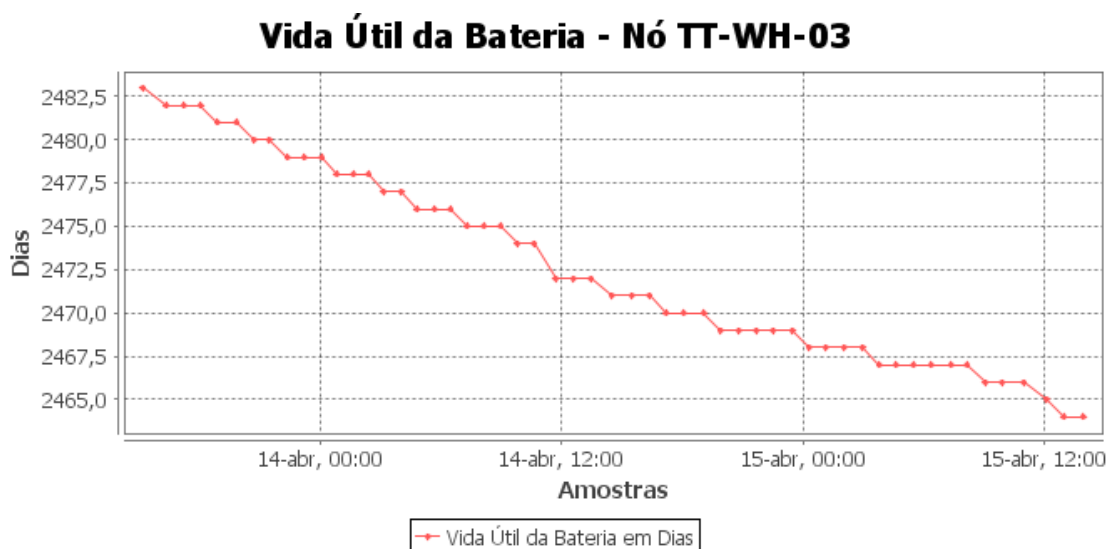


Figura 5.17: Gráfico da vida útil da bateria do dispositivo TT-WH-03.

Observa-se que existe uma tendência na queda da vida útil da bateria do dispositivo que não atende uma predição correta. Por exemplo, através do gráfico mostrado na figura 5.18, observa-se que na amostra próximo ao instante 04:00 o dispositivo indica que restam 2477 dias para acabar a bateria, porém na amostra seguinte, no instante próximo a 04:50, o dispositivo indica que restam 2476 dias para acabar a bateria, então o estimador diminuiu 1 dia em, aproximadamente, 50 minutos. Nesse caso, torna-se necessário que um sistema de inferência baseado em redes neurais artificiais aprenda o comportamento desse parâmetro para informar ao usuário qual é o correto valor do parâmetro alguns amostras a frente.

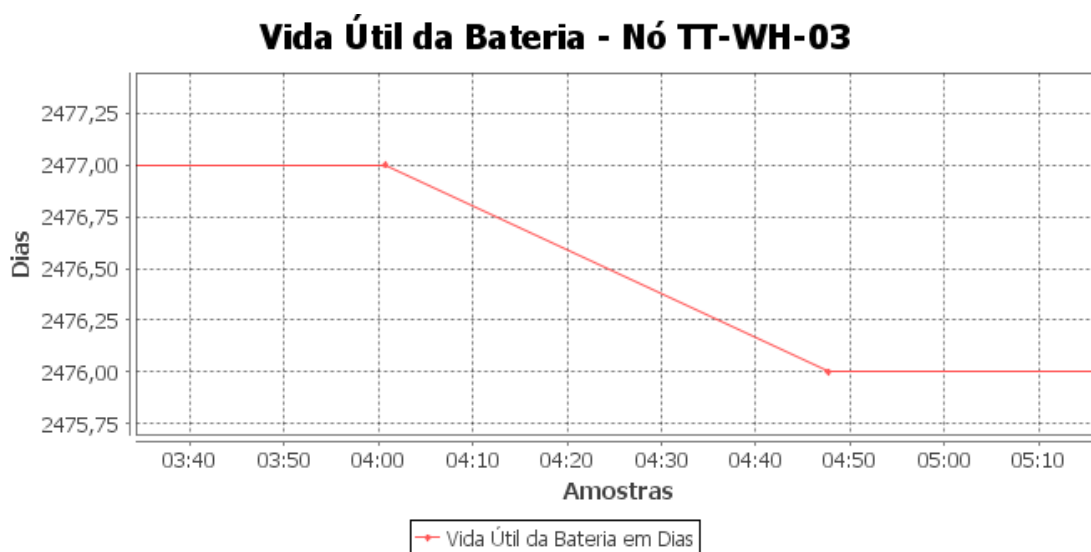
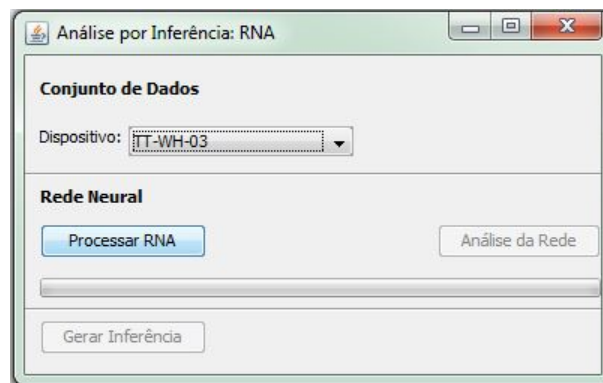


Figura 5.18: Parte do gráfico da vida útil da bateria do dispositivo TT-WH-03.

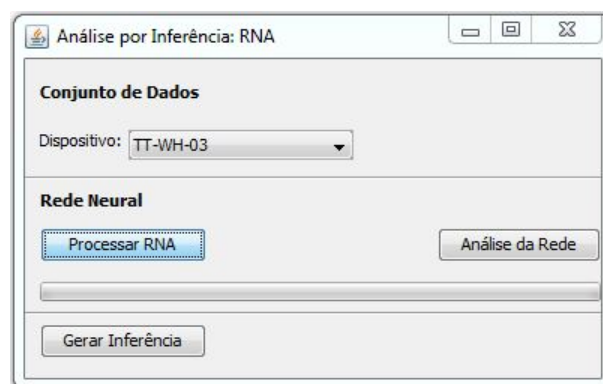
O sistema de inferência implementado nessa dissertação é descrito na seção 4.2.3. E a quantidade de amostras inferidas pelo sistema é de, aproximadamente, 1/3 da quantidade de amostras coletadas para o treinamento da rede neural. Nesse caso, como os dados reais foram coletados em, aproximadamente, 2 dias (48 horas), como visto na figura 5.17, então o sistema vai inferir amostras futuras até 16 horas a frente.

Inicialmente, para executar a inferência, é necessário que usuário escolha qual dispositivo será utilizado e clique na opção de "Processar RNA", como mostrado na figura 5.19(a). Após a rede ter sido processada, o sistema habilita duas funcionalidades: a análise da rede neural e a geração da inferência dos dados, que é a funcionalidade principal do módulo. Essas funcionalidades habilitadas podem ser observadas na figura 5.19(b).

Com a opção de "Análise da Rede" é possível observar os gráficos de validação da rede. A validação sem realimentação da rede ARX, que não acumula o erro de inferência,



(a) Tela inicial.



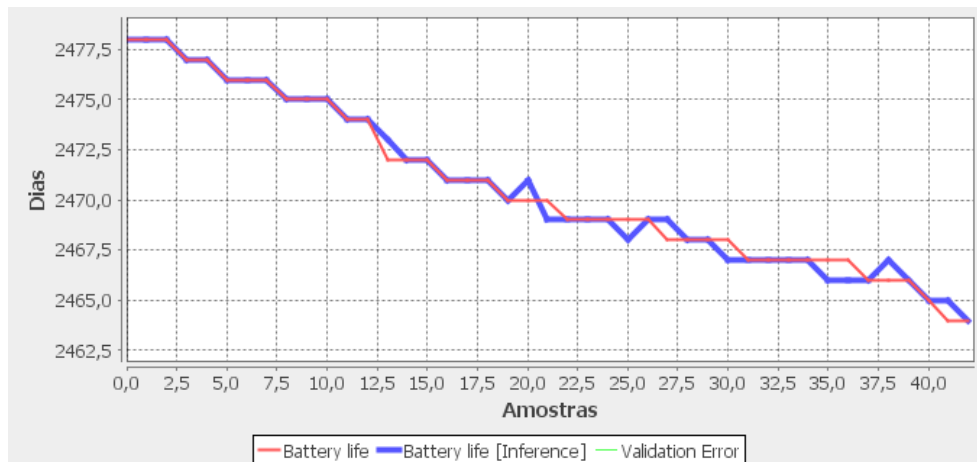
(b) Tela de processamento da RNA.

Figura 5.19: Tela do sistema de inferência utilizando RNA.

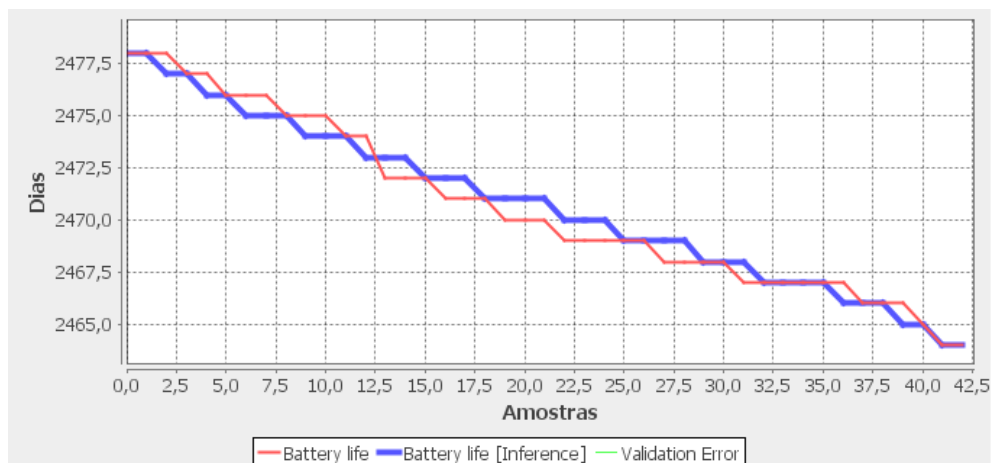
e a validação com a realimentação, utilizada para procurar a rede mais especialista, como descrito na seção 4.2.3. Os gráficos gerados pela análise da rede podem ser vistos na figura 5.20.

Através dos gráficos de validação apresentados na figura 5.20, nota-se que a rede neural, escolhida como melhor especialista, consegue obter um bom desempenho na validação, tanto quando a validação é realizada realimentando o saída na entrada futura quanto na validação da rede sem realimentação. Após processar a rede, etapa que cria, treina e retreina até encontrar a melhor rede, é possível gerar a inferência dos dados, etapa principal do módulo. Na figura 5.21 é mostrado o resultado da geração de valores inferidos da vida útil da bateria do dispositivo TT-WH-03.

Observe que no gráfico mostrado na figura 5.21 existem amostras de duas cores diferentes. As amostras apresentadas na cor vermelha são dados reais, coletados pelo *PW-Logger* e utilizados pelo *PW-DataAnalyzer* para fazer o treinamento da rede neural. Já as amostras apresentadas na cor azul são os dados inferidos pela rede neural do módulo de



(a) Validação da RNA ARX sem realimentação.



(b) Validação da RNA ARX com realimentação.

Figura 5.20: Gráficos de validação da rede neural ARX.

avaliação por inferência. Observa-se que o sistema infere dados do dia 16 de abril, dados que não foram apresentados à rede de acordo com o gráfico mostrado em 5.17. Essa limitação da inferência de, aproximadamente, 30% do tamanho do conjunto de treinamento é devido à utilização de modelos NARX, que não apresentam eficiência quando o conjunto de dados inferidos é grande. O grande motivo desse problema é que um erro de inferência gerado em um instante da execução da rede é acumulado, gerando assim uma totalização de erros que pode levar os dados futuros a valores extremamente grandes positivamente ou negativamente, ou melhor, levando os dados inferidos ao infinito.

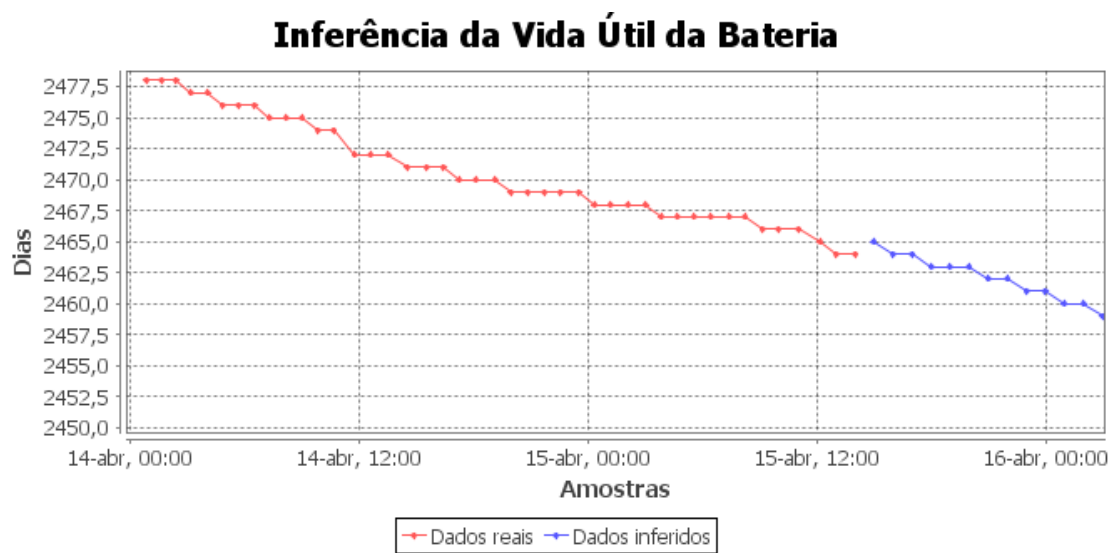


Figura 5.21: Gráfico de inferência da vida útil da bateria do dispositivo TT-WH-03.

Capítulo 6

Conclusão

O cenário das redes sem fio para a comunicação entre dispositivos de campo na automação industrial está crescendo. Nesse crescimento, muitos protocolos e equipamentos estão sendo desenvolvidos para suprir essa necessidade da indústria. Porém, para que tal tecnologia consiga penetrar na indústria, é necessário que ela seja confiável e validada.

Nesse sentido, esta dissertação apresentou uma ferramenta capaz de avaliar, através de diversas formas e de diversos parâmetros, redes industriais baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a. Trazendo como vantagens a inclusão de elementos matemáticos que facilitaram na visualização da avaliação, como também, técnicas inteligentes para entender o comportamento da rede e prever informações.

A ferramenta foi utilizada para avaliar algumas redes, conforme apresentado no capítulo 5. No primeiro estudo de caso foram retirados gráficos que avaliaram o tráfego de dados pelos caminhos, o nível de potência dos sinais e a estabilidade dos caminhos. No segundo estudo de caso foram avaliados os parâmetros que indicam as possíveis rotas primária e secundária de um dispositivo em uma rede em malha, para tal estudo foram realizados testes com as duas tecnologias: WirelessHART Emerson e ISA 100.11a Yokogawa. E, por fim, foi realizada uma avaliação para inferir a vida útil da bateria de um dispositivo de campo utilizando a rede neural implementada na ferramenta. Com os resultados obtidos nesses estudos de caso, nota-se que a ferramenta desenvolvida nesta dissertação apoia diversas avaliações das redes industriais baseadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a.

As avaliações apresentadas e desenvolvidas na ferramenta podem apoiar projetos de desenvolvimento, teste e instalação das tecnologias. Além disso, pode auxiliar na decisão de procedimentos de manutenção das redes, por exemplo, quando existe a necessidade de troca de bateria de um ou mais dispositivos da rede, ou, quando existe a necessidade de mudança de topologia para melhorar a estabilidade e a confiabilidade da rede. A partir de

todas essas avaliações é possível utilizar a tecnologia com maior confiança.

6.1 Trabalhos futuros

Apesar dos resultados eficazes obtidos pela ferramenta, ainda existem muitos avaliações a serem implementadas. Abaixo segue alguns pontos importantes para incluir e melhorar no trabalho.

- Definir quais os outros parâmetros que podem ser coletados dos *drivers* para serem avaliados.
- Definir outros tipos de gráficos de diagnóstico de um dispositivo, apresentando a maior quantidade de informações de forma intuita.
- Melhorar a avaliação por inferência da vida útil da bateria incluindo mais parâmetros de entrada da rede neural.
- Incluir mais técnicas inteligentes para o diagnóstico dos dispositivos de campo nas redes industriais sem fio.

6.2 Publicações associadas

A ferramenta desenvolvida nesta dissertação foi utilizada na geração das seguintes publicações:

- "Cenário Atual das Redes Industriais Sem Fio: Experimentos e Testes de Campo- Rio Automação, 2015.
- "Cenário Atual das Redes Industriais Sem Fio: Experimentos e Testes de Redes em Malha- Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2015 [submetido].

Referências Bibliográficas

- Arumugam, Gopi Saminathan & Thirumurugan Ponnuchamy (2015), 'Ee-leach: development of energy-efficient leach protocol for data gathering in wsn', *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* **2015**(1), 1–9.
- Baidya, Sonali Sen & Abhishek Baidya (2015), Energy conservation in a wireless sensor network by an efficient routing mechanism, *em* 'Communication, Information & Computing Technology (ICCICT), 2015 International Conference on', IEEE, pp. 1–6.
- Bega, Egídio Alberto (2011), *Instrumentação Industrial*, Rio de Janeiro: Interciência.
- Beitollahzadeh, Jaber, Abdollah Amirkhani Shahraki & Karim Mohammadi (2013), A new method for increasing the lifetime of network and reducing energy consumption in wireless sensor network, *em* 'Electrical Engineering (ICEE), 2013 21st Iranian Conference on', IEEE, pp. 1–5.
- Chen, D., M. Nixon & A. Mok (2010), *WirelessHART: Real-Time Mesh Network for Industrial Automation*, Springer.
- Christin, Delphine, Parag S Mogre & Matthias Hollick (2010), 'Survey on wireless sensor network technologies for industrial automation: The security and quality of service perspectives', *Future Internet* **2**(2), 96–125.
- Collotta, Mario, Giovanni Pau & Gianfranco Scata (2014), A fuzzy system to reduce power consumption in wireless sensor networks: A comparison between wireless-hart and ieee 802.15.4, *em* 'Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International', IEEE, pp. 766–771.
- Costa, Márcio S & Jorge LM Amaral (2012), 'Análise de redes sem fio industriais–isa100 x wirelesshart', *InTech–America do Sul, São Paulo* (140), 61–67.
- de Campos, Mario Massa & Kaku Saito (2004), *Sistemas inteligentes em controle e automação de processos*, Ciência Moderna.

- Gomes, Ruan D, Marcelo S Alencar, Iguatemi E Fonseca & Abel C Lima Filho (2014), 'Desafios de redes de sensores sem fio industriais', *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação* **4**(1).
- Goyal, Rahul (n.d.), 'A review on energy efficient clustering routing protocol in wireless sensor network'.
- Guimarães, Paulo (2008), *Métodos Quantitativos Estatísticos*, IESDE Brasil.
- Haykin, Simon S (2001), *Redes neurais*, Bookman.
- Heaton, Jeff (2010), 'Programming neural networks with encog 2 in java. heaton research'.
- Kiani, Farzad, Ehsan Amiri, Mazdak Zamani, Touraj Khodadadi & Azizah Abdul Manaf (2015), 'Efficient intelligent energy routing protocol in wireless sensor networks', *International Journal of Distributed Sensor Networks* **2015**.
- Kulkarni, Raghavendra V, Anna Forster & Ganesh Kumar Venayagamoorthy (2011), 'Computational intelligence in wireless sensor networks: A survey', *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* **13**(1), 68–96.
- Kumar Somappa, Admar Ajith, Knut Ovsthus & Lars M Kristensen (2014), 'An industrial perspective on wireless sensor networks - a survey of requirements, protocols, and challenges', *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* **16**(3), 1391–1412.
- Lajara, Rafael J, Juan J Perez-Solano & Jose Pelegri-Sebastia (2015), 'A method for modeling the battery state of charge in wireless sensor networks', *Sensors Journal, IEEE* **15**(2), 1186–1197.
- Lin, Tsungnan, Bill G Horne, Peter Tino & C Lee Giles (1998), 'Learning long-term dependencies is not as difficult with narx recurrent neural networks'.
- Lopes, Daniel, Heitor Medeiros Florencio, Adrião Duarte Neto, Ivanovitch Medeiros Silva, Anderson Santos & Luiz Affonso Guedes (2015), 'Cenário atual das redes industriais sem fio: Experimentos e testes de campo', *Congresso Rio Automação*.
- Lopes, Kennedy Reurison (2009), Implementação de classificador neural no ambiente Foundation Fieldbus, Tese de doutorado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE.
- Lugli, Alexandre B. (2014), *Redes sem fio para automação industrial*, São Paulo: Erica.

- Oliveira, Alan Vicente (2012), Análise comparativa de metodologias de estimação de parâmetros aplicada a modelos analíticos utilizados na predição do tempo de vida de uma bateria, Mestrado em modelagem matemática, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Ijuí, RS, Brasil.
- OLIVEIRA, JÚLIO CÉSAR MELO GOMES DE (2015), Desenvolvimento de sistema de monitoramento de redes wirelesshart, Universidade federal do rio grande do norte.
- Petersen, Stig & Simon Carlsen (2011), ‘Wirelesshart versus isa100. 11a: the format war hits the factory floor’, *Industrial Electronics Magazine, IEEE* **5**(4), 23–34.
- Rezha, Fadillah Purnama & Soo Young Shin (2014), ‘Performance analysis of isa100. 11a under interference from an iee 802.11 b wireless network’, *Industrial Informatics, IEEE Transactions on* **10**(2), 919–927.
- Rukpakavong, Wilawan, Lin Guan & Iain Phillips (2014), ‘Dynamic node lifetime estimation for wireless sensor networks’, *Sensors Journal, IEEE* **14**(5), 1370–1379.
- Schneider, Keila Kleveston (2011), Modelos analíticos na predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis, Tese de doutorado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- Semente, Rodrigo S, Alonso Silva, Andrés O Salazar, Felipe DM Oliveira & Alberto S Lock (2013), A energy efficient wsn system for limited power source environments, em ‘Sensing Technology (ICST), 2013 Seventh International Conference on’, IEEE, pp. 193–197.
- Siegelmann, Hava T, Bill G Horne & C Lee Giles (1997), ‘Computational capabilities of recurrent narx neural networks’, *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on* **27**(2), 208–215.
- Silva, IMD (2013), Uma Metodologia para Modelagem e Avaliação da dependabilidade de Redes Industriais Sem Fio. 175p, Tese de doutorado, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Computação), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- Standard, IEC (2010), ‘Industrial communication networks - wireless communication network and communication profiles - wirelesshart’, *IEC 62591* .
- Standard, IEC (2012), ‘Industrial communication networks - wireless communication network and communication profiles - isa 100.11a’, *IEC 62734* .

- Standard, ISA (2009), ‘Wireless systems for industrial automation: process control and related applications’, *ISA-100.11 a-2009*.
- TOMÉ, WILLY MOSER DE FIGUEIREDO (2015), Desenvolvimento de um driver de comunicação para coleta de dados em redes isa100.11a, Universidade federal do rio grande do norte.
- Willig, Andreas, Kirsten Matheus & Adam Wolisz (2005), ‘Wireless technology in industrial networks’, *Proceedings of the IEEE* **93**(6), 1130–1151.
- Yang, Dong, Youzhi Xu & Mikael Gidlund (2010), Coexistence of ieee802. 15.4 based networks: A survey, *em* ‘IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society’, IEEE, pp. 2107–2113.