



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



Modelo Analítico para Avaliação da Estabilidade de *Links* em Redes Industriais Sem Fio

Heitor Medeiros Florencio

Orientador: Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Engenharia de Computação) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Número de ordem PPgEEC: D263
Natal, RN, Dezembro de 2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Florencio, Heitor Medeiros.

Modelo analítico para avaliação da estabilidade de links em redes industriais sem fio / Heitor Medeiros Florencio. - 2020.

66 f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, RN, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto.

1. Redes industriais - Tese. 2. Redes de sensores sem fio - Tese. 3. Estabilidade de link - Tese. 4. ISA 100.11a - Tese. I. Dória Neto, Adrião Duarte. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 004.4

Modelo Analítico para Avaliação da Estabilidade de *Links* em Redes Industriais Sem Fio

Heitor Medeiros Florencio

Tese de Doutorado aprovada em 09 de dezembro de 2019 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

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

Prof. Dr. Andres Ortiz Salazar DCA/UFRN

Prof. Dr. Jorge Dantes de Melo Externo à Instituição

Prof. Dr. Dennis Brandão USP

Dr. Daniel Lopes Martins Externo à Instituição

Agradecimentos

À minha família por todo o apoio durante minha vida acadêmica.

À minha noiva, Gabriely Azevêdo, por toda cumplicidade e estímulo em todos os momentos.

Ao meu orientador Professor Adrião Duarte Dória Neto pela orientação, paciência e incentivo durante todos esses anos.

À toda equipe do Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo (LAMP), em especial aos colegas Daniel Lopes, Gabriel Lucena, Diego Moura e Glauco Cipriano.

À UFRN e ao Grupo de pesquisa em Sistemas Inteligentes.

Resumo

As redes de sensores sem fio surgiram no ambiente industrial com a finalidade de aumentar a flexibilidade e, principalmente, implantar elementos de medição e atuação em locais de difícil acesso. Contudo, devido às peculiaridades do meio de comunicação sem fio no ambiente industrial, é fundamental o uso de métricas para avaliar o desempenho dos enlaces de comunicação (*link*). Uma propriedade essencial para avaliação do comportamento da rede é a estabilidade dos *links*. Diversos estudos definem métricas para avaliação da estabilidade de *links* utilizando diferentes parâmetros. Este trabalho apresenta um modelo analítico para avaliação da estabilidade de *link* baseado na potência do sinal recebido e na taxa de entrega de pacotes. Os resultados obtidos através de testes realizados com diferentes cenários apresentaram que o modelo analítico consegue identificar situações de instabilidade do *link* quando trata-se de alta variação na intensidade do sinal recebido e baixa entrega de pacotes. Em seguida, um sistema de controle em rede ISA 100.11a foi desenvolvido para validar o modelo proposto neste trabalho. Os resultados obtidos com a aplicação do modelo no sistema de controle de nível apresentaram valores de erro em regime permanente abaixo do limite máximo predeterminado, enquanto que nos testes de controle que não consideraram o fator de estabilidade dos *links* o erro ultrapassou o limite.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio Industriais, Estabilidade de *Link*, Sistemas de Controle em Rede, ISA 100.11a

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) have emerged in the industrial environment with the purpose of increasing flexibility and deploying measurement and actuation elements in hard to reach areas. However, due to the peculiarities of wireless communication in the industrial environment, the use of metrics to evaluate the performance of communication links is crucial. An essential property for assessing network behavior is the stability of links. Several studies define metrics for evaluating link stability using different parameters. This thesis presents an analytical model for evaluating link stability based on received signal strength and packet delivery rate. The results obtained through tests performed with different scenarios showed that the analytical model can identify link instability situations when it comes to high variation in received signal strength and low packet delivery. Then, an ISA 100.11a network control system was developed to validate the model proposed in this work. The results obtained with the application of the model in the level control system presented steady state error values below the predetermined maximum limit, while in the control tests that did not consider the link stability factor the error exceeded the limit.

Keywords: Industrial Wireless Sensor Networks, Link Stability, Networked Control System, ISA 100.11a

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos e Abreviaturas	vii
1 Introdução	1
1.1 Justificativa	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização	4
2 Fundamentação Teórica	5
2.1 Redes Industriais	5
2.1.1 Protocolo Modbus	6
2.2 Redes Industriais Sem Fio	8
2.2.1 Enlace físico: Padrão IEEE 802.15.4	9
2.2.2 Arquiteturas das Redes	11
2.2.3 Técnicas de Diversidade e Acesso ao Meio	15
2.2.4 Técnicas de Roteamento e Escalonamento	17
3 Métrica de Desempenho: Estabilidade de <i>Link</i>	21
3.1 Trabalhos Relacionados	21
3.2 Métrica: Estabilidade do <i>Link</i>	25
4 Modelo Analítico de Estabilidade de <i>Link</i>	27
4.1 Etapas do Modelo	27
4.1.1 Razão de Atenuação	28
4.1.2 Variância do fator <i>RSSRatio</i>	31
4.1.3 Média Móvel Exponencial (MME)	32
4.1.4 Função de Estabilidade de <i>Link</i>	33
4.2 Resultados	35
4.2.1 Cenário 01	37
4.2.2 Cenário 02	38
4.2.3 Cenário 03	40

5	Aplicação do Modelo de Estabilidade de <i>Link</i>	43
5.1	Arquitetura do Sistema	44
5.1.1	Objetivos da Aplicação	46
5.1.2	Controlador: Microcontrolador ESP32	46
5.1.3	Comunicação Modbus TCP com o <i>Gateway</i>	48
5.1.4	Comunicação GSAP com o <i>Gateway</i>	48
5.1.5	Comunicação Modbus TCP com o <i>SCADA</i>	50
5.2	Resultados: Análise da Estabilidade do <i>Link</i>	52
5.2.1	Teste 01	53
5.2.2	Teste 02	55
5.2.3	Teste 03	57
5.2.4	Síntese dos testes	57
5.3	Lógica de Controle baseada na Estabilidade do <i>Link</i>	58
5.4	Resultados: Análise de Desempenho do Controle	60
6	Considerações finais	63
6.1	Contribuições	64
6.2	Trabalhos desenvolvidos	64
6.3	Propostas de Trabalhos Futuros	65
	Referências bibliográficas	66

Lista de Figuras

1.1	Etapas de desenvolvimento deste trabalho.	3
2.1	Integração dos elementos que formam um sistema de automação industrial.	6
2.2	Tabela das funções do protocolo Modbus.	7
2.3	Linha do tempo da publicação das normas.	9
2.4	Sobreposição de canais 2.4 GHz 802.15.4 e 802.11.	11
2.5	<i>Gateway</i> , gerenciador da rede e gerenciador de segurança.	12
2.6	Arquiteturas das redes WirelessHART e ISA 100.11a.	13
2.7	Malha de controle com equipamentos <i>wireless</i>	14
2.8	Diagrama de transmissão: <i>slots</i> e frequências.	15
2.9	Modos de salto de frequência suportados pelo protocolo ISA 100.11a.	16
2.10	Rotas preferencial e alternativa.	18
2.11	Informações do roteamento e escalonamento.	18
2.12	<i>Slots</i> e <i>superframes</i>	19
3.1	<i>Links</i> com diferentes atributos.	25
4.1	Modelo Analítico de Estabilidade de <i>Link</i>	28
4.2	Gráfico dos valores de PDRi do <i>link</i> TT-IS-06-123 → <i>gateway</i>	30
4.3	Gráfico dos valores do parâmetro <i>RSSRatio</i>	30
4.4	Taxa de variação instantânea do <i>RSSRatio</i>	31
4.5	Gráfico dos dados do parâmetro σ_{Ratio} (<i>StdRatio</i>).	32
4.6	Ponto fora da curva nos valores de medição de <i>RSSRatio</i>	32
4.7	Gráfico dos dados do parâmetro <i>MME</i> (σ_{Ratio}).	33
4.8	Gráfico da função exponencial que gera o fator multiplicador do PDR.	34
4.9	Gráfico dos dados de Estabilidade do <i>Link</i> gerados pelo modelo proposto.	34
4.10	Estação de Gerenciamento YFGW410 (<i>Yokogawa Electric</i>) e roteador <i>backbone</i> YFGW510 (<i>Yokogawa Electric</i>).	36
4.11	Topologia do cenário 01.	37
4.12	Cenário 01: PDR x PDRi.	37
4.13	Cenário 01: Estabilidade x PDRi.	38
4.14	Topologia do cenário 02.	38
4.15	Cenário 02: PDR x PDRi - <i>Link</i> : TT-IS-06-123 → BBR001.	39
4.16	Cenário 02: Estabilidade x PDRi - <i>Link</i> : TT-IS-06-123 → BBR001.	39
4.17	Cenário 02: Estabilidade x PDRi - <i>Link</i> : TT-IS-02 → BBR001.	40
4.18	Topologia do cenário 03.	40
4.19	Cenário 03: PDR x PDRi - <i>Link</i> : TT-IS-03 → BBR001.	41

4.20	Cenário 03: Estabilidade x PDRi - <i>Link</i> : TT-IS-03 → BBR001.	41
4.21	Cenário 03: Estabilidade x PDRi - <i>Link</i> : TT-IS-05 → TT-IS-03.	42
5.1	Arquitetura do Sistema de Controle em Rede ISA 100.11a	44
5.2	<i>Links</i> do Sistema de Controle.	45
5.3	Controlador ESP32.	46
5.4	Controlador ESP32: diagrama de blocos.	47
5.5	Módulos do Controlador.	47
5.6	Estrutura do objeto GSAP: <i>GS_Network_Address</i>	50
5.7	Tela da aplicação ScadaBR com algumas variáveis.	51
5.8	Teste 01: Variáveis do controle (Erro e MV) no período do teste.	53
5.9	Teste 01: RSSI e Estabilidade do <i>Link0</i>	54
5.10	Teste 01: Erro absoluto (%) e Estabilidade do <i>Link0</i>	54
5.11	Teste 02: Variáveis do controle (PV, SP e MV) no período do teste.	55
5.12	Teste 02: Erro absoluto (%) e Estabilidade do <i>Link0</i>	56
5.13	Teste 02: Erro absoluto (%) e PDRi <i>Link0</i>	56
5.14	Teste 03: Erro absoluto (%) e Estabilidade do <i>Link0</i>	57
5.15	Resultado da Malha de Controle baseada na Estabilidade do <i>link</i> : Erro absoluto (%) versus MV.	61
5.16	Resultado da Malha de Controle baseada na Estabilidade do <i>link</i> : Erro absoluto (%) versus Estabilidade do <i>Link</i>	61

Lista de Tabelas

2.1	Características do padrão IEEE 802.15.4.	10
2.2	Modelo OSI e os protocolos WirelessHART e ISA 100.11a.	11
2.3	Requisitos para implantação da tecnologia <i>wireless</i> no campo.	14
3.1	Trabalhos que definem o termo Estabilidade de <i>Links</i> e os parâmetros utilizados.	22
5.1	Mapeamento Modbus do <i>Gateway</i>	48
5.2	Serviços GSAP descritos na norma ISA 100.11a.	49
5.3	Campos do comando GSAP: <i>Neighbor_Health request</i>	49
5.4	Mapeamento Modbus do controlador na comunicação com o ScadaBR.	51
5.5	Resumo dos dados dos testes.	58

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ASN	<i>Absolute Slot Number</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
GSAP	<i>Gateway Service Access Point</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ISA	<i>International Society of Automation</i>
IWSN	<i>Industrial Wireless Sensor Network</i>
MME	<i>Média Móvel Exponencial</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PDR	<i>Packet Delivery Ratio</i>
PDRi	<i>Instant Package Delivery Rate</i>
PID	<i>Proporcional Integrativo Derivativo</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RSS	<i>Received Signal Strength</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
VANET	<i>Vehicular ad-hoc networks</i>
WNSC	<i>Wireless Networked Control System</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Networks</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
WVSN	<i>Wireless Vehicular Sensor Networking</i>

Capítulo 1

Introdução

As tecnologias de comunicação estão presentes em todos os níveis dos sistemas de automação, desde o chão de fábrica até o nível de estações de supervisão. Padrões e protocolos de comunicação com diferentes características foram desenvolvidos para suprir necessidade de comunicação em diversos setores das unidades fabris. As redes de comunicação entre os elementos de campo, sensores e atuadores, conhecidas como redes de campo (*fieldbus*), são predominantemente implementadas com tecnologia cabeada. Contudo, existem aplicações que usam diversas tecnologias sem fio dentro do sistema industrial, como telemetria via rádio para comunicação com unidades remotas.

No entanto, nos últimos anos, vem se intensificando o uso de tecnologias sem fio (*wireless*) no chão-de-fábrica, ou melhor, na comunicação entre sensores, indicadores, atuadores e controladores de processos industriais. Os equipamentos que constituem os sistemas de controle e monitoramento, como sensores e atuadores, estão sendo desenvolvidos com a capacidade de comunicação sem fio em um ambiente que, devido ao alto nível de interferências, torna-se desfavorável a implantação de redes sem fio baseadas em protocolos convencionais.

Deste modo, desde 2010 surgem protocolos, em sua maioria, baseados no padrão IEEE 802.15.4, para incorporação da tecnologia sem fio no chão de fábrica. Tais protocolos, como IEC 62591 (WirelessHART), IEC 62734 (ISA 100.11a) e IEC 62601 (WIA-PA), têm conquistado aos poucos a confiança do mercado, à medida que garante alta estabilidade da rede, baixa latência nas transmissões e baixo consumo de energia. Nesse contexto, é essencial o desenvolvimento de ferramentas de análise e diagnóstico que auxiliem os fabricantes, projetistas e usuários das redes (IEC 2012, IEC 2010).

Os *links* de comunicação entre dois nós da rede, mesmo quando esses estão fixados em locais estabelecidos na etapa de projeto, podem apresentar variações do nível de sinal que resultam em falhas nos sistemas de monitoramento e, principalmente, de controle dos processos industriais. Essas variações nos níveis dos sinais transmitidos em um *link* nem sempre acarretam uma perda de pacotes. Entretanto, muitos trabalhos utilizam a taxa de entrega de pacotes do *link* como uma métrica suficiente para indicação de desempenho dos *links* da rede (Sha et al. 2015, Sha et al. 2017). Diante disso, a taxa de entrega de pacotes deve ser considerada na avaliação do *link*. Contudo, uma alta taxa de entrega de pacotes por si só não é suficiente para garantir a confiabilidade do *link*.

Existem estudos que quantificam a estabilidade temporal através da variação do *link* de

comunicação com base na variação do ganho do canal e, conseqüentemente, da potência do sinal recebido (Zhang et al. 2008). Zhang et al. (2012) é um dos autores que propõe o uso da variação da potência do sinal recebido para análise do desempenho.

Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de um modelo que reflita o real comportamento dos *links*, considerando tanto a variação do sinal *wireless* recebido quanto a taxa de pacotes entregues.

1.1 Justificativa

Os *links* em uma rede de comunicação são os meios de transmissão por onde os dispositivos trafegam os dados. Em alguns casos, o dado precisa trafegar por vários *links* para chegar ao dispositivo de destino. Esse conjunto de *links* por onde um pacote trafega para enviar uma informação do dispositivo origem até o dispositivo destino é chamado de caminho (*path*). Uma rede de comunicação pode ser vista como um conjunto de caminhos. Logo, garantir um funcionamento correto da rede é garantir o funcionamento correto dos caminhos, conseqüentemente, dos *links*. Ainda mais quando os *links* estão sujeitos a interferências ruidosas.

A estabilidade é uma propriedade dos sistemas. Apesar disso, algumas métricas são formuladas para avaliar a estabilidade dos *links* em redes sem fio. O resultado da avaliação da estabilidade influencia, de forma direta ou indireta, nos principais requisitos para implantação de redes de sensores sem fio (*Wireless Sensor Network* – WSN) no ambiente industrial, que são: confiabilidade, disponibilidade e consumo de energia. Neste último, a influência é direta, o consumo pode ser reduzido quando um caminho apresenta alta estabilidade, ou seja, a garantia de que um caminho é estável evita o uso de caminhos redundantes ou retransmissão de pacotes, tarefas que consomem mais energia. Enquanto que, para confiabilidade, que é a garantia do funcionamento da rede conforme desejável, e a disponibilidade, que é o funcionamento do sistema a qualquer momento, são métricas influenciadas diretamente pela estabilidade dos *links* da rede.

Um alto nível de estabilidade é uma restrição para vários ramos das redes industriais sem fio, como:

- Roteamento e escalonamento de pacotes.
- Alocação de instrumentos.
- Consumo de energia.
- Redundância na rede.

Os modelos de avaliação da estabilidade dos *links* que utilizam a potência do sinal recebido trazem vantagens também para a etapa projeto, especificamente na alocação de instrumentos em campo. Visto que os métodos tradicionais de determinação da localização dos instrumentos de campo, incluindo dispositivos roteadores ou não roteadores, na etapa de estudo do local, ou *Site Survey*, utilizam a intensidade do sinal recebido (*Received Signal Strength* – RSS) como variável primordial (Wu et al. 2012).

Embora a etapa de estudo do local (*site survey*) seja demorada, trabalhosa e facilmente afetada pela dinâmica ambiental, é inevitável para as abordagens baseadas na correspondência de impressões digitais do RSS, já que o banco de dados de localizações iniciais

do ambiente é construído com base na coleção valores de RSS do local (Wu et al. 2012). Com isso, a construção de modelos de estabilidade dos *links* que possam ser utilizados na etapa de estudo do local é essencial para o projeto da infraestrutura do sistema.

1.2 Objetivos

Diante dessa contextualização, visando suprir a lacuna por uma métrica que avalie o desempenho dos *links*, esta tese tem como objetivo geral propor um modelo analítico para gerar uma métrica de avaliação da estabilidade de *links* de redes de sensores sem fio industriais (*Industrial Wireless Sensor Network – IWSN*). Para isso é proposto um modelo baseado na variação dos níveis de potência dos sinais (RSS) e na taxa de entrega de pacotes (*Packet Delivery Ratio – PDR*).

Com o intuito de aplicar o modelo desenvolvido, um sistema de controle de nível em rede é implementado para validar a métrica de estabilidade de *link*. O desenvolvimento da tese pode ser visualizado em duas fases, conforme mostra a Figura 1.1.

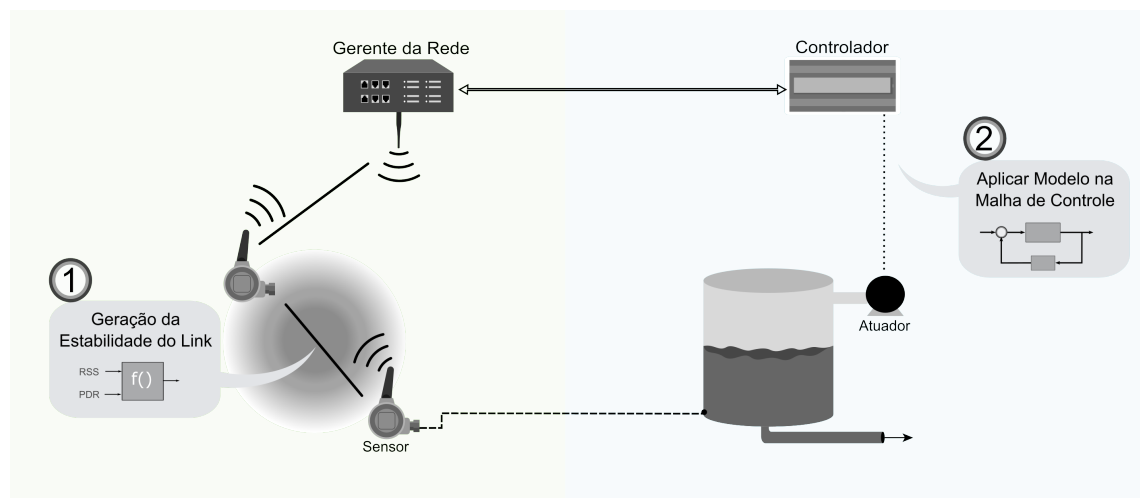


Figura 1.1: Etapas de desenvolvimento deste trabalho.

A primeira fase é a modelagem da estabilidade dos *links* de comunicação e a segunda fase é a implantação de um sistema de controle em rede sem fio para validar o modelo.

Os objetivos específicos são:

- Modelar a métrica de avaliação da estabilidade de *links*.
- Implementar um sistema de controle de nível em redes sem fio industriais baseado no modelo de estabilidade dos *links*.
- Avaliar o comportamento do sistema de controle com o intuito de avaliar o modelo de estabilidade dos *links* proposto nesta tese.

1.3 Organização

Este capítulo apresenta uma contextualização do tema, a justificativa e os objetivos desta tese. Os outros capítulos deste documento estão descritos a seguir.

- Capítulo 2 apresenta os conceitos, as técnicas e as aplicações das redes industriais, além das redes sem fio. A seção de redes sem fio contém apenas conceitos que estão relacionados com o problema da estabilidade da rede. Logo, características do enlace físico, arquitetura e interligação dos elementos da rede, técnicas de diversidade, de acesso ao meio, e de roteamento e escalonamento foram explanadas.
- Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica da temática de estabilidade de *links*. Após a análise dos trabalhos, a estabilidade é conceituada.
- Capítulo 4 descreve todas as etapas do modelo analítico de estabilidade de *links* desenvolvido nesta tese. Os resultados da análise do modelo desenvolvido são apresentados em três cenários diferentes. Por fim, é realizada uma discussão sobre os resultados do modelo.
- Capítulo 5 apresenta a implementação de um sistema de controle em rede ISA 100.11a baseado na estabilidade dos *links* a fim de validar o modelo desenvolvido. Todos os módulos do sistema são descritos no capítulo, como também os resultados da implantação do modelo no sistema.
- Por fim, o capítulo 6 descreve as principais conclusões obtidas a partir do desenvolvimento desta tese.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

As redes industriais, nos dias de hoje, fazem parte do esqueleto dos sistemas de automação. Elas permitem a comunicação de todos os equipamentos do sistema, incluindo sensores, atuadores, controladores, as estações de coleta, controle e supervisão dos dados dos processos, e, até mesmo, as estações de gestão da produção. Por exemplo, em uma indústria de refino de petróleo, é imprescindível que o gerente de processo consiga visualizar os dados, claro que de forma indireta, fornecidos pelos sensores de vazão que mensuram a quantidade de gasolina produzida.

Neste capítulo serão apresentados todos os conceitos e técnicas necessárias para entender o funcionamento das redes industriais e, principalmente, das redes industriais sem fio.

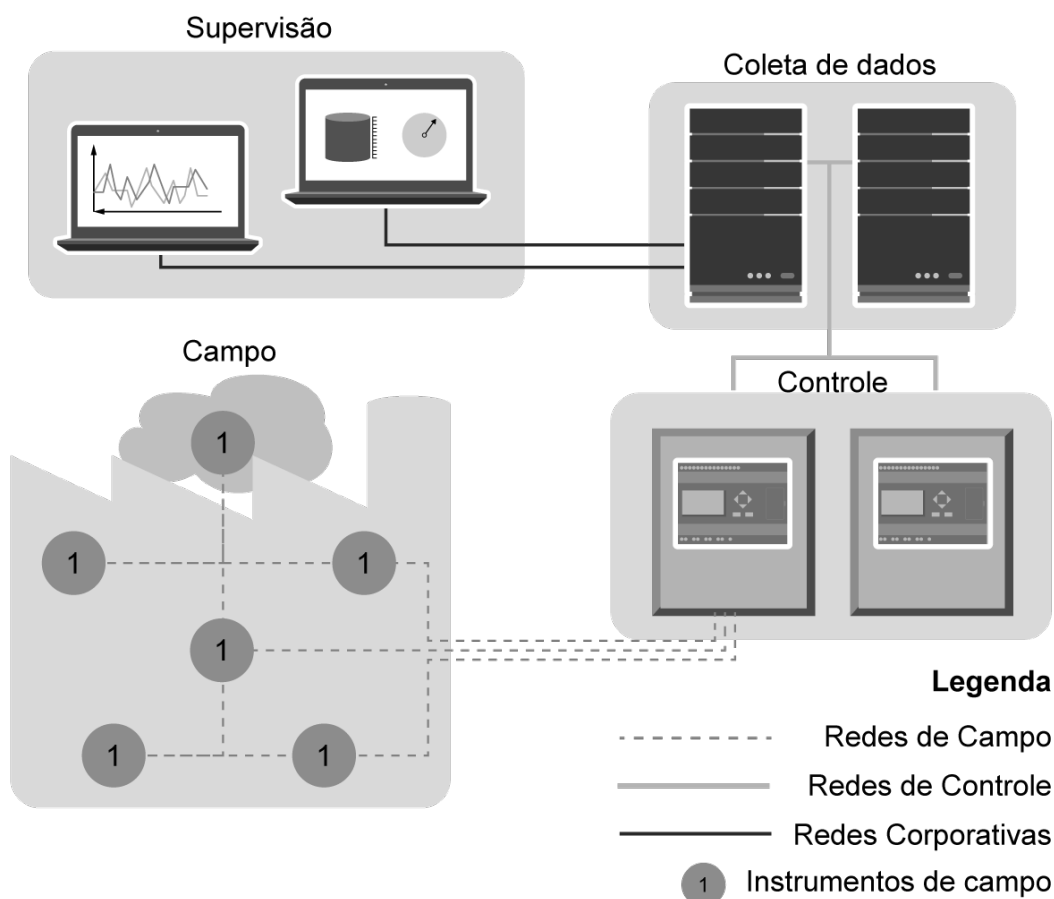
2.1 Redes Industriais

Dentro da pirâmide de automação, que engloba todos os equipamentos e sistemas envolvidos para automatizar os processos, existem diferentes tipos de redes de comunicação, conforme mostra a Figura 2.1. Os protocolos vão desde as redes de campo (redes *fieldbus*), que conectam os elementos do chão de fábrica, como sensores, condicionadores e atuadores, aos controladores, até protocolos de redes de computadores convencionais para comunicação de servidores, que armazenam os dados oriundos dos controladores, com estações de supervisão e gestão da planta.

Esses protocolos de redes de campo, que proporcionam o controle e monitoramento dos processos industriais, definem regras e técnicas para redução da perda de pacotes em um ambiente sob condições que comprometem a transmissão, como também o cabeamento estruturado. Tais condições podem ser: a existência de máquinas de indução, que geram ruídos eletromagnéticos, de máquinas rotativas, que geram vibrações, e clima adverso com variações de temperatura e umidade. Contudo, as tecnologias de comunicação cabeada já estão consolidadas na indústria desde a década de 1990.

Protocolos como *HART*, *FOUNDATION Fieldbus*, *Profibus PA*, *Profibus DP*, *Modbus*, *IOLink*, entre outros, já estão difundidos no mercado com alto índice de aceitação. Na abordagem de protocolo aberto, o Modbus é o mais popular diante sua facilidade e vasta aplicabilidade em diversos níveis.

Figura 2.1: Integração dos elementos que formam um sistema de automação industrial.



2.1.1 Protocolo Modbus

O protocolo era proprietário, pois foi criado pela MODCON (atual *Schneider*), uma empresa de automação, para utilizá-lo em seus próprios equipamentos. Apesar de ser um protocolo proprietário a *Schneider* difundiu esse protocolo entre os outros fabricantes, o tornando aberto.

É um protocolo de comunicação da camada de aplicação (Camada 7 do modelo OSI – *Open System Interconnection*). Ou seja, não define o padrão de envio dos sinais, define apenas algumas formas de padrões para camada física. O protocolo define a estrutura de mensagem que os controladores irão reconhecer e utilizar independentemente do tipo de barramento sobre o qual eles se comunicam (Modbus 2012).

O modelo original funcionava com o barramento RS-232 para conexão ponto-a-ponto. Contudo, foi adaptado para trafegar pacotes sobre o padrão RS-485 para ganhar maior velocidade, alcançar maiores distâncias e possibilitar conexão de vários dispositivos. A partir da possibilidade de comunicação Modbus na pilha TCP/IP foi possível incluir mensagens em estruturas de quadros Ethernet 802.3 (Modbus 2012).

O modelo de comunicação mestre e escravo é utilizado neste protocolo. A especificação descreve os campos do quadro da mensagem de requisição do mestre e da mensagem de resposta do escravo. Abaixo seguem os principais campos.

- Endereço do escravo.
- Código da função.
- Dados.
- Código de checagem de erro.

Existem quatro tipos de dados para trafegar em barramentos Modbus: entradas digitais (*discrete inputs*), bobina ou saídas digitais (*coils*), registradores de entrada ou entradas analógicas (*input registers*) e registradores de retenção (*holding registers*). A tabela de funções Modbus, que engloba leituras e escritas dos quatro tipos de dados, é apresentada na Figura 2.2.

Figura 2.2: Tabela das funções do protocolo Modbus.

Fonte: Modbus (2012).

				Function Codes		(hex)	Section
				code	Sub code		
Data Access	Bit access	Physical Discrete Inputs	Read Discrete Inputs	02		02	6.2
		Internal Bits Or Physical coils	Read Coils	01		01	6.1
			Write Single Coil	05		05	6.5
			Write Multiple Coils	15		0F	6.11
	16 bits access	Physical Input Registers	Read Input Register	04		04	6.4
		Internal Registers Or Physical Output Registers	Read Holding Registers	03		03	6.3
			Write Single Register	06		06	6.6
			Write Multiple Registers	16		10	6.12
			Read/Write Multiple Registers	23		17	6.17
			Mask Write Register	22		16	6.16
			Read FIFO queue	24		18	6.18
	File record access	Read File record		20		14	6.14
		Write File record		21		15	6.15
	Diagnostics	Read Exception status		07		07	6.7
		Diagnostic		08	00-18,20	08	6.8
		Get Com event counter		11		0B	6.9
		Get Com Event Log		12		0C	6.10
		Report Server ID		17		11	6.13
		Read device Identification		43	14	2B	6.21
	Other	Encapsulated Interface Transport		43	13,14	2B	6.19
		CANopen General Reference		43	13	2B	6.20

Os fabricantes devem implementar pelo menos os comandos de requisição e resposta para pelo menos uma das funções apresentadas na Tabela 2.2. Contudo, nem todas as funções são implementadas pelos fabricantes. É necessário analisar o manual dos equipamentos para verificar quais os comandos disponíveis.

Neste trabalho de tese, o protocolo Modbus é utilizado no sistema de controle para validação do modelo. A aplicação de aquisição de dados e supervisão estabelece uma

comunicação com o controlador do sistema via Modbus. Como os dados que serão monitorados são todos do tipo "*Holding Registers*", as únicas funções utilizadas são os códigos 03 (leitura) e 06 (escrita).

Mesmo sendo um protocolo popular, o Modbus não é utilizado para conexão de elementos de medição e atuação no campo. Conforme citado anteriormente, os protocolos *HART*, *FOUNDATION Fieldbus* e *Profibus PA* são os mais utilizados no chão de fábrica.

No entanto, devido à necessidade de incorporar pontos de medição inacessíveis para o operador, aumentar o nível de flexibilidade e reconfiguração da planta, entre outros benefícios da tecnologia, surgiram os protocolos de comunicação sem fio.

2.2 Redes Industriais Sem Fio

No ramo das redes que comunicam estações de controle e supervisão, como controladores, IHM (Interface Homem-Máquina) e sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), engenheiros e pesquisadores têm direcionados esforços para a inclusão de equipamentos baseados no protocolo Ethernet, norma IEEE 802.3, ou protocolo WiFi (*Wireless Fidelity*), norma 802.11.

Contudo, a evolução da comunicação nos sistemas industriais também depende das redes de campo. A inclusão da comunicação sem fio (*wireless*) no nível de campo é, atualmente, o grande obstáculo na evolução desses sistemas. A flexibilidade e, principalmente, a implantação de sensoriamento em locais inacessíveis à rede cabeada são os principais motivos para a inclusão das redes *wireless* no nível de campo dos sistemas de automação industrial. A seguir são listadas algumas aplicações que apresentam vantagens na utilização da tecnologia *wireless* em comparação com a comunicação cabeada.

- Monitoração de máquinas rotativas.
- Monitoração de válvulas de alívio e válvulas de bloqueio.
- Monitoração de trocadores de calor, tanques e fornos rotativos.

A eliminação do cabeamento e materiais atrelados, como caixas de junção, conectores e repetidores de sinais, facilita a instalação e reconfiguração da planta e torna-se essencial em ambientes agressivos onde existem produtos químicos, vibrações ou partes móveis que podem danificar qualquer tipo de cabeamento (Willig et al. 2005). E, apesar dos protocolos existentes para *wireless* no campo estabelecerem em suas normas o suporte ao controle e monitoração das variáveis dos processos, ainda existe uma resistência na utilização da tecnologia em malhas de controle de processos. Além disso, outros fatores como flexibilidade e diagnóstico beneficiam a implantação dessas ainda, como:

- Configuração e parametrização dos instrumentos através de dispositivos portáteis (*handheld*).
- Facilidade na alteração do local de medição ou atuação.
- Facilidade na substituição do equipamento.

Não é somente o cabeamento, existem caixas de junção, blocos de distribuição e eletrodutos são necessários para a construção da infraestrutura das redes cabeadas. Além

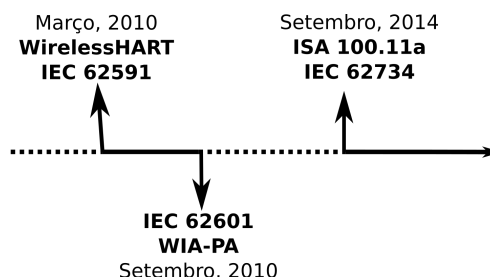
de instalação, o envelhecimento, a falha e a danificação dos cabos implica nos gastos de serviços de inspeção, teste e diagnósticos de problemas.

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.

Mesmo com o desenvolvimento de dispositivos com baixa consumo de energia, o consumo de energia ainda é um obstáculo a ser superado quando pensa no ambiente industrial. Muitos sensores e atuadores podem estar alocados em unidades de acesso inviável para uma troca de bateria por parte dos operadores. Assim, a troca de bateria constante pode inviabilizar a implantação, tanto financeiramente quanto operacionalmente.

Para assegurar essa incorporação de tecnologia, conforme mostrado na Figura 2.3, desde 2010 surgem novos protocolos para implantação de transmissores com tecnologia *wireless* nos níveis de monitoramento e controle de processos industriais. Os protocolos IEC 62591 (WirelessHART), IEC 62734 (ISA 100.11a) e IEC 62601 (*Wireless Networks for Industrial Automation-Process* - WIA-PA) são exemplos de tecnologias que surgiram para implementar a comunicação *wireless* no chão de fábrica. A Figura 2.3 apresenta uma linha do tempo da publicação das normas.

Figura 2.3: Linha do tempo da publicação das normas.



O estudo realizado neste trabalho tem um enfoque nos protocolos ISA 100.11a e WirelessHART devido aos equipamentos disponíveis para coleta de dados.

2.2.1 Enlace físico: Padrão IEEE 802.15.4

Destinado ao fornecimento de aplicações com requisitos de latência e baixa taxa de transferência em redes sem fio de área pessoal (*Wireless Personal Area Networks* - WPAN), o padrão de comunicação sem fio de curto alcance IEEE 802.15.4 é utilizado pela maioria dos protocolos de comunicação *wireless* no chão de fábrica. Esse padrão define regras para a camada física e a camada de enlace conforme mostra a Tabela 2.1.

A camada física descrita no padrão IEEE 802.15.4 com faixa de operação 2.4 GHz é adotada pelos protocolos das redes *fieldbus* sem fio. Contudo, uma vez que o esquema definido pelo padrão na camada de controle de acesso (*Media Access Control* – MAC)

Tabela 2.1: Características do padrão IEEE 802.15.4.

Padrão IEEE 802.15.4		
Camada física	Faixa 868 MHz	Faixa: 868.0 a 868.6 MHz. Modulação BPSK. Canal 0. Largura de banda: 0.6 MHz. Taxa de transmissão: 20 kbit/s.
	Faixa 915 MHz	Faixa: 902 a 928 MHz. Modulação BPSK. Canais 1, 2, ... , 9, 10. Largura de banda: 0.6 MHz. Taxa de transmissão: 40 kbit/s.
	Faixa 2.4 GHz	Faixa: 2400 a 2483.5 MHz Modulação O-QPSK. Canais 11, 12, ... , 25, 26. Largura de banda: 2 MHz. Taxa de transmissão: 250 kbit/s.
Camada de enlace	Espalhamento espectral de sequência direta (DSSS)	
	Acesso múltiplo com detecção de portadora e prevenção de colisão (CSMA/CA)	
	Geração de quadros de reconhecimento (ACK)	

apresenta algumas deficiências de confiabilidade e tempo real para aplicações industriais, WirelessHART e ISA 100.11a, que são especificamente projetados para aplicação de automação de processos, usam a camada MAC com adição de novas técnicas (Wang & Jiang 2016).

Como a banda de frequência de 2.4 GHz é definida no conjunto de bandas para serviços industriais, científicos e médicos (*Industrial Scientific and Medical – ISM*), o uso de rádios 2.4 GHz dispensa a obtenção de autorização por parte da agência reguladora de telecomunicações. Assim, é possível a existência de vários enlaces de comunicação na mesma faixa de frequência. Por exemplo, observa-se na Figura 2.4 que existe uma sobreposição de canais do 802.15.4 com o padrão IEEE 802.11.

Além das interferências de sinais de outros padrões físicos, a rede também pode ser afetada por interferências de redes do mesmo padrão de camada física. Nesse contexto, os protocolos definem várias técnicas de acesso ao meio, diversidade, redundância, roteamento e escalonamento distribuídas nas diversas camadas do protocolo. A Tabela 2.2 apresenta os padrões e as técnicas adotadas nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a fracionados pelas camadas de funções.

Percebe-se que os protocolos apresentam algumas semelhanças nas camadas física e de enlace. A existência das diferenças é o que garante o nicho de aplicação de cada protocolo. Por exemplo, o protocolo WirelessHART define uma camada de aplicação baseada orientada a comandos HART para facilitar a integração de redes cabeadas do protocolo HART. Assim como, o protocolo ISA 100.11a suporta a integração com outras redes ca-

Figura 2.4: Sobreposição de canais 2.4 GHz 802.15.4 e 802.11.

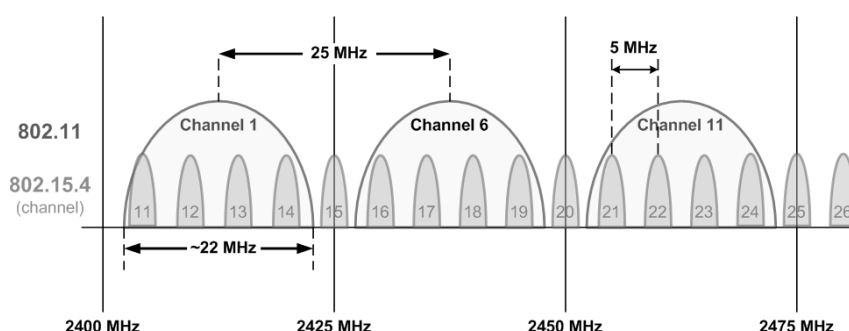


Tabela 2.2: Modelo OSI e os protocolos WirelessHART e ISA 100.11a.

Modelo OSI	WirelessHART	ISA 100.11a
Camada de aplicação	Comando orientado; protocolo HART.	Comando orientado a objeto; tunelamento.
Camada de rede	Roteamento por grafo, pela origem e por <i>super-frame</i> .	Fragmentação e roteamento a nível de roteadores <i>backbones</i> .
Camada de enlace	TDMA/CSMA; saltos de frequência; comunicação por <i>slots</i> de 10 ms.	TDMA/CSMA; saltos de frequência; comunicação por <i>slots</i> 10-12 ms; roteamento por grafo, pela origem e por <i>superframe</i> .
Camada física	IEEE 802.15.4 - 2.4 GHz	IEEE 802.15.4 - 2.4 GHz.

beadas, como Profibus, Foundation Fieldbus e HART, através da técnicas de tunelamento.

Além das semelhanças na camada física, WirelessHART e ISA 100.11a também apresentam semelhanças na definição dos elementos que formam a arquitetura da rede.

2.2.2 Arquiteturas das Redes

Diferentemente de alguns protocolos *fieldbus*, onde os instrumentos de campo podem trocar informações sem necessariamente passar a informação por um elemento central, nos protocolos WirelessHART e ISA 100.11a existe um elemento central que recebe e envia as informações. Esse elemento é o gerenciador da rede. Dentro de uma comunicação fim-a-fim, pelo menos, um dos elementos é o gerenciador, seja recebendo o pacote de um elemento de medição ou enviando o pacote para um elemento de atuação.

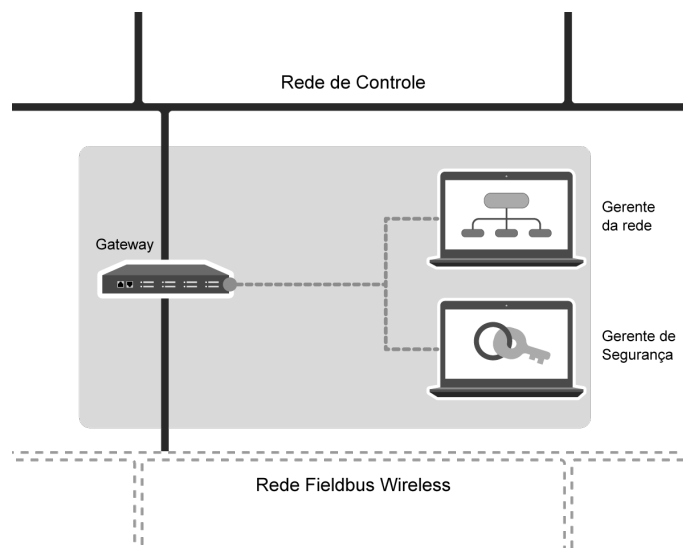
De acordo com as normas IEC (2010) e IEC (2012), são atribuições do gerenciador da rede:

- Gerenciar as configurações dos dispositivos e dos enlaces (*links*) de comunicações da rede.
- Gerenciar as tabelas de *links* e tabelas de vizinhos.

- Planejar as comunicações entre os dispositivos, definindo os caminhos de comunicação.
- Monitorar os relatórios de desempenho da rede, dos dispositivos e dos enlaces de comunicação.

Contudo, o gerente da rede não é responsável por autorizar a junção de um novo dispositivo a rede. A tarefa de gerenciar as chaves de segurança, como autenticar, gerar e armazenar, é responsabilidade do gerenciador de segurança. Fisicamente, os dois gerentes são partes lógicas integrantes do elemento *gateway*.

Figura 2.5: *Gateway*, gerenciador da rede e gerenciador de segurança.

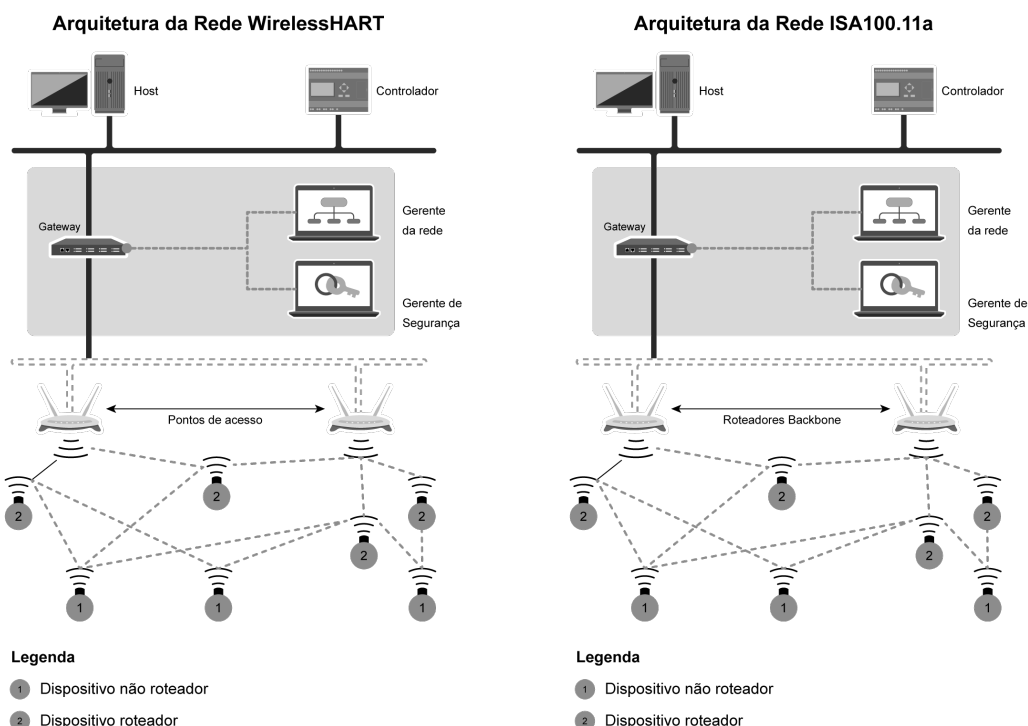


Conforme visto na Figura 2.5, o *gateway* fornece uma interface entre a rede de campo *wireless* e a rede de controle, que conecta os diversos controladores às estações de dados e supervisão. Os instrumentos de campo da rede *wireless* comunicam com o *gateway*, consequentemente com os gerenciadores, através de um ou mais pontos de acesso. Diferentemente do protocolo WirelessHART, que usa o termo ponto de acesso, o protocolo ISA 100.11a define o roteador *backbone* para o elemento que contém o rádio que forma os enlaces com os instrumentos.

Observa-se nas Figuras 2.6 que um instrumento de campo pode comunicar com um ou mais pontos de acesso ou roteadores *backbone*. A conexão com mais de um ponto de acesso aumenta a redundância do sistema. De acordo com (Wang & Jiang 2016), múltiplos pontos de acesso em WirelessHART e roteadores *backbone* em ISA 100.11a apresentam benefícios semelhantes, incluindo a redução do congestionamento de tráfego de dados, redução da latência e aumento da confiabilidade da rede.

Por fim, existem os instrumentos de campo, que podem ser atuadores, porém, em sua maioria, são transmissores. Dado que as redes de campo são aplicadas em plantas industriais com quilômetros de área de monitoramento, foram definidos instrumentos roteadores para trafegar os pacotes daqueles instrumentos que não conseguem uma comunicação

Figura 2.6: Arquiteturas das redes WirelessHART e ISA 100.11a.

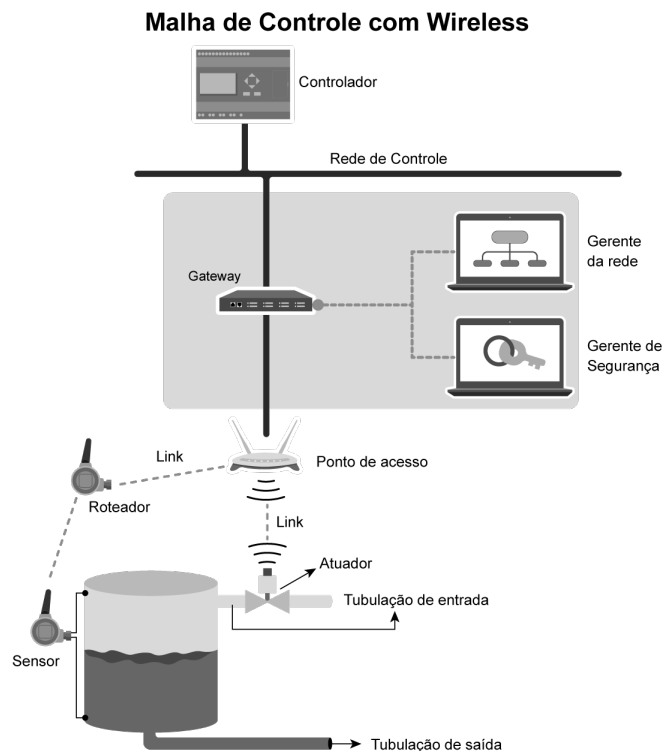


direta com o gerente. Esses instrumentos roteadores podem participar de uma comunicação fim-a-fim para rotear pacotes dos vizinhos ao mesmo tempo. Os pontos fortes da inclusão dos roteadores na rede são:

- Aumento da redundância, consequentemente, da disponibilidade devido aos caminhos alternativos gerados.
- Aumento da confiabilidade da rede devido a inclusão de roteadores em caminhos de comunicação com elevada taxa de perda de pacotes.

As arquiteturas das redes WirelessHART e ISA 100.11a foram desenvolvidas para proporcionar a instalação de instrumentos sem fio em malhas de controle. Contudo, na maioria dos casos, sistemas de controle de processos são mais críticos que sistemas de monitoração, com exceção dos sistemas de segurança. Em casos como controle de vazão de tubulações, o sistema deve garantir que, ao ocorrer uma alteração no valor medido, o controlador irá receber o dado no período pré-estabelecido e enviar o comando para o atuador com a mesma precisão. A Figura 2.7 apresenta um esquemático da malha de controle com instrumentos *wireless*.

O sistema deve garantir que a informação vai chegar no controlador mesmo considerando um nível de roteamento do pacote, conforme mostra a comunicação do sensor com o ponto de acesso na Figura 2.7. Aplicações desse tipo são realizadas por sistemas que contêm criticidade na resposta das tarefas, ou seja, sistemas de tempo real.

Figura 2.7: Malha de controle com equipamentos *wireless*.

Enfim, analisando essas peculiaridades de monitoração e controle de processos, a Tabela 2.3 mostra alguns requisitos essenciais para a implantação da tecnologia sem fio nos sistemas de automação.

Tabela 2.3: Requisitos para implantação da tecnologia *wireless* no campo.

Objetivos	Requisitos
Garantir que a informação vai chegar	Confiabilidade. Disponibilidade.
Garantir que a informação vai chegar no tempo pré-estabelecido	Características de tempo real.
Garantir que a informação vai chegar com baixo consumo de energia	Baixo consumo.
Garantir a expansão do sistema	Escalabilidade.

Esses requisitos são alcançados através da inserção de técnicas que modificam as características do sinal a ser transmitido, evitando colisão e interferências de sinais, que estabelecem o tráfego em caminhos de percursos diferentes adequado à estrutura da rede. Tais técnicas são apresentadas na próximas seções.

2.2.3 Técnicas de Diversidade e Acesso ao Meio

As adversidades encontradas nos enlaces de comunicação sem fio dificultam bastante a transmissão da informação. Com isso, utilizar técnicas de diversidade que permitem o dispositivo destino receber corretamente o pacote sob um canal com diferentes características torna o *link* de transmissão mais confiável. Essa técnicas diversificam o sinal de transmissão por meio da variação em frequência, no tempo ou espacial. Além disso, a diversificação do meio não garante a não colisão de pacotes no espectro. Para solucionar o problema de colisão, protocolos utilizam técnicas que inspecionam o meio antes de transmitir o pacote.

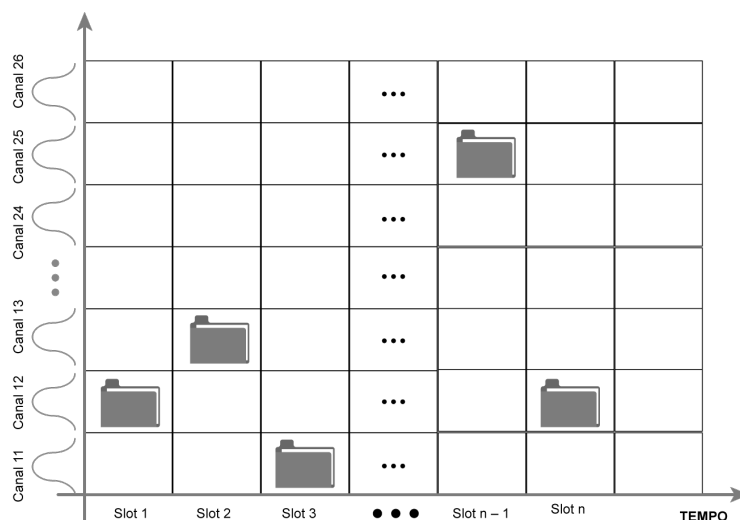
Ambos os protocolos, WirelessHART e ISA 100.11a, definem as seguintes técnicas:

- Diversidade em frequência: Salto de frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum* – FHSS).
- Diversidade no tempo: Acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access* – TDMA).
- Acesso múltiplo com detecção de portadora (*Carrier Sense Multiple Access* – CSMA).

No acesso múltiplo por divisão de tempo, cada transmissão tem um tempo máximo pré-determinado para ocorrer: o tempo do pedaço de transmissão (*slot*). A cada *slot* é realizada uma diferente transmissão, porém com diferentes características de transmissão. A união da técnica de salto de frequência com o TDMA permite que cada *slot* de transmissão ocorra em uma frequência diferente, evitando o uso ininterrupto de um canal com alto nível de ruído. A Figura 2.8 apresenta um esquemático do uso das técnicas TDMA e salto de frequência no decorrer de um período de funcionamento da rede.

Figura 2.8: Diagrama de transmissão: *slots* e frequências.

Técnicas de diversidade no tempo e na frequência na transmissão



Observa-se na Figura 2.8 que o salto de frequência ocorre apenas nas frequências definidas pelo padrão IEEE 802.15.4 na faixa 2.4 GHz: canais 11 a 26. Contudo, cada protocolo define seus modelos de saltos.

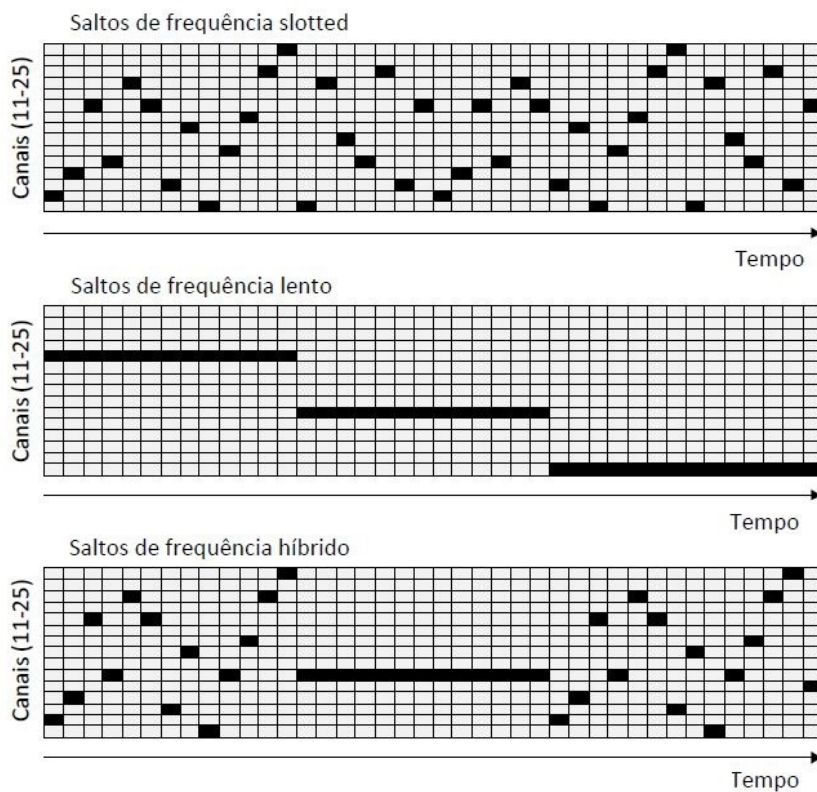
O protocolo WirelessHART só define um modo de salto de canal, onde o canal é escolhido de forma pseudoaleatório, isto é, utilizando uma fórmula matemática que depende do valor ASN (*Absolute Slot Number*) e do valor de *Offset* dos canais. O ASN é uma variável do sistema que é incrementada sempre que é criado um novo *slot* para transmissão de dados. O novo canal é definido pela equação 2.1.

$$\text{NovoCanal} = (\text{OffsetCanal} + \text{ASN}) \% \text{NumCanais}; \quad (2.1)$$

Por outro lado, o ISA 100.11a define três modos de saltos de frequência: *slotted*, lento e híbrido. A Figura 2.9 mostra esquemáticos de funcionamento desses três modos de saltos.

Figura 2.9: Modos de salto de frequência suportados pelo protocolo ISA 100.11a.

Fonte: da Silva (2013).



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 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 (100 ms a 400 ms). 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 (da Silva 2013).

De acordo com Wang & Jiang (2016), o salto de canal no WirelessHART apresenta um maior grau de aleatoriedade, enquanto que o ISA 100.11a possui melhor desempenho sob interferências de sistemas IEEE 802.11.

Mesmo com aleatoriedade dos canais, a falha de pacotes pode continuar ocorrendo quando um determinado canal de comunicação é fortemente ruidoso. Nesse sentido, os protocolos adotam a técnica de lista negra de canais. A definição dos canais que fazem parte da lista negra é baseada em dados estatísticos sobre as características do enlace de comunicação enviados ao gerenciador da rede. Assim, quando um canal é interditado pelo gerenciador, o canal fica indisponível para troca de informações.

Um diferencial do protocolo ISA 100.11a é o uso do mecanismo *adaptive hopping*, técnica semelhante a lista negra, porém com a diferença na decisão do envio do canal para a lista negra. Na técnica adaptativa 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.

O padrão WirelessHART suporta *slots* com tempo fixo de 10 ms, enquanto que o ISA 100.11a define a duração de um *slot* configurável de 10 a 12 ms.

Um *slot* representa um período de tempo em uma determinada frequência que será transmitido um pacote de um instrumento origem para o destino. Logo, um *slot* está sempre atrelado a dois instrumentos da rede. E, mesmo com o tempo fixo do *slot*, o pacote só é transmitido quando chega o momento correto. O gerenciador da rede, através dos algoritmos de roteamento e de escalonamento, é o elemento responsável por definir essas características do *slot* de transmissão.

2.2.4 Técnicas de Roteamento e Escalonamento

O algoritmo de roteamento consiste na seleção dos caminhos nos quais os dados são enviados em uma rede de comunicação. Com o intuito de definir rotas eficientes e otimizadas, o gerente da rede precisa de informações sobre a rede, sobre os requisitos de comunicação e sobre a capacidade dos elementos da rede, como vizinhança e níveis de potência dos sinais (Nobre 2015).

O gerente pode definir rotas principais e alternativas para gerar uma redundância no tráfego dos dados. Ambas as normas, IEC 62734 (ISA 100.11a) e IEC 62591 (WirelessHART), definem um parâmetro que identifica a rota principal ou primária e a rota alternativa, secundária ou redundante.

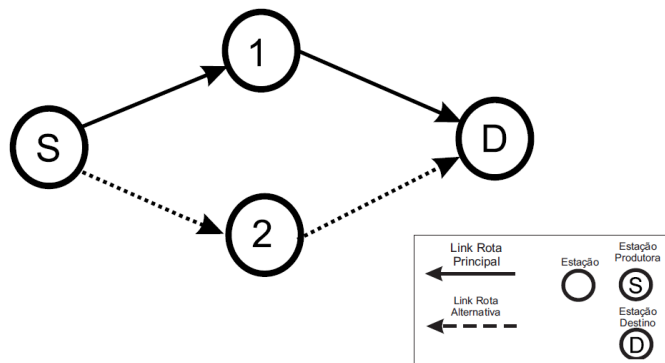
Abaixo segue a definição do parâmetro: fonte de sincronismo.

- **Norma ISA 100.11a – Clock Sources:** define o instrumento que irá ajustar o valor do relógio para sincronismo da comunicação. Podem ser designados como preferencial ou secundário.
- **Norma WirelessHART – Time Source Flag:** indica se o dispositivo deve ter sincronização de tempo com um determinado vizinho ou não.

Após a definição das possíveis rotas, o gerente deve configurar esse parâmetro para indicar as rotas preferenciais. A Figura 2.10 apresenta uma rede com a definição das rotas preferencial e alternativa do instrumento S (*Source*).

Figura 2.10: Rotas preferencial e alternativa.

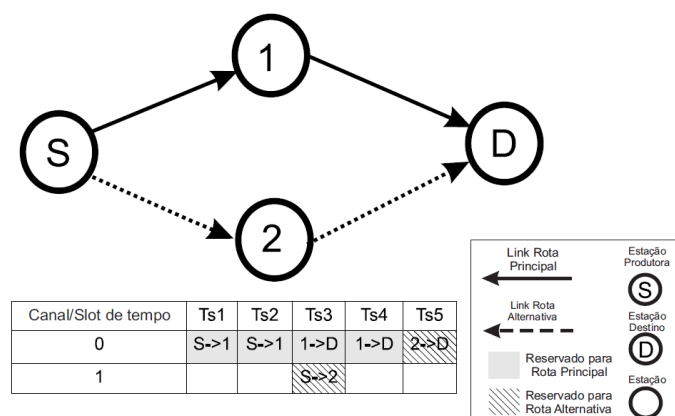
Fonte: Nobre (2015).



Com as rotas definidas, o gerenciador da rede deve definir quais dispositivos irão transmitir e em qual instante de tempo isso ocorrerá. Além disso, devido aos protocolos possibilitarem o uso de múltiplos canais, o gerenciador da rede também deve especificar o canal (frequência) a ser utilizado para cada transmissão (Nobre 2015). Esse processo de planejamento dos *slots* de transmissão, chamado de escalonamento, pode ser observado no quadro com *slots* e frequências mostrado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Informações do roteamento e escalonamento.

Fonte: Nobre (2015).



A Figura 2.11 mostra que um caminho de comunicação (*path*) pode conter mais de um *link*. Abaixo segue o conceito de *link*.

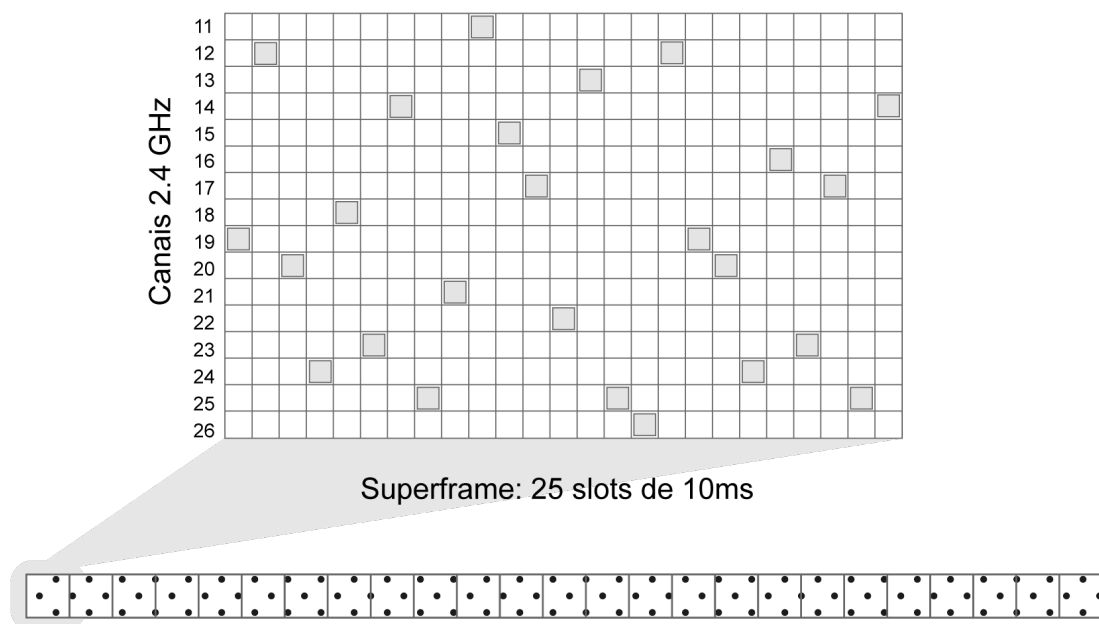
- **Link:** Enlace de comunicação entre dois instrumentos.

Os atributos de um *link*: identificador, instrumento origem, instrumento destino, tipo de transmissão, *slot* e canal.

O conjunto de *slots*, ordenados pelo algoritmo de escalonamento, é executado repetidamente no decorrer do funcionamento da rede. Essa estrutura formada por *slots* sequenciais é chamada de *superframe* e seu período varia de acordo com a demanda da rede, ou melhor, quantidade de *slots* e com o tamanho do *slot*. A Figura 2.12 apresenta uma sequência de *superframes*, de 250 ms, executando continuamente e uma visão ampliada da representação dos pacotes, variando no tempo e na frequência, na primeira execução do *superframe*.

Figura 2.12: *Slots* e *superframes*.

Fonte: Adaptada de IEC (2012).



Em geral, os *superframes* de período mais curto fornecem uma menor latência e *superframes* longos resultam no menor consumo de energia. A escolha do tamanho precisa cuidadosamente levar em conta também os requisitos de largura de banda (Wang & Jiang 2016). Os parâmetros de latência e consumo de energia são atributos a serem otimizados pelos algoritmos de roteamento.

Ambos os protocolos WirelessHART e ISA 100.11a definem abordagens similares para algoritmos de roteamento, que são: roteamento de origem, roteamento por grafo e roteamento por *superframe*. Abaixo segue uma breve descrição de cada abordagem.

- **Roteamento de origem:** a definição do trajeto é definido no próprio pacote, no momento da concepção do pacote. A principal vantagem é que os dispositivos intermediários (roteadores) não precisam manter informações de rota porque o caminho é explicitamente especificado no pacote.

- **Roteamento por grafo:** um grafo é um conjunto de caminhos que conectam nós da rede. Devido ao conhecimento de todas as informações da rede, o gerente da rede fica responsável por criar corretamente o trajeto dos pacotes em cada grafo. Cada instrumento tem sua tabela de grafos, representando as possíveis rotas.
- **Roteamento por *superframe*:** semelhante ao roteamento por grafo, cada pacote é transmitido seguindo um determinado *superframe*. Cada pacote deve conter o identificador do *superframe* que fará a transmissão e para cada instrumento roteador será selecionado o primeiro *link* que estiver dentro do *superframe* indicado no pacote para transmissão. Já que o pacote segue o *superframe*, não se faz necessário a configuração das arestas do grafo.

Um estudo realizado por Sha et al. (2015) mostra que o roteamento por grafo gera uma melhoria significativa em relação ao roteamento de origem em termos de confiabilidade de pior caso, porém fornece uma maior latência e maior consumo de energia.

Por fim, os algoritmos de roteamento e de escalonamento devem planejar o tráfego de dados de forma que, considerando a redução da latência e do consumo de energia, a taxa de perda de pacotes da rede seja a menor possível, ou melhor, a rede apresente uma alta estabilidade.

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos e características das redes industriais, tanto cabeadas quanto *wireless*. Nota-se que todas as características dos protocolos de redes de sensores sem fio industriais descritas, desde a arquitetura das redes até os algoritmos de roteamento, estão relacionadas com o desempenho dos *links*, ou melhor, com a estabilidade e a confiabilidade dos *links*. Os trabalhos relacionados com o conceito de estabilidade de *link* serão apresentados e discutidos no próximo capítulo.

Capítulo 3

Métrica de Desempenho: Estabilidade de *Link*

No contexto das redes industriais *wireless*, da Silva (2013) afirmou que a principal diferença entre a análise de confiabilidade de redes com e sem fio está relacionada com a instabilidade do meio de comunicação, que é mais susceptível a ruídos nas redes sem fio. Com tal contribuição, fica perceptível que a estabilidade dos caminhos de comunicação é um fator essencial na avaliação do funcionamento dos sistemas industriais com comunicação *wireless*.

Tanto WirelessHART como ISA 100.11a definem a topologia em malha (*mesh*) como uma possível configuração da rede, como mostrado nas Figuras 2.6. A maior vantagem dessa topologia é que todos os nós da rede podem se comunicar entre si, desde que a função de roteador esteja habilitada. Assim, se ocorrer desvanecimento em algum enlace de comunicação (*link*), novas rotas de comunicação serão rapidamente definidas. Para que a nova rota definida apresente um comportamento adequado é essencial analisar o nível de estabilidade dos *links* selecionados.

Neste capítulo serão apresentados os diferentes trabalhos que utilizam o termo Estabilidade de *Link*, sendo destacado as características de cada trabalho. Por fim, será apresentado a definição de estabilidade de *link* utilizada nesta tese.

3.1 Trabalhos Relacionados

A estabilidade não é uma métrica, mas sim uma propriedade dos sistemas. Assim, algumas pesquisas e estudos publicados nos anos de 2010 a 2018 foram avaliados com o intuito de identificar as metodologias utilizadas para avaliação da estabilidade de *links*. Existem vários parâmetros usados para avaliar a estabilidade do *link* de uma rede sem fio, como intensidade do sinal recebido, distância entre nós, energia residual do nó, tempo de expiração do *link*, tempo de disponibilidade do *link*, taxa de entrega de pacotes do nó, entre outros. Após uma análise dos trabalhos de acordo com o parâmetro utilizado para a definição de estabilidade, os trabalhos foram divididos em quatro grupos: distância entre nós, tempo de expiração do *link*, taxa de entrega de pacotes e intensidade do sinal recebido. A Tabela 3.1 apresenta os trabalhos selecionados e seus parâmetros utilizados para definição do conceito de estabilidade.

Tabela 3.1: Trabalhos que definem o termo Estabilidade de *Links* e os parâmetros utilizados.

Trabalhos	Distância entre nós	Tempo de expiração do <i>Link</i>	Taxa de pacotes entregues – PDR	Potência do Sinal Recebido – RSS	Redes de Sensores	Redes Móveis
Zou & Tao (2012)	✓	N	N	N	N	✓
Sun et al. (2010)	✓	N	N	N	N	✓
Boukerche et al. (2017)	✓	N	N	N	N	✓
De Rango et al. (2010)	✓	N	N	N	N	✓
Zhang et al. (2012)	✓	N	N	✓	N	✓
Sharma & Pathak (2015)	N	✓	N	N	N	✓
Idoudi et al. (2016)	N	✓	N	N	N	✓
Chama et al. (2013)	N	✓	N	N	N	✓
Al-Qudah et al. (2016)	N	✓	N	N	N	N
Wang et al. (2010)	N	✓	N	N	N	✓
Li & Yan (2017)	N	N	✓	✓	N	✓
Priya (2017)	N	N	✓	N	✓	N
Wenqing (2011)	N	N	N	✓	N	✓
Brahmbhatt et al. (2015)	N	N	N	✓	N	✓
Patil & Patil (2015)	N	N	N	✓	N	✓
✓: Aplica			N : Não aplica			

No entanto, é possível observar na Tabela 3.1 que poucos trabalhos foram desenvolvidos para redes de sensores sem fio. Em sua grande maioria, os trabalhos estão sendo aplicados nas redes móveis. Uma breve descrição das contribuições dessas pesquisas estão listados a seguir.

Zou & Tao (2012) considera a distância entre dois nós para definir a estabilidade do *link*. A variável NBS representa a estabilidade com valores entre 0 e 1. O valor zero indica que os dois nós estão a uma distância mínima. Enquanto que o valor 1 indica a distância máxima entre nós. A métrica de estabilidade foi avaliada em um esquema de roteamento que usou a variável para definir a rota mais estável.

A distância entre nós nas redes WVSN (*Wireless Vehicular Sensor Networking*) também é considerada em Sun et al. (2010) e Boukerche et al. (2017). Sun et al. (2010) definem dois parâmetros de estabilidade: estabilidade do *link* e estabilidade do caminho (*path*). Os autores relacionam a distância entre os nós e o alcance da antena do instrumento para calcular a métrica de estabilidade do *link*. A estabilidade do caminho usa o menor valor de estabilidade dos *links* que fazem parte do caminho. A validação do modelo foi realizada na simulação de um algoritmo de roteamento. Boukerche et al. (2017) também propôs o uso do conceito de distância entre nós para definir a estabilidade do *link*. No entanto, a estabilidade do *link* é usada para criar um novo protocolo de solicitação de conteúdo em redes veiculares (VANETs).

No trabalho de De Rango et al. (2010), além da estabilidade do *link*, as métricas de rendimento energético foram usadas para definir um algoritmo de roteamento usando o

problema de otimização multiobjetivo. Uma consideração importante desse trabalho é a definição formal do conceito de estabilidade apresenta a seguir.

- Um *link* entre dois nós i e j com faixa de transmissão R é estável no instante t quando a distância entre os dois nós é menor que R .
- Caso contrário, o *link* está danificado ou instável.

No entanto, os autores não consideraram que dentro da faixa de transmissão R o instrumento possa sofrer atenuação do ambiente, o que pode tornar o *link* instável.

Entre as pesquisas que usam o parâmetro distância para a estabilidade do *link*, Zhang et al. (2012) apresentou uma metodologia relevante para o modelo proposto nesta tese. Zhang et al. (2012) propõe uma nova métrica de avaliação de estabilidade baseada na mobilidade relativa de cada nó, amostrando a posição relativa. Para estimar as alterações de posição relativa que afetam o valor da avaliação da estabilidade do *link* do ponto de vista do nó de monitoramento, Zhang et al. (2012) definem que o nível de potência recebido (intensidade do sinal recebido) detectado no nó receptor (ou seja, nó de monitoramento), P_r , é indicativo da distância entre os pares de nós de transmissão e receptores. O valor da estabilidade do *link* é calculado por dois fatores de decisão: o valor da estabilidade do *link* direta, definido a partir de uma relação do modelo de propagação de espaço livre, e o valor da estabilidade do *link* indireta. A métrica de estabilidade foi usada em um algoritmo de roteamento e, através de cinco métricas de avaliação, os resultados apresentaram várias vantagens do esquema de roteamento proposto sobre outros protocolos de roteamento.

Nesta tese, é proposto um modelo para criar uma métrica de avaliação da estabilidade de *links* considerando a mesma relação do modelo de propagação usado no Zhang et al. (2012).

Outro parâmetro usado na definição de estabilidade do *link* é o tempo de duração do *link* na rede. Sharma & Pathak (2015), Idoudi et al. (2016) e Chama et al. (2013) utilizam diretamente o tempo de duração do *link* ou o tempo de expiração do *link* na métrica de estabilidade do *link*. Sharma & Pathak (2015) definem a duração do *link* como o período em que dois nós estão dentro do intervalo de transmissão um do outro.

Idoudi et al. (2016) definem a estabilidade do *link* em três níveis: baixo, médio e alto. A estabilidade é definida pelo valor médio dos valores máximos de duração de todos os *links* da rede. A partir da estabilidade do *link* é definida a estabilidade do caminho. Com o intuito de validar as métricas de estabilidade de *link* e de caminho (*path*), os autores utilizam a ferramenta Matlab para implementar um gerador dinâmico de posições e da mobilidade de 100 nós de uma rede móvel ad-hoc. Os resultados demonstram que a mobilidade dos nós e as posições iniciais afetam as estabilidades dos *links*.

Chama et al. (2013) utilizam o tempo de duração dos *links* para definir a estabilidade do *link* com duas variáveis: s_1 e s_2 . A validação das definições de estabilidade é realizada no software Network Simulator 2 (NS2). As duas variáveis de estabilidade são inseridas no algoritmo AODV (*Adhoc On-Demand Distance Vector*) para comparar o desempenho da rede com o AODV sem a métrica de estabilidade, o AODV com a primeira definição de estabilidade do *link* e o AODV com a segunda definição de estabilidade do *link*. Os resultados mostraram que a segunda definição de estabilidade do *link* auxilia o algoritmo AODV com mais robustez na seleção do roteamento.

Diferentemente dos trabalhos de Idoudi et al. (2016) e Chama et al. (2013), Al-Qudah et al. (2016) utilizam o conceito de duração do *link* para definir duas métricas de estabilidade: persistência e prevalência. Persistência analisa a quantidade de tempo que leva para que um caminho entre um par de origem e destino seja alterado. E a prevalência avalia com que frequência um certo caminho entre dois pontos finais é seguido. Esse estudo avalia a estabilidade e a diversidade dos caminhos da internet e o impacto do protocolo MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) nessas propriedades.

Contudo, os trabalhos que utilizam o tempo de duração do *link* na definição da estabilidade são bastante aplicados às redes móveis devido à alta mobilidade dos nós. Os modelos que utilizam o tempo de duração ou expiração do *link* não consideram a instabilidade durante o período que os *links* estão ativos na rede. A instabilidade dos *links* ativos em Redes de Sensores Sem Fio Industrial é frequente devido às diversas formas de interferências do sinal. Neste trabalho de tese, a estabilidade dos *links* ativos é avaliada a partir da variação da potência do sinal recebido.

A definição de estabilidade de *link* de Li & Yan (2017) consiste em três fatores: qualidade do *link*, grau de segurança e fator de predição da mobilidade. O fator de qualidade do *link* é calculado a partir da potência do sinal recebido, enquanto os outros fatores dependem da distância do *link*. Essa métrica de estabilidade é utilizada na criação de um algoritmo de roteamento aplicado às redes Ad-hoc. Os resultados apresentaram que o algoritmo proposto aumentou a taxa de entrega de pacotes comparando com o protocolo AODV.

No trabalho de Priya (2017), o parâmetro de qualidade do *link* também é utilizado para definir a estabilidade. O trabalho propõe um algoritmo de roteamento baseado na qualidade do *link* com o intuito de priorizar a dinâmica do *link* na construção da rota. O algoritmo constrói a rota baseado na confiabilidade do *link*, que considera a qualidade do *link* e uma média de pacotes retransmitidos na rede. A cada iteração do algoritmo a tabela de qualidade dos *links* é atualizada para definir o roteamento. Em comparação com outros protocolos de roteamento, o protocolo proposto obteve menor valor de atraso (*delay*), menor consumo de energia e maior taxa de entrega de pacotes.

Assim como Li & Yan (2017) e Priya (2017), os trabalhos Wenqing (2011) e Brahmabhatt et al. (2015) também definem o fator de qualidade de *link* a partir da potência do sinal recebido.

Em Patil & Patil (2015), é proposto um algoritmo de roteamento que utiliza a energia residual restante, a estabilidade do *link* e a capacidade da fila de pacotes para classificar as rotas de um nó. Patil & Patil (2015) utilizam dados recentes de RSS e o princípio da desigualdade de *Bienayme-Chebyshev* para calcular variância dos valores de RSS. A fim de validar o algoritmo, os autores simularam o algoritmo com o simulador NS-2 e realizaram comparações com outras versões do algoritmo de roteamento. O conceito de variância do RSS também será utilizado neste trabalho de tese.

Nesta tese, nós propomos um modelo analítico para definir uma métrica de avaliação da estabilidade dos *links* da rede a partir da variação do indicador de potência do sinal recebido. O método proposto utiliza a relação da potência do sinal recebido com a variação da atenuação similar ao trabalho Zhang et al. (2012). Além disso, a definição de estabilidade de *link* neste trabalho é calculado pela variância conforme o trabalho Patil & Patil

(2015). Contudo, o modelo proposto neste trabalho considera que a mobilidade de nós em redes móveis pode ser considerada como a variação da atenuação no sinal recebido devido aos diversos fatores das redes de sensores sem fio, que, diferentemente das redes móveis, apresentam baixo índice de mobilidade do campo industrial. Por fim, o modelo também leva em conta o parâmetro PDR para considerar a tendência de perda de pacotes.

Na próxima seção será apresentada com detalhes a definição de estabilidade de *link* deste trabalho.

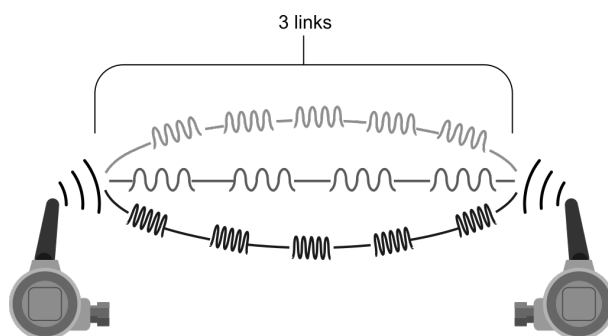
3.2 Métrica: Estabilidade do *Link*

A estabilidade da rede ou dos *links* é uma propriedade do sistema. Entretanto, essa propriedade influencia diretamente na confiabilidade do sistema e pode ser utilizada como um importante indicador de desempenho do sistema para os sistemas industriais com IWSN. Neste trabalho é definida uma métrica para a propriedade de estabilidade de *links*.

A estabilidade do *link* é essencial para avaliar o desempenho da rede. Em uma comunicação entre dois nós da rede existem diversos *links* que podem fazer parte das rotas primárias e secundárias. Nesses casos, o algoritmo de roteamento precisa saber informações dos *links* para então incluir nas rotas preferenciais ou não. Além dos algoritmos de roteamento, a estabilidade do *link* afeta também o consumo de energia do nó. Um nó com um *link* instável consome mais energia, seja devido à alta perda de pacote (retransmissão) ou à quebra do *link* quando a atenuação está elevada.

Entre dois nós da rede pode surgir mais de um *link*, com diferentes características de frequência, *offset*, entre outras. A Figura 3.1 ilustra a existência desses vários *links*. Como cada *link* contém características diferentes de um canal de transmissão, neste trabalho cada *link* terá um valor de estabilidade único.

Figura 3.1: *Links* com diferentes atributos.



Na seção 3.1 foram apresentados trabalhos que utilizavam diferentes métricas na definição de estabilidade, como a distância entre nós, tempo de expiração do *link*, taxa de entrega de pacotes e potência do sinal recebido. Nesses mesmos trabalhos, alguns autores fazem a definição formal do termo estabilidade do *link*, como apresentado a seguir.

De acordo com Gulati & Kumar (2014), "a estabilidade do *link* indica o quão estável é o *link* e por quanto tempo ele pode suportar as comunicações entre os dois nós". Enquanto que Brahmabhatt et al. (2015) afirma que "estabilidade de *link* significa que o *link* será

mantido por muito tempo e não será interrompido regularmente". Porém, existem muitos *links* que permanecem na rede com alta perda de pacotes. Então, o tempo de permanência de um *link* na rede, por si só, não pode caracterizar a estabilidade.

A definição de Sharma & Pathak (2015) engloba vários fatores importante para a propriedade de um *link* estável. Sharma & Pathak (2015) afirma que "a estabilidade do *link* é medida através comportamentos estáveis nas falhas dos *links*, na taxa de detecção de canal, na taxa de perda de pacotes e muitos outros fatores".

Em redes móveis, a variação da distância entre nós representa claramente uma instabilidade no *link*, pois essa variação causa uma variação na potência do sinal recebido (RSS). Contudo, em sua grande maioria, os nós em IWSN são fixados na etapa pesquisa inicial ("*Site Survey*") da planta industrial, consequentemente, apresenta distâncias fixas entres nós. Com isso, a distância entre nós não deve ser de alta relevância na definição da estabilidade dos *links* de redes de sensores sem fio industriais.

Mesmo com as posições fixadas, existe uma variação nos valores de RSS devido à variação na atenuação do *link*. Os fatores de degradação do sinal *wireless* causam uma variação no RSS, que representa um nível de instabilidade do *link*. Neste trabalho, a estabilidade do *link* é avaliada pela variação do indicador de potência do sinal recebido (RSSI) e a taxa de entrega de pacotes (PDR).

Assim, este trabalho define a estabilidade de *link* conforme a descrição a seguir.

- Quanto maior a variação da atenuação do sinal e menor a taxa de entrega de pacotes menor será a estabilidade do *link*.
- Um *link* estável não apresenta variação de atenuação do sinal e apresenta uma alta taxa de entrega de pacotes.

No próximo capítulo será apresentado o modelo analítico para gerar a métrica de estabilidade de acordo com as definições de *link* estável e instável formuladas.

Capítulo 4

Modelo Analítico de Estabilidade de *Link*

Neste capítulo será apresentado o modelo analítico proposto para avaliar a estabilidade de *links*. O modelo é baseado na potência do sinal recebido e na taxa de entrega de pacotes do *link*. Após a apresentação das etapas do modelo, serão apresentados os resultados de alguns testes para comprovar que a métrica identifica períodos de instabilidade nos *links* de comunicação.

4.1 Etapas do Modelo

Como mencionado no capítulo 3, a geração da estabilidade do *link* será baseada na variação da potência do sinal recebido. Diferente dos casos aplicados às redes móveis, a variação da potência do sinal em redes industriais indica uma variação da atenuação no *link*. Quanto maior a variação da atenuação, maior é a instabilidade do *link*. Contudo, para que seja calculado essa variação é necessário criar um fator que indique o quão degradado está o sinal. Esse fator será gerado a partir de amostras anteriores e do valor atual da potência do sinal.

A estabilidade do *link* será avaliada através de uma função linear proporcional à variação da atenuação do sinal do *link* e à razão de entrega de pacotes PDR dentro de um conjunto de amostras. Os principais pressupostos considerados no modelo são os seguintes:

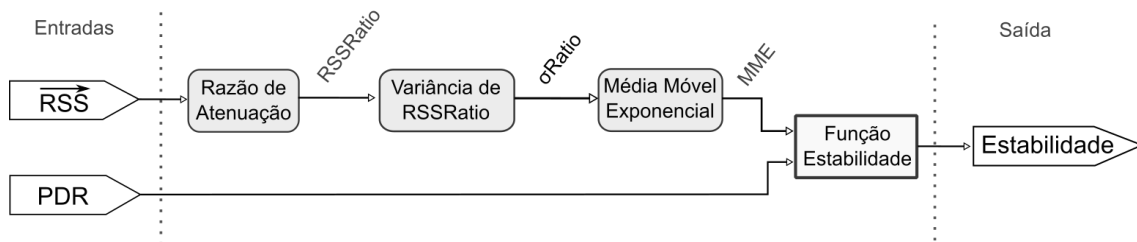
- **Network manager:** o gerente da rede é responsável pela aquisição contínua de todas as informações da rede. Principalmente, as informações dos *links* e dos nós da rede, como potência do sinal recebido, PDR e tabela dos *links* ativos na rede. A taxa de aquisição dos dados pelo gerente é variável.
- **Sample window:** o gerente é responsável por armazenar um conjunto de amostras contínuas. Esse conjunto forma uma janela de amostras de tamanho definido pelo usuário na implementação do modelo.
- **Link:** quando um dos nós for desconectado o *link* é desativado da rede. Nesse caso, todos os valores contidos na janela de amostras são removidos.

Os outros fatores da rede, como topologia, taxa de transmissão, redundância ou algoritmos de roteamento não são estabelecidos no modelo. A flexibilização desses parâmetros torna o modelo aplicável à diversas configurações de redes industriais sem fio.

A Figura 4.1 apresenta uma visão geral do modelo para obtenção da estabilidade de *link* proposta. O procedimento inicia pela coleta dos dados de PDR, em porcentagem, e RSS em milliwatts. Os valores de RSS formam o vetor da janela de amostras.

O próximo passo é a geração do fator de atenuação do sinal: *RSSRatio*. Esse fator indica a razão entre o valor atual de RSS e o melhor valor de RSS nas últimas amostras, ou melhor, no conjunto de amostras. Quanto menor o valor do fator *RSSRatio*, maior o valor da atenuação do *link* no instante atual. Como o objetivo é coletar a variação dessa razão de atenuação, a próxima etapa realiza o cálculo da variância do conjunto de dados gerado na etapa anterior e média móvel exponencial para filtrar valores que representam ruídos de curta duração. E, por fim, a última etapa do modelo define uma função para gerar a estabilidade do *link* a partir do valor da média móvel do conjunto de valores de variância da razão de atenuação e do PDR.

Figura 4.1: Modelo Analítico de Estabilidade de *Link*.



As etapas do modelo devem ser executadas para todos os *links* da rede e de forma cíclica, ou seja, a cada instante de execução do processador do gerente da rede será realizada uma nova execução do algoritmo do modelo. Como o gerente da rede é o elemento responsável pela coleta das informações de entrada do modelo, ele é responsável também pela execução do algoritmo do modelo. Além de possuir um maior processamento, o gerente é também responsável pelos algoritmos de roteamento e escalonamento, que podem ser otimizados com o uso do parâmetro da estabilidade dos *links*. As etapas mostradas na Figura 4.1 são detalhadas nas subseções seguintes.

4.1.1 Razão de Atenuação

A primeira etapa do modelo recebe um conjunto de amostras de RSS para gerar um fator que relaciona o sinal de RSS atual com os valores anteriores. O objetivo é relacionar o valor de potência atual com as atenuações dos sinais nas últimas amostras.

Com o intuito de relacionar a potência do sinal com a degradação sofrida pelo *link*, foi escolhido o modelo de propagação no espaço livre de Friis para caracterizar o ambiente industrial. Esse modelo é bastante aplicado aos sistemas com redes de sensores sem fio.

O modelo de Friis relaciona as potências transmitida e recebida com a atenuação do sinal no espaço, conforme apresenta a equação 4.1.

$$Pr = \frac{Pt}{Lp} \quad (4.1)$$

A variável Pt representa a potência do sinal transmitido, Pr a potência do sinal recebido e Lp a atenuação ou perda no espaço livre. Neste trabalho, os valores das potências dos sinais transmitido e recebido são representados, respectivamente, por RSS_t e RSS_r .

É possível a alteração da potência de transmissão dos instrumentos na maioria dos protocolos de redes sem fio industriais. No caso do protocolo WirelessHART, existe um comando específico da camada de aplicação que permite alterar o valor da potência de transmissão do rádio. Contudo, não é uma ação frequente nos sistemas industriais. Para o modelo apresentado neste trabalho, o valor de RSS_t é fixo e igual para todos os transmissores da rede. Com isso, as equações 4.2 e 4.3 mostram a proporcionalidade entre RSS_r e Lp .

$$RSS_r \propto \frac{1}{Lp} \quad (4.2)$$

$$Lp \propto \frac{1}{RSS_r} \quad (4.3)$$

De acordo com a equação 4.3, um valor de atenuação mínimo (Lp_{min}) está relacionado com um valor de potência recebida máximo ($RSS_{r_{max}}$), como mostra a equação 4.4.

$$Lp_{min} \propto \frac{1}{RSS_{r_{max}}} \quad (4.4)$$

Considerando os valores de atenuação e de potência no instante i qualquer (Lp_i e RSS_{r_i}), é possível fazer uma relação entre a atenuação mínima e a atenuação no instante i .

$$\frac{Lp_{min}}{Lp_i} \propto \frac{RSS_{r_i}}{RSS_{r_{max}}} \quad (4.5)$$

Observa-se que a razão apresentada na equação 4.5 indica a proximidade do valor de atenuação medida no instante i em relação à menor atenuação do sinal no conjunto de amostras. As afirmativas abaixo indicam a representação do valor da equação 4.5.

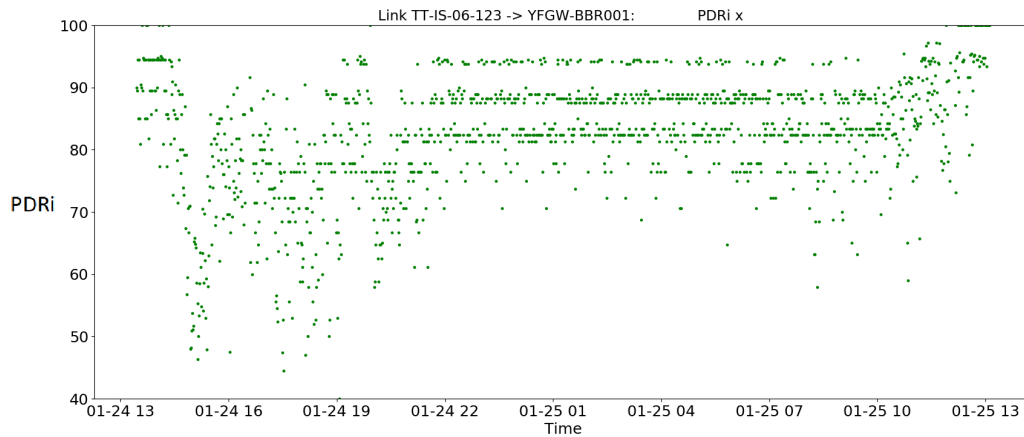
- Quanto maior a razão do lado esquerdo da equação 4.5, menor o valor de atenuação do sinal.
- Quanto menor a razão do lado esquerdo da equação 4.5, maior o valor de atenuação do sinal.

Como o valor de atenuação do sinal do *link* não é disponibilizado pelo gerente da rede, utilizamos a proporcionalidade descrita na equação 4.5 para gerar a primeira variável do modelo proposto neste trabalho. A equação 4.6 apresenta a razão ($RSSRatio$) que será utilizada na próxima etapa do modelo.

$$RSSRatio = \frac{RSS_r}{RSS_{r_{max}}} \quad (4.6)$$

Com o intuito de visualizar as etapas da geração da estabilidade do *link*, nós coletamos alguns dados de *RSS* e realizamos o processamento dessa etapa do modelo. A Figura 4.2 apresenta um conjunto de valores de taxa de entrega de pacotes instantânea (*PDRi*) de um *link* em uma rede sem fio industrial real.

Figura 4.2: Gráfico dos valores de *PDRi* do *link* TT-IS-06-123 $\rightarrow$ gateway.

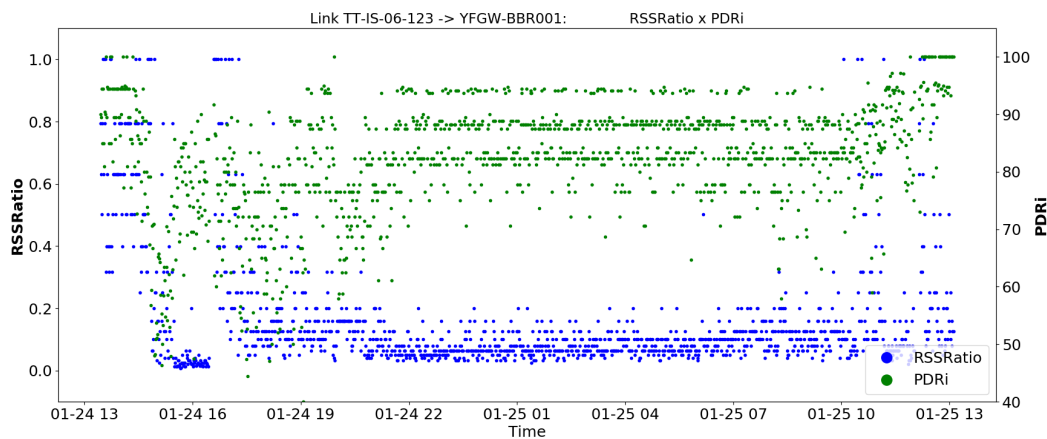


O parâmetro *PDRi* considera apenas a perda de pacotes no último instante de amostragem e é utilizado neste trabalho para fins de avaliação na seção de resultados. Esse parâmetro varia de 0%, em casos de perda de todos os pacotes, a 100% quando todos os pacotes foram entregues.

O conjunto de dados apresentado na Figura 4.2 contém 1419 amostras, porém não é essencial neste momento. É importante observar as variações dos valores de *PDRi* no decorrer do tempo.

A fim de analisar o primeiro fator gerado, o *RSSRatio*, um gráfico temporal que relaciona *PDRi* e *RSSRatio* é apresentado na Figura 4.3.

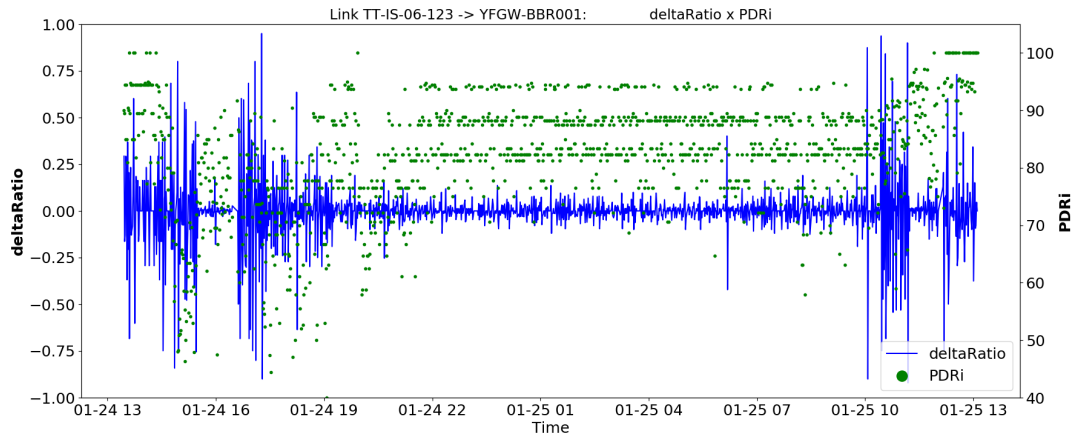
Figura 4.3: Gráfico dos valores do parâmetro *RSSRatio*.



A Figura 4.3 mostra que quando ocorre variação do PDR_i também ocorre variação do fator $RSSRatio$.

Com o intuito de uma melhor visualização dessa variação do $RSSRatio$, foi calculado a taxa de variação instantânea, ou derivada, do conjunto de valores. É mostrado na Figura 4.4 os valores dessa variação instantânea (deltaRatio) e PDR_i .

Figura 4.4: Taxa de variação instantânea do $RSSRatio$.



4.1.2 Variância do fator $RSSRatio$

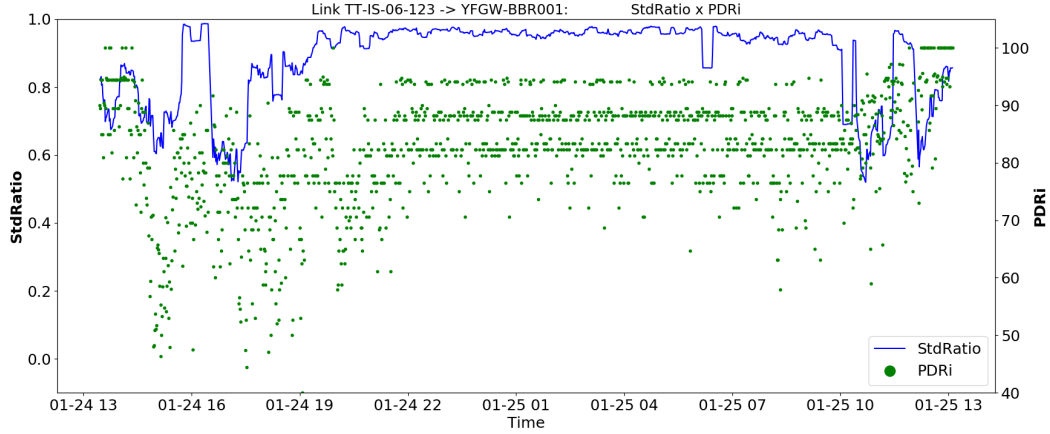
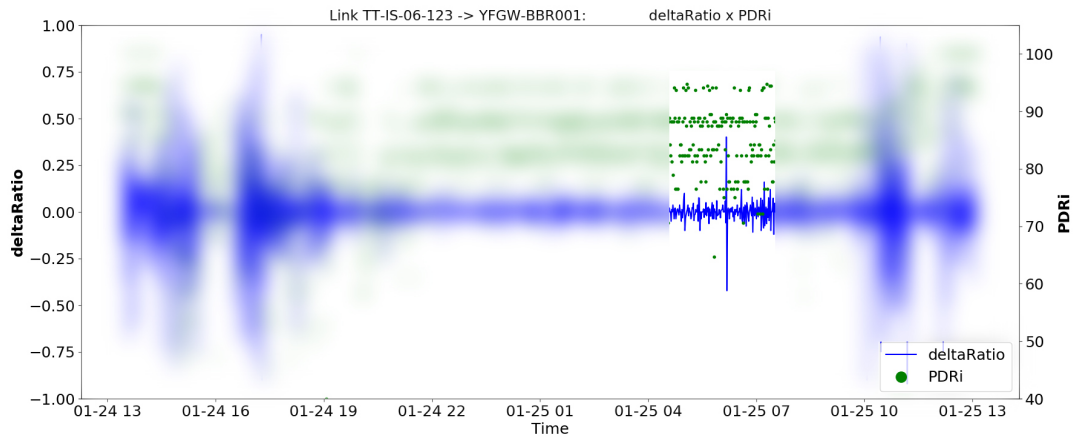
É possível observar na Figura 4.4 que quanto maior a variação da perda de pacote instantânea maior é a oscilação dos valores de $RSSRatio$. Com isso, o objetivo desta etapa é identificar as grandes oscilações dos dados obtidos na etapa anterior, facilmente observadas na Figura 4.4.

A medida de dispersão ou variação utilizada é o desvio padrão (σ), como mostra a equação 4.7.

$$\sigma_{Ratio} = \sqrt{\sum \frac{(RSSRatio_i - \overline{RSSRatio})^2}{n}} \quad (4.7)$$

A variável n representa a quantidade de amostras do conjunto e a variável $\overline{RSSRatio}$ é a média dos valores da razão $RSSRatio$. Os valores resultantes da equação 4.7 são apresentados na faixa de 0 a 1. Se o valor da medida de dispersão (σ_{Ratio}) estiver próximo de 1, indica pequena variação no conjunto de dados obtidos. Quanto menor o valor de σ_{Ratio} , maior a variação da janela de amostras. O resultado dos dados após a aplicação da equação 4.7 é mostrado na Figura 4.5.

Contudo, alguns pontos de medição podem apresentar uma alteração instantânea muito alta, causando valores que se distinguem dos demais, ou melhor, valores fora do padrão. Um exemplo desse tipo de alteração, ou ruído, pode ser observado no trecho em destaque da Figura 4.6.

Figura 4.5: Gráfico dos dados do parâmetro σ_{Ratio} (*StdRatio*).Figura 4.6: Ponto fora da curva nos valores de medição de *RSSRatio*.

Uma solução para filtrar esses valores que apresentam uma alta variação em um curto período de tempo, como um ruído, é o cálculo da Média Móvel Exponencial.

4.1.3 Média Móvel Exponencial (MME)

A média móvel realiza uma estimação baseada em um conjunto de amostras da variável, o qual tem um tamanho que varia quando surge uma nova amostra. O objetivo é que a média considere amostras de uma janela móvel com tamanho definido pelo usuário, gerando diferentes séries históricas da variável.

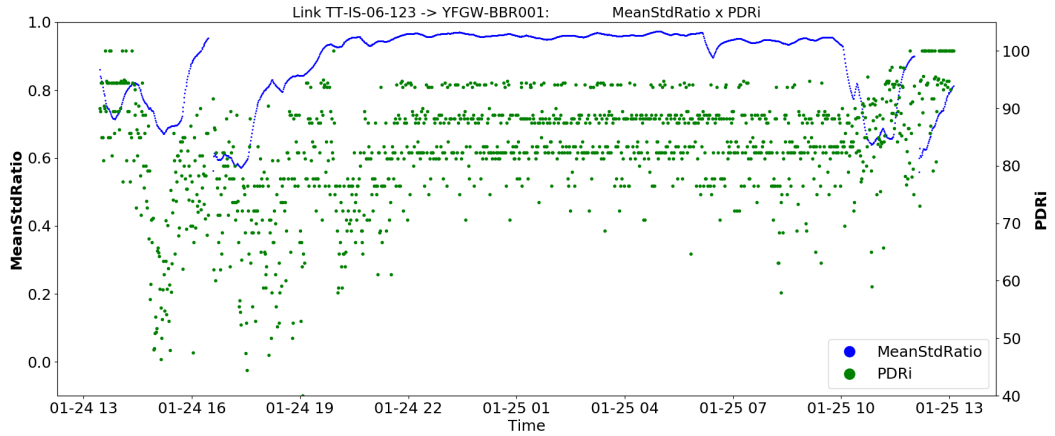
Diferentemente da média móvel simples, que exclui todos os valores de amostras anteriores à janela de dados, a média móvel exponencial (MME) calcula o valor atual baseado na média móvel anterior, conforme mostra a equação 4.8. Nesse sentido, o valor da MME envolve de forma indireta todos os valores da variável no decorrer do tempo.

$$MME[t] = \left(\sigma_{Ratio}[t] * \frac{2}{N+1} \right) + \left(MME[t-1] * \left(1 - \frac{2}{N+1} \right) \right) \quad (4.8)$$

A variável N da equação 4.8 representa o tamanho da janela de amostras considerado na média móvel.

Com isso, nesta etapa do modelo é calculado a média móvel exponencial dos valores de desvio padrão da razão de atenuação (σ_{Ratio}) para reduzir a influência do *outlier* destacado na Figura 4.6. A função da média móvel exponencial é semelhante à função de um filtro. É possível observar que os valores apresentam uma maior suavidade. Com isso, $MME(\sigma_{Ratio})$ é o fator que representa a variação do RSS na geração da estabilidade do *link*.

Figura 4.7: Gráfico dos dados do parâmetro $MME(\sigma_{Ratio})$.



4.1.4 Função de Estabilidade de *Link*

Após a geração do fator de variação da potência do sinal recebido ($MME(\sigma_{RSSRatio})$ ou MME), torna-se possível gerar a função que representa a estabilidade do *link* na rede. Como discutido anteriormente, dois fatores foram escolhidos para representar a estabilidade do *link*: a variação do RSSI e o valor atual do PDR. A primeira variável (MME) é gerada a partir de várias etapas como mostrado no fluxograma da Figura 4.1, enquanto que a segunda variável é a amostra atual do valor de PDR.

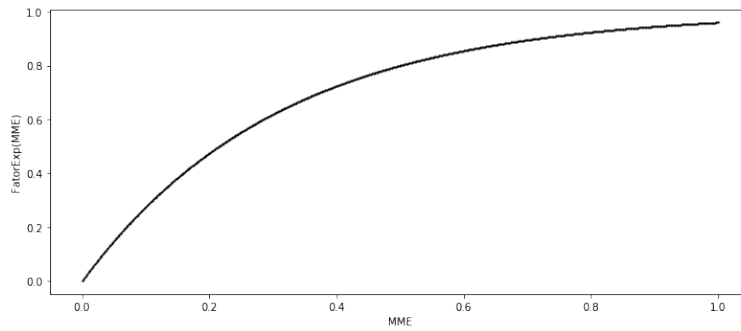
A taxa de entrega de pacotes é um fator que simboliza a influência da estabilidade na perda de pacotes. Contudo, existem casos de *links* que apresentavam altos valores de PDR instantes antes de perder a comunicação com o gerente da rede. Dessa forma, neste trabalho a variação do RSS (MME) junto ao fator PDR consegue identificar pontos de instabilidade do *link*, conforme a equação final do modelo analítico: equação 4.9.

$$Estabilidade = PDR * (1 - 0.04^{MME}) \quad (4.9)$$

O motivo de utilizar uma função exponencial com base fixa e expoente MME é suavizar o fator que multiplica o PDR. Por exemplo, os valores de MME entre 0.6 e 1.0 são convertidos para valores entre 0.85 e 1.0. Essa suavização evita a geração de valores muito baixos de estabilidade quando a variável MME torna-se muito baixa. A equação 4.10 é a função exponencial que multiplica o fator PDR a partir do fator MME . A Figura 4.8 apresenta o comportamento da função exponencial.

$$FatorExp() = 1 - 0.04^{MME} \quad (4.10)$$

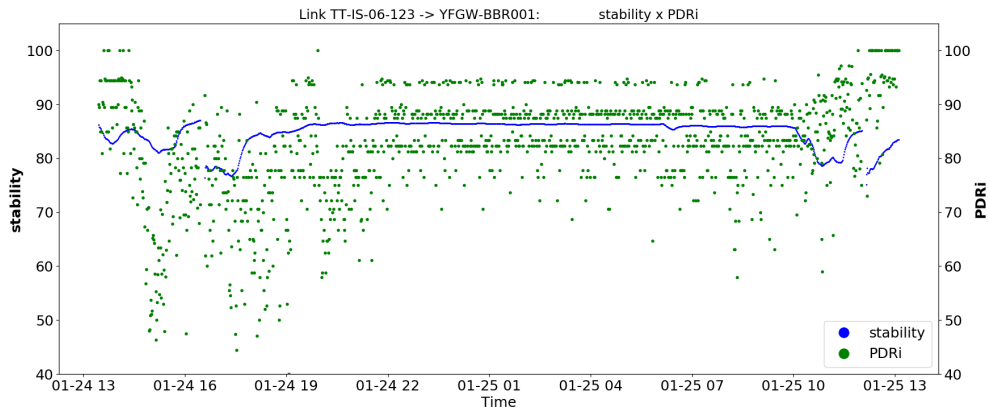
Figura 4.8: Gráfico da função exponencial que gera o fator multiplicador do PDR.



Foram realizados testes com diferentes valores da base da função exponencial da equação 4.9. O objetivo da função é gerar uma alteração no valor da taxa de entrega de pacotes acumulada de forma suave. Nesse sentido, de forma empírica, o valor da base selecionado foi 0.04.

Conforme apresentados nas subseções anteriores, a Figura 4.9 mostra o resultado do processamento do conjunto de dados do exemplo da Figura 4.2 após a execução da última etapa do modelo analítico. As amostras apresentadas na cor verde representam os valores da taxa de entrega de pacotes instantânea e o conjunto de dados de cor azul representa o valor da estabilidade do *link*.

Figura 4.9: Gráfico dos dados de Estabilidade do *Link* gerados pelo modelo proposto.



O gráfico da Figura 4.9 mostra que os valores de estabilidade do *link* gerados pelo método acompanha suavemente as variações da taxa de entrega de pacotes instantânea. O fluxograma apresentado na Figura 4.1 e descrito nesta seção é implementado conforme o algoritmo 1.

Algoritmo 1: Pseudocódigo da função de geração do fator de estabilidade.

Entrada: listaRSSI[], PDR

Saída: estabilidade

Dados: lastMME

1 **início**

2 tam $\leftarrow$ len(listaRSSI)

3 id $\leftarrow$ 1

4 **repita**

5 | lista_mW[id] $\leftarrow$ 10 $^{(RSSRatio[id]/10)}$

6 **até** id > tam;

7 RSSRatio[tam] $\leftarrow$ lista_mW[index] / max(lista_mW)

8 StdRatio $\leftarrow$ np.std(RSSRatio)

9 MME $\leftarrow$ ((StdRatio - lastMME)*(2/tam)) + lastMME

10 lastMME $\leftarrow$ MME

11 estabilidade $\leftarrow$ (PDR/100) * (1 - pow(0.04, MME))

12 **fim**

As etapas do algoritmo seguem a sequência definida no fluxograma 4.1. O gerente da rede precisa obter dois parâmetros de entrada: a janela de amostras de RSS (vetor) e o valor corrente de PDR. Após as execuções de todas as etapas, a função retorna o valor da estabilidade do *link* na faixa de 0 a 1, podendo ser facilmente convertido para 0% a 100%. Mesmo seguindo os pressupostos apresentados no início deste seção, ainda existem algumas limitações de processamento das informações que são discutidas na próxima seção.

4.2 Resultados

Nesta seção, nós apresentamos alguns resultados obtidos após o uso do modelo analítico proposto para geração do fator de estabilidade dos *links* em IWSN. Nosso principal objetivo é destacar alguns dos recursos do modelo proposto com relação à identificação de períodos de instabilidade de *links* a partir do fator. Essas instabilidades são caracterizadas por altas variações na degradação dos sinais recebidos e na taxa de entrega de pacotes de *links*.

Com o intuito de analisar os dados obtidos na aplicação do modelo, foram realizados

15 testes com 7 instrumentos de medição e 1 ponto de acesso de uma rede ISA 100.11a. A duração dos teste é variável na faixa de 24 a 48 horas com período de amostragem de aproximadamente 15 segundos. Porém, como os instrumentos foram configurados com a taxa de atualização de 60 segundos, as amostras com valores repetidos foram eliminadas dos testes. As características dos nós utilizados no teste estão descritas a seguir.

Características dos nós da rede de testes:

- Função: Transmissores de Temperatura e de Pressão Diferencial.
- Fabricante: *Yokogawa Electric Corporation*.
- Protocolo: ISA 100.11a.
- Taxa de atualização: 60s.

O gerenciador da rede, de segurança e o *gateway* estão implementados em uma única estação: YFGW410, normalmente intitulado como *gateway*. E o acesso dos instrumentos de campo à rede ISA 100.11a é realizado através do roteador *backbone* YFGW510. Esses dois elementos são apresentados na Figura 4.10.

Figura 4.10: Estação de Gerenciamento YFGW410 (*Yokogawa Electric*) e roteador *backbone* YFGW510 (*Yokogawa Electric*).



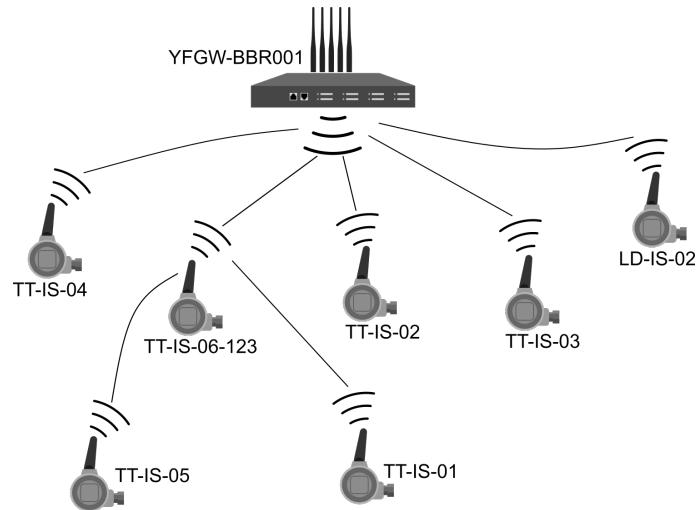
A coleta de dados foi realizada através de comandos da especificação GSAP (*Gateway Service Access Point*) enviados ao gerente da rede. Para cada resposta do gerente foram gerados novos valores de estabilidade dos *links*. Conforme apresenta o algoritmo 1, o modelo recebe uma janela de amostras de RSS (*listRSS*) para analisar as oscilações nessas últimas amostras. Assim, a estação de coleta de dados deve armazenar as amostras durante um período de tempo predeterminado no modelo. Nos testes realizados neste trabalho, nós utilizamos uma janela de amostras de 15 minutos.

A fim de discutir os resultados da execução do modelo proposto, foram escolhidos três cenários dentre os testes realizados. Cada cenário apresenta uma topologia em malha diferente e um *link* é escolhido para análise do comportamento da estabilidade. Conforme discutido na seção 3.1, o PDR é um dos parâmetros utilizado em algumas pesquisas. Assim, as análises apresentadas a seguir são baseadas na seguinte proposição: as variações na taxa de entrega de pacotes instantânea representam uma instabilidade no *link* e são detectadas pelo fator de estabilidade, mas não são detectadas unicamente pelo PDR.

4.2.1 Cenário 01

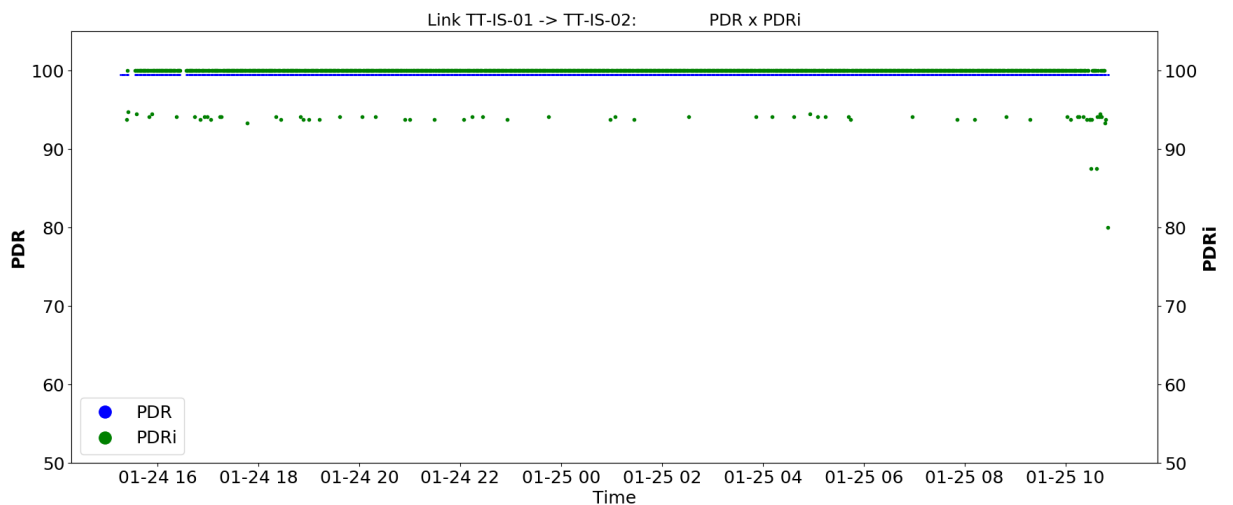
A Figura 4.11 apresenta a topologia dos instrumentos no teste selecionado para o primeiro cenário. O *link* que interliga os nós TT-IS-01 e TT-IS-02 foi escolhido para analisar a execução do modelo.

Figura 4.11: Topologia do cenário 01.



Inicialmente, observa-se a relação entre a taxa de entrega de pacotes (PDR) e a taxa de entrega de pacotes instantânea (PDRi), como mostra a Figura 4.12. É possível observar que a ocorrência de perda de pacotes em diversos instantes do teste não é detectada pelo fator PDR, pois este permaneceu constante. Com isso, conclui-se que o uso exclusivo do fator PDR não caracteriza as instabilidades do *link*.

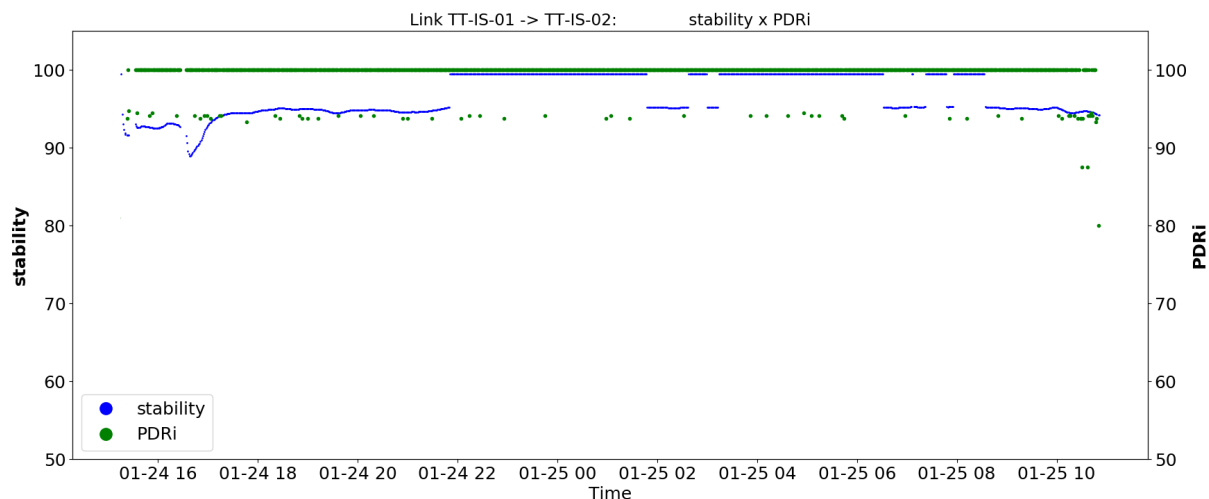
Figura 4.12: Cenário 01: PDR x PDRi.



O fator de estabilidade do *link* gerado pelo modelo proposto apresenta oscilações nos mesmos períodos de variações do PDRi. A Figura 4.13 mostra o comportamento do fator

de estabilidade do *link*. Observa-se que a estabilidade do *link* acompanha os períodos de degradação do sinal que causam as perdas de pacotes.

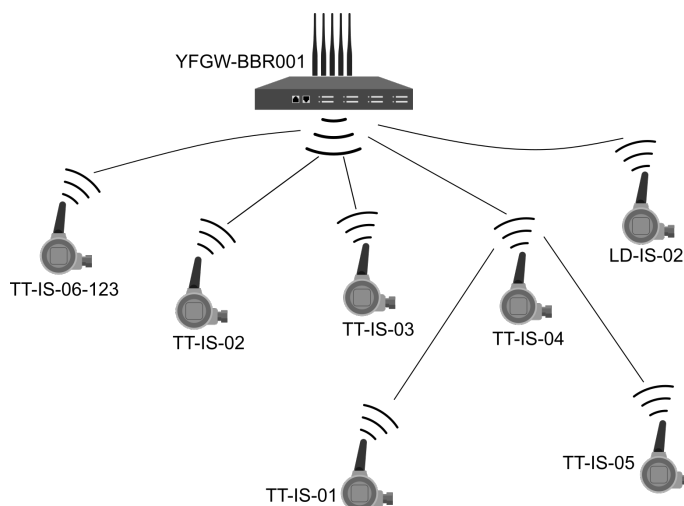
Figura 4.13: Cenário 01: Estabilidade x PDRi.



4.2.2 Cenário 02

O segundo cenário apresenta uma topologia com a mesma quantidade de instrumentos, porém com formação dos *links* diferente do primeiro cenário. A Figura 4.14 apresenta a topologia deste cenário.

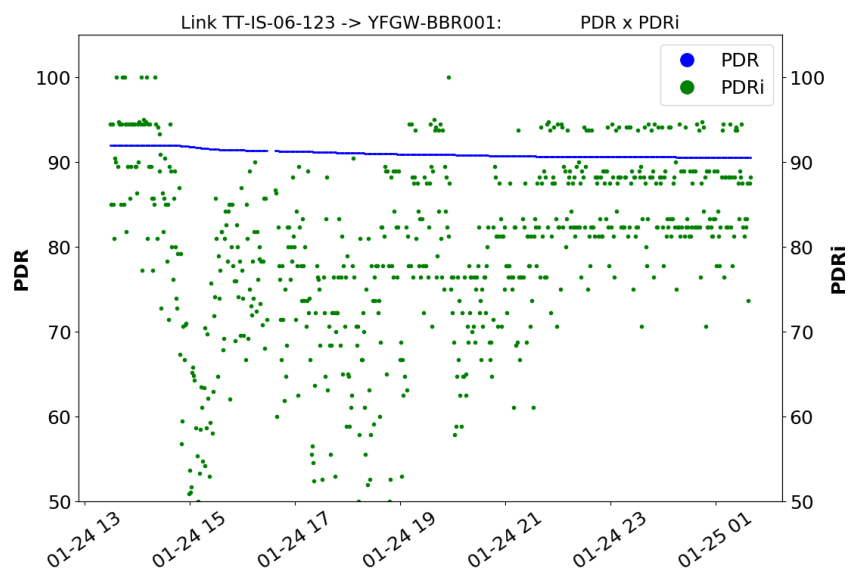
Figura 4.14: Topologia do cenário 02.



Diferente do primeiro cenário, o *link* entre o nó TT-IS-06-123 e o gerente da rede (YFGW-BBR001) foi escolhido para análise. Dentre todos os *links* da rede, o *link* escolhido foi o que mais apresentou períodos de oscilações do sinal recebido durante o teste. A Figura 4.15 mostra a relação entre a taxa de entrega de pacotes acumulada, PDR, e

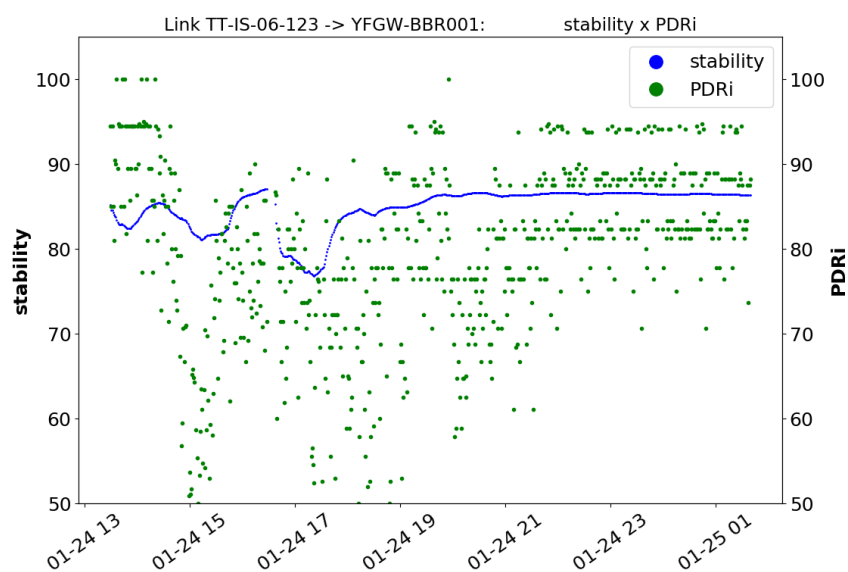
instantânea, PDR_i . É possível observar que o *link* apresentou diversas variações na perda de pacotes instantânea e o PDR permaneceu constante.

Figura 4.15: Cenário 02: PDR x PDR_i - *Link*: TT-IS-06-123 $\rightarrow$ BBR001.



Ao contrário do PDR, o fator de estabilidade do *link* conseguiu detectar as oscilações e, de forma indireta, indicar uma anomalia no meio de comunicação entre os dispositivos, como mostra a Figura 4.16.

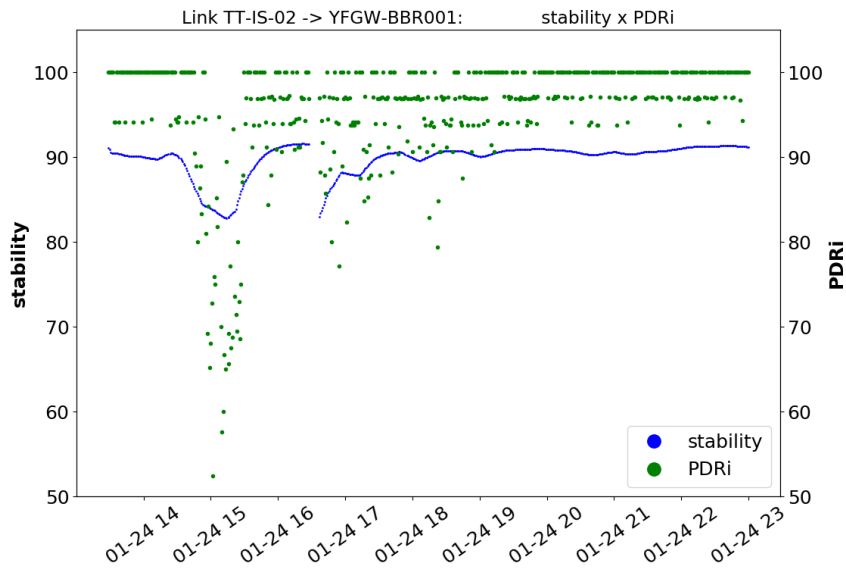
Figura 4.16: Cenário 02: Estabilidade x PDR_i - *Link*: TT-IS-06-123 $\rightarrow$ BBR001.



Além do *link* entre TT-IS-06-123 e YFGWBBR001, o *link* entre TT-IS-02 e YFGW-BBR001 também apresenta um resultado satisfatório quanto ao uso do fator de estabi-

lidade do *link*. Observa-se na Figura 4.17 que o fator pode identificar os períodos de oscilação no canal de comunicação.

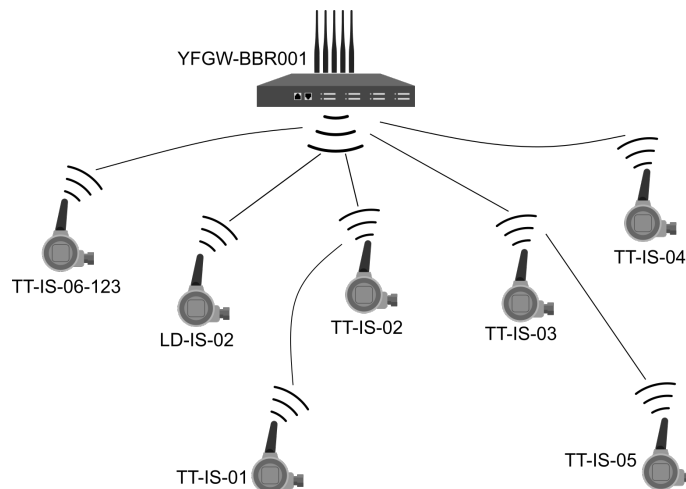
Figura 4.17: Cenário 02: Estabilidade x PDRi - *Link*: TT-IS-02 → BBR001.



4.2.3 Cenário 03

Por fim, esta subseção apresenta o último cenário analisado. Neste cenário a atenuação do *link* foi proposital. A topologia deste cenário é mostrado na Figura 4.18 e o *link* entre TT-IS-03 e o gerente da rede (YFGW-BBR001) é o selecionado.

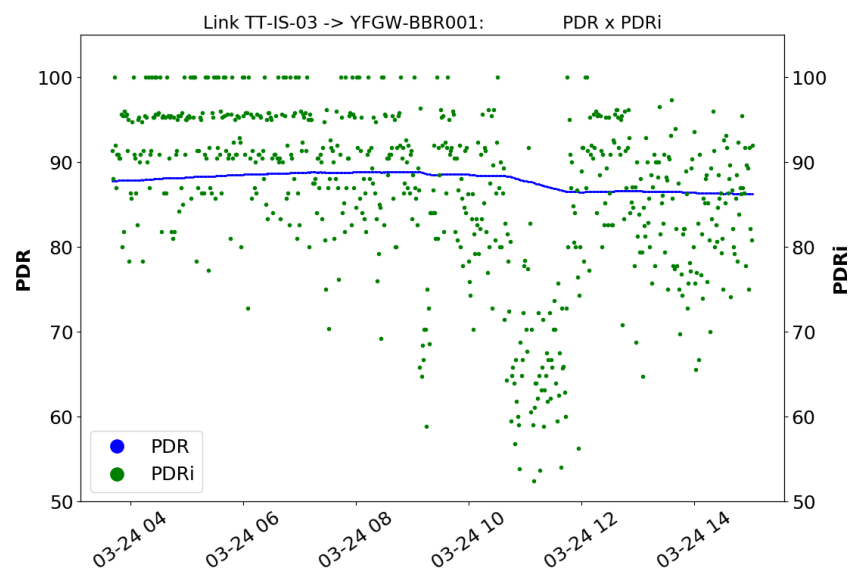
Figura 4.18: Topologia do cenário 03.



A Figura 4.19 apresenta a relação entre o PDR e o PDRi do *link* escolhido. Com o intuito de reiniciar a coleta dos dados, o nó TT-IS-03 foi desconectado da rede no início

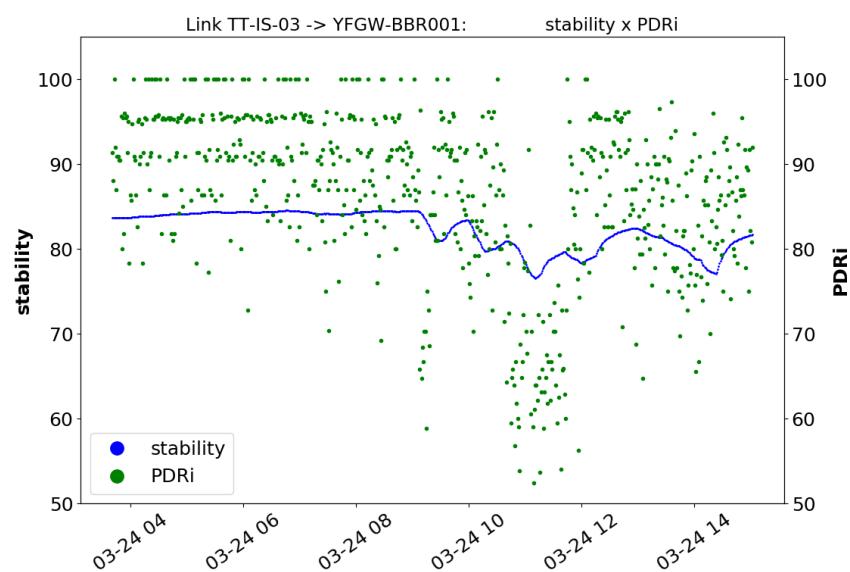
do teste, entre 14 e 17 horas do dia 03-23. E, por volta de 11 horas do dia 03-24, foi aplicado uma degradação no sinal com a inserção de obstáculos de material metálico, que apresentam alto potencial de reflexão e absorção de ondas de radiofrequência, para promover a perda de pacotes nos instantes.

Figura 4.19: Cenário 03: PDR x PDRi - *Link*: TT-IS-03 $\rightarrow$ BBR001.



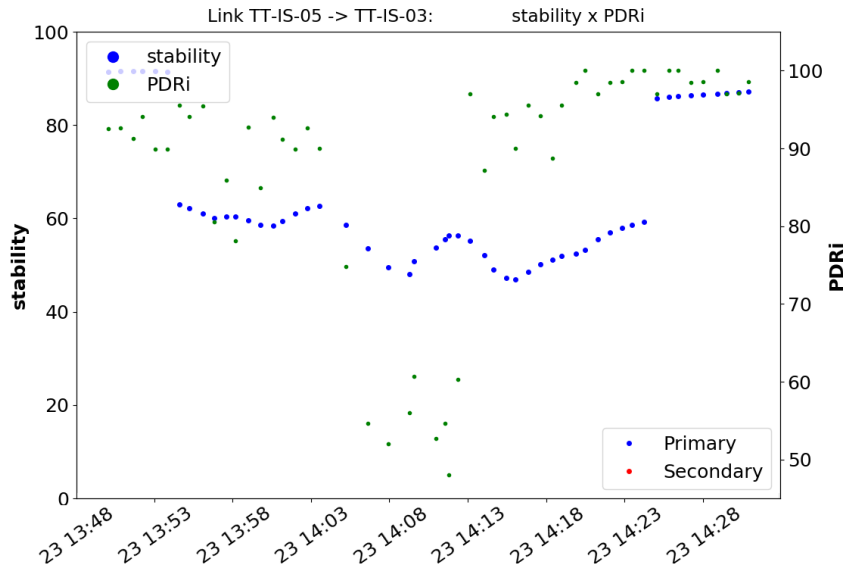
Diferentemente do comportamento do PDR na Figura 4.19, o fator gerado detectou a instabilidade do *link* no período que foi degradado o sinal, como mostra a Figura 4.20.

Figura 4.20: Cenário 03: Estabilidade x PDRi - *Link*: TT-IS-03 $\rightarrow$ BBR001.



Outro exemplo do mesmo cenário é mostrado na Figura 4.21. O *link* entre TT-IS-05 e TT-IS-03 mostra uma alta degradação do sinal no período entre 14:03 e 14:13, que é detectado pelo fator de estabilidade.

Figura 4.21: Cenário 03: Estabilidade x PDRi - *Link*: TT-IS-05 → TT-IS-03.



Com isso, os três cenários analisados constataram que o modelo analítico é capaz de identificar instabilidades do meio de comunicação no que se refere à variação da intensidade do sinal recebido. A partir desses resultados, comprova-se também que o parâmetro PDR por si só não é suficiente para detectar anomalias nos *links*, que podem levar à falha de comunicação em um sistema de monitoramento e controle.

Capítulo 5

Aplicação do Modelo de Estabilidade de *Link*

Os resultados apresentados no capítulo 4 mostram que o modelo analítico de estabilidade de *link* proposto neste trabalho caracteriza nitidamente o comportamento dos *links* no decorrer do tempo. Contudo, existem dois motivos que impossibilitam a comparação com outros modelos. O primeiro motivo é que não foi utilizado um modelo de simulação para a rede proposta. Foram utilizados dados reais para a etapa de modelagem deste trabalho.

O segundo motivo é que, de acordo com a Tabela 3.1, a maioria dos modelos de estabilidade de *links* foram definidos para redes móveis, área que apresenta a estabilidade como uma característica de mobilidade no espaço. Diferentemente dessas redes, os locais de instalação da maioria dos nós de medição e atuação em redes de sensores sem fio industriais são previamente fixados na etapa de *site survey*, inviabilizando de forma parcial a mobilidade dos nós. Com isso, não é viável comparar modelos de estabilidade baseado em mobilidade de redes móveis com o modelo proposto neste trabalho.

Dessa forma, com o intuito de atestar o modelo proposto, foi implementado um sistema de controle em rede sem fio ISA 100.11a baseado no modelo de estabilidade de *links* apresentado neste trabalho. O sistema controla e monitora o nível de um tanque baseado nos valores de medição de nós de uma rede ISA 100.11a. A métrica de estabilidade é utilizada para definir qual rota será utilizada para a aquisição do valor da variável de processo (nível). Um monitoramento contínuo do nível de estabilidade do *link* da variável de processo garante que seja escolhida o valor de outro *link* de transmissão, se possível, quando a estabilidade do *link* atual ultrapassar o limite inferior definido.

Neste capítulo é apresentada a implementação do sistema de controle em rede sem fio (*Wireless Networked Control System – WNSC*) para validar o modelo de estabilidade. De acordo com Tipsuwan & Chow (2003), existem alguns tipos de estruturas de sistemas de controle em rede, tanto comunicação cabeada como sem fio. A arquitetura do sistema desenvolvida neste trabalho adota o controlador como elemento central junto com o *gateway* que realiza a interface com os elementos de medição. Contudo, o único elemento de atuação presente no sistema se comunica via sinal cabeado.

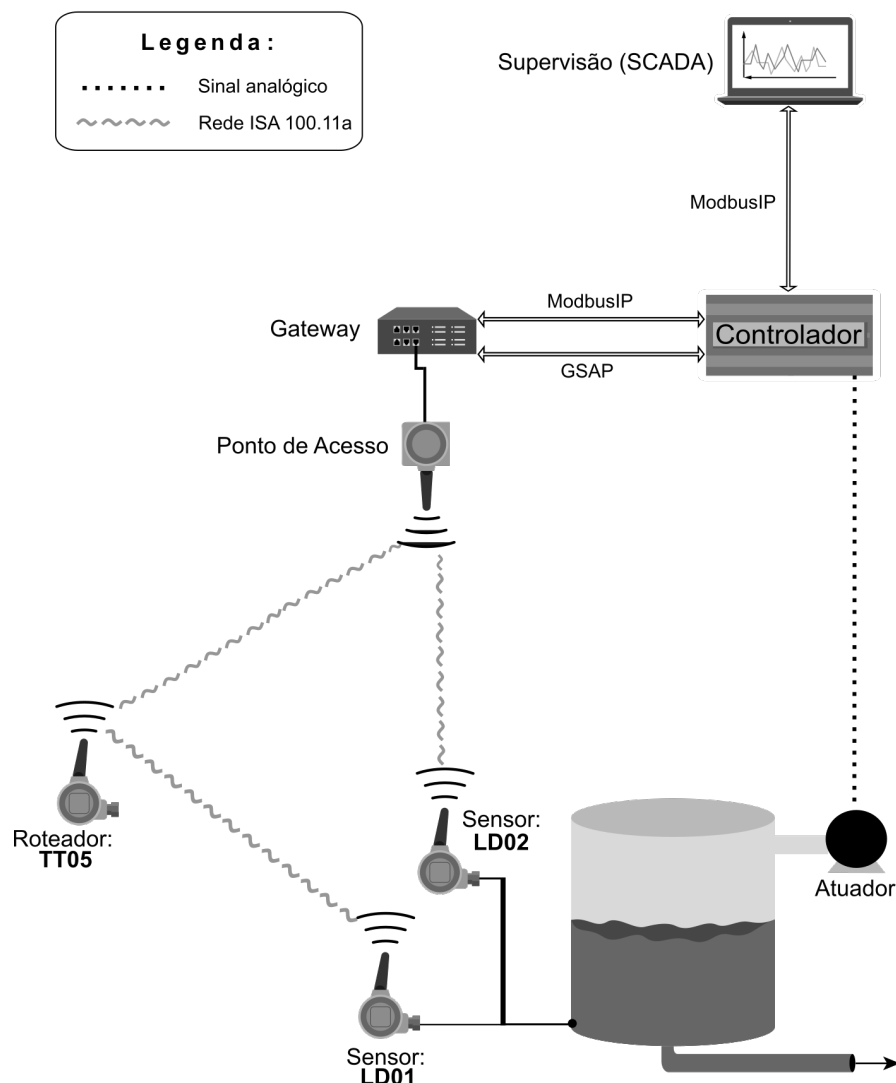
Neste capítulo será apresentado uma descrição detalhada do sistema de controle em rede implementado, os resultados de alguns testes preliminares da malha de controle, a implantação do código do controlador adotando o modelo de estabilidade de *link* e os

resultados da malha de controle baseada na estabilidade dos *links*.

5.1 Arquitetura do Sistema

A aplicação proposta neste capítulo realiza um controle de nível de um tanque a partir da medição via instrumentação sem fio. O controlador do sistema estabelece dois caminhos de comunicação com o *gateway* para coletar dados dos *links* de comunicação e das variáveis de medição dos instrumentos. Além disso, é aberto um canal de comunicação com o sistema de supervisão para possibilitar o monitoramento das variáveis. Após realizar a rotina de controle, o controlador, por fim, envia o sinal de forma cabeada para o atuador. A arquitetura do sistema é apresentada na Figura 5.1.

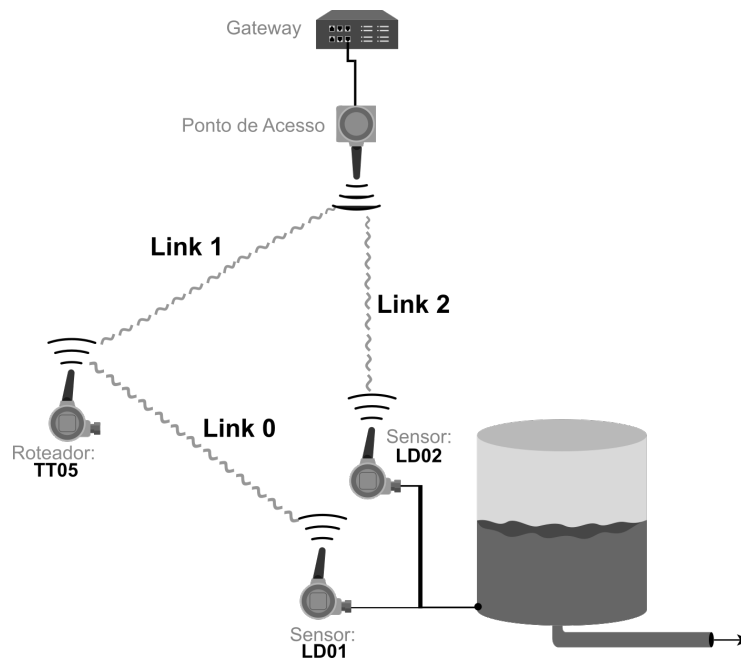
Figura 5.1: Arquitetura do Sistema de Controle em Rede ISA 100.11a



Observa-se na Figura 5.1 que existem dois sensores de pressão diferencial para medir o nível (variável de processo) do tanque: LD01 e LD02. Esses sensores medem o mesmo valor de pressão diferencial, ou seja, os valores de PV enviados para o *gateway* são os mesmos.

A rede ISA 100.11a formada na aplicação contém apenas três instrumentos: os dois sensores de pressão diferencial (LD01 e LD02) e um transmissor de temperatura que serve apenas de roteador para o instrumento LD01. Ao contrário do LD01, o instrumento LD02 tem um *link* direto com o *gateway*. A quantidade e nomenclatura dos *links* do sistema é mostrado na Figura 5.2.

Figura 5.2: *Links* do Sistema de Controle.



Os *links* formados na configuração do sistema são:

- **Link0:** LD01 → TT05.
- **Link1:** TT05 → Gateway.
- **Link2:** LD02 → Gateway.

Diante da configuração proposta, o controlador pode receber o valor de PV a partir da rota do LD01 ou da rota do LD02. A rota do LD01 é formada pelos *link0* e *link1*, e a rota do LD02 é formada apenas pelo *link2*. O *Gateway*, por sua vez, envia esses dados para o controlador.

Após receber e selecionar o valor adequado de PV, o controlador executa a rotina de um controle Proporcional Integral Derivativo (PID) e envia o valor da variável manipulada (MV) para a bomba.

5.1.1 Objetivos da Aplicação

A configuração implantada permite que o controlador escolha o valor da PV entre a rota do dado do sensor LD01 e a rota do sensor LD02. Com isso, ao analisar o nível de estabilidade desses *links* torna-se possível realizar uma escolha de PV baseada nessa métrica.

Os objetivos específicos dessa aplicação são:

- Atenuar o nível de sinal do *Link0* para causar uma variação na estabilidade do *link*.
- Calcular os níveis de estabilidades dos *links*.
- Implementar uma lógica de controle que escolha o valor de PV baseado na estabilidade dos *links*.

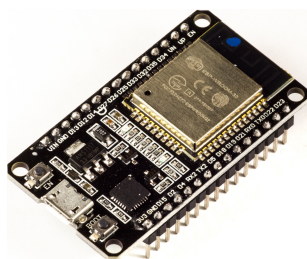
Para conseguir medir os níveis de estabilidade é necessário coletar os dados de RSSI dos *links*. Essa coleta de dados é realizada através de um canal de comunicação Modbus TCP do controlador com o *Gateway*.

Além de coletar os dados dos *links*, o controlador também realiza todas as funções de coleta dos valores de PV, cálculo das estabilidades, execução da rotina de controle e envio para o sistema de supervisão.

5.1.2 Controlador: Microcontrolador ESP32

Devido à grande quantidade de funções de comunicação e de processamento, além da necessidade de realizar comunicação WiFi para facilitar a integração com os diversos elementos em rede, foi selecionado o microcontrolador ESP32 da empresa *Espressif* (Systems 2020), mostrado na Figura 5.3.

Figura 5.3: Controlador ESP32.



O ESP32 é um único chip que incorpora microprocessamento, memória, periféricos e módulos de comunicação WiFi e Bluetooth, projetado com tecnologia de ultra-baixa potência. As principais características que diferenciam de outras plataformas utilizadas em sistemas embarcados são: 2 núcleos de processamento, 160 MHz de *clock*, módulo Bluetooth integrado, memória *flash* expansível até 32 GB, 36 pinos de GPIO e 18 canais de conversores analógico-digital (Systems 2020). O diagrama de blocos da estrutura interna do microcontrolador ESP32 é apresentado na Figura 5.4.

Nesta aplicação será utilizado o módulo de comunicação WiFi do ESP32, para possibilitar a comunicação com o *gateway* e com a estação de supervisão, e módulo *PWM*

5.1.3 Comunicação Modbus TCP com o *Gateway*

O módulo de comunicação Modbus TCP realiza uma comunicação mestre-escravo com o *Gateway*, onde o mestre é o controlador ESP, efetuando as requisições, e o escravo é o *Gateway*.

O mapeamento de memória Modbus do *Gateway* contém os valores de PV dos dois sensores da rede, como mostra a Tabela 5.1. Esses dados são solicitados pelo controlador, via barramento Modbus TCP/ com o *gateway*, para selecionar qual o valor adequado de PV.

Tabela 5.1: Mapeamento Modbus do *Gateway*.

TAG	Tipo de dado Modbus	Offset	Descrição
PV1	<i>Registradores de entrada</i>	13	Variável de processo do sensor LD01
	<i>Holding registers</i>	14	
PV2	<i>Registradores de entrada</i>	34	Variável de processo do sensor LD02
	<i>Holding registers</i>	35	

5.1.4 Comunicação GSAP com o *Gateway*

O documento da norma ISA 100.11a descreve uma interface de ponto de acesso aos serviços do *gateway*: GSAP. Esse serviço é genérico e deve ser usado como uma interface comum acima da camada de aplicação do protocolo (IEC 2012).

GSAP é uma especificação que define os recursos de suporte que permitem uma interface de comunicação da rede ISA 100.11a com uma rede externa. O documento da norma descreve a maneira de implementar as mensagens GSAP utilizando os 15 objetos e serviços descritos na norma. Não existe um detalhamento completo, mas uma referência para ajudar na compreensão dos comandos (IEC 2012).

Os comandos são implementados utilizando objetos da camada de aplicação do protocolo. Cada serviço acessa um determinado tipo de objeto do gerenciador da rede, porém existem vários comandos que podem manipular esses objetos. A Tabela 5.2 apresenta alguns serviços GSAP descritos na norma ISA 100.11a.

Neste trabalho foram implementados apenas os comandos "*G_Session request*" e "*G_Neighbor_Health_Report request*". O primeiro serviço (*Session*) executa a abertura da sessão GSAP com o *gateway*. E o segundo serviço (*Neighbor_Health Report*) é responsável pela requisição dos dados dos vizinhos de um dispositivo de campo da rede.

Cada serviço tem seus campos específicos de mensagem de requisição e confirmação. O programador deve entender todos os campos do pacote para conseguir realizar uma comunicação com *gateway*. Além disso, só é possível requisitar um serviço de "*Neighbor_Health Report*" se a sessão estiver aberta.

A fim de exemplificar uma requisição de serviço GSAP, a Tabela 5.3 apresenta os campos do comando *Neighbor_Health request* com os respectivos valores de exemplo.

O comando "*Neighbor_Health request*" retorna um objeto do tipo *NeighborHealthReport*, que armazena todos os valores sobre os vizinhos de um determinado instrumento da rede. Um exemplo da estrutura do objeto é mostrado na Figura 5.6.

Tabela 5.2: Serviços GSAP descritos na norma ISA 100.11a.

Serviço	Comando
<i>Session</i>	<i>G_Session request</i>
	<i>G_Session confirm</i>
<i>Lease</i>	<i>G_Lease request</i>
	<i>G_Lease confirm</i>
<i>Lease</i>	<i>G_Lease request</i>
	<i>G_Lease confirm</i>
<i>Device_List_Report</i>	<i>G_Device_List_Report request</i>
	<i>G_Device_List_Report confirm</i>
<i>Topology_Report</i>	<i>G_Topology_Report request</i>
	<i>G_Topology_Report confirm</i>
<i>Schedule_Report</i>	<i>G_Schedule_Report request</i>
	<i>G_Schedule_Report confirm</i>
<i>Device_Health_Report</i>	<i>G_Device_Health_Report request</i>
	<i>G_Device_Health_Report confirm</i>
<i>Neighbor_Health_Report</i>	<i>G_Neighbor_Health_Report request</i>
	<i>G_Neighbor_Health_Report confirm</i>
<i>Network_Health_Report</i>	<i>G_Network_Health_Report request</i>
	<i>G_Network_Health_Report confirm</i>

Tabela 5.3: Campos do comando GSAP: *Neighbor_Health request*.

Campo	Tamanho (bytes)	Descrição	Valor exemplo
Versão	1	Versão do <i>Gateway</i>	OxFO
Tipo de serviço	1	Código do comando	0x07
ID da sessão	4	Identificador da sessão. Valor retornado pela função de criação de sessão.	–
ID Transação	4	Cada comunicação realizada numa sessão gera um ID diferente.	–
Tamanho do dado	4	Tamanho do objeto para solicitar de dados.	–
CRC do cabeçalho	4	CRC do cabeçalho, que engloba os campos: Versão, Tipo, ID Sessão, ID Transação e Tamanho do dado.	–
Endereço de rede	16	Endereço de rede do instrumento que deseja-se coletar as informações de vizinhos.	–
CRC do dado	4	CRC do campo "Endereço de rede". <i>GS_Network_Address</i>	–

A variável *neighborHealthList[]* é um vetor de elementos do tipo "*NeighborHealth*". A estrutura *NeighborHealth* armazena todos os dados do *link* entre o instrumento transmissor, identificado no campo "Endereço de rede" na Tabela 5.3, e o vizinho (instrumento

Figura 5.6: Estrutura do objeto GSAP: *GS_Network_Address*.

```

struct NeighborHealthReport
{
    // all members are sent network order
    typedef struct NeighborHealth
    {
        Address128 networkAddress;           // GS_Network_Address
        Uint8      linkStatus;               // GS_Link_Status
        Uint32     DPDUstTransmitted;        // GS_DPDUst_Transmitted
        Uint32     DPDUstReceived;           // GS_DPDUst_Received
        Uint32     DPDUstFailedTransmission; // GS_DPDUst_Failed_Transmission
        Uint32     DPDUstFailedReception;    // GS_DPDUst_Failed_Reception
        Int16      signalStrength;           // GS_Signal_Strength, see below
        Uint8      signalQuality;            // GS_Signal_Quality, see below
    };
    Uint16      numberOfNeighbors;
    NeighborHealth neighborHealthList[ numberOfNeighbors ];
}

```

receptor), identificado no campo *networkAddress* da estrutura *NeighborHealth*, mostrado na Figura 5.6.

O controlador ESP32 foi programado para enviar o comando de abertura de sessão e o comando "*Neighbor_Health request*" para os dois *links* do sistema 5.1. Assim, obtendo todos os dados dos *links* da rede.

5.1.5 Comunicação Modbus TCP com o SCADA

Com a finalidade de supervisionar o sistema de controle, mais um módulo de comunicação Modbus TCP foi implementado no controlador. Dessa vez, o controlador estabelece uma comunicação com a plataforma de desenvolvimento de aplicações de supervisão "ScadaBR".

A tela de monitoramento desenvolvida apresenta apenas algumas variáveis da malha de controle. Contudo, existe uma grande variedade de variáveis da rede e da malha de controle que são monitoradas pela ferramenta.

O mapeamento de memória Modbus do controlador (escravo da comunicação), como mostrado na Tabela 5.4, contém apenas variáveis do tipo Registradores de Retenção (*Holding Registers*), como mostra a Figura 5.7.

Foram definidos apenas os comandos de leitura e escrita desse tipo de registradores de retenção. Algumas variáveis ocupam mais de uma posição de memória (*offset*) devido à representação como tipo de dado flutuante.

Observa-se na Tabela 5.4 que algumas variáveis de monitoramento são dados da malha de controle, como ModoPID, PV1, SP, MV e PV2, e outras representam a performance da rede, desde os valores de potência do sinal recebido dos *links* (RSSI0, RSSI1 e RSSI2) até as taxas de pacotes entregues (PDR0, PDR1 e PDR2).

Todas essas variáveis que descrevem a performance da rede foram coletadas do *gateway* através da comunicação GSAP, detalhada na subseção anterior. Como a plataforma ScadaBR também permite a geração de relatórios com os dados monitorados, salvar es-

Figura 5.7: Tela da aplicação ScadaBR com algumas variáveis.

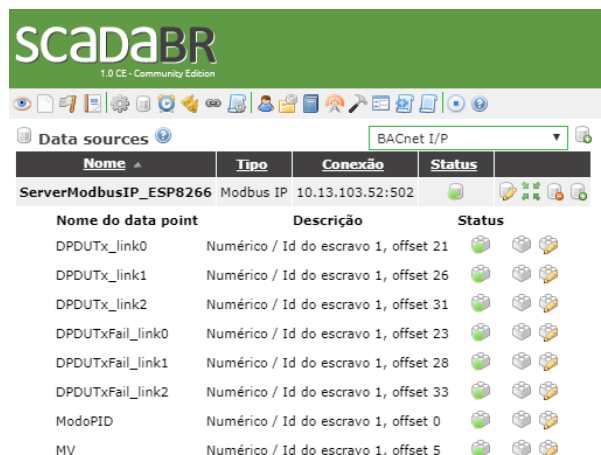


Tabela 5.4: Mapeamento Modbus do controlador na comunicação com o ScadaBR.

TAG	Tipo de dado Modbus	Offset	Descrição
ModoPID	<i>Holding registers</i>	0	Modo para habilitar mudança de <i>setpoint</i>
PV1	<i>Holding registers</i>	1	Variável de processo do sensor LD01
	<i>Holding registers</i>	2	
SP	<i>Holding registers</i>	3	<i>Setpoint</i>
MV	<i>Holding registers</i>	5	Variável manipulada (saída do PID)
PV2	<i>Holding registers</i>	12	Variável de processo do sensor LD02
	<i>Holding registers</i>	13	
RSSI0	<i>Holding registers</i>	20	RSSI do <i>link</i> 0
DPDUTx0	<i>Holding registers</i>	21	Quantidade de pacotes enviados pelo <i>link</i> 0
	<i>Holding registers</i>	22	
DPDUTxFail0	<i>Holding registers</i>	23	Quantidade de pacotes falhos do <i>link</i> 0
	<i>Holding registers</i>	24	
RSSI1	<i>Holding registers</i>	25	RSSI do <i>link</i> 1
DPDUTx1	<i>Holding registers</i>	26	Quantidade de pacotes enviados pelo <i>link</i> 1
	<i>Holding registers</i>	27	
DPDUTxFail1	<i>Holding registers</i>	28	Quantidade de pacotes falhos do <i>link</i> 1
	<i>Holding registers</i>	29	
RSSI2	<i>Holding registers</i>	30	RSSI do <i>link</i> 2
DPDUTx2	<i>Holding registers</i>	31	Quantidade de pacotes enviados pelo <i>link</i> 2
	<i>Holding registers</i>	32	
DPDUTxFail2	<i>Holding registers</i>	33	Quantidade de pacotes falhos do <i>link</i> 2
	<i>Holding registers</i>	34	
PDR0	<i>Holding registers</i>	35	Taxa de pacotes entregues do <i>link</i> 0
	<i>Holding registers</i>	36	
PDR2	<i>Holding registers</i>	39	Taxa de pacotes entregues do <i>link</i> 2
	<i>Holding registers</i>	40	

das variáveis da rede possibilita uma análise posterior detalhada da geração da métrica de estabilidade.

Antes de utilizar a métrica de estabilidade de *link*, definida pelo modelo analítico, na definição da PV da malha de controle, foram realizados testes prévios para analisar a influência da estabilidade no erro de controle em regime permanente.

5.2 Resultados: Análise da Estabilidade do *Link*

Uma sequência de testes com o sistema proposto foram realizados para analisar a relação do fator estabilidade de *link* na malha de controle. A metodologia utilizada nesse grupo de testes é descrita na sequência de ações a seguir.

1. Iniciar os instrumentos da rede.
2. Iniciar a aplicação SCADA.
3. Determinar o valor desejado (*setpoint*) em 100mm.
4. Executar o controle PI com o valor de PV do sensor LD01.
5. Aguardar o controle atingir o regime permanente de 1% de erro.
6. Provocar uma variação na atenuação no sinal do *link* 0 (*link* entre o sensor LD01 e o roteador TT05).
7. Gerar o relatório com todos os dados monitorados do controlador.
8. Realizar uma análise desses dados.

Observa-se pela sequência de ações que o objetivo principal do teste é causar uma variação na atenuação do sinal do *link* de transmissão do sensor LD01 para verificar sua influência no regime permanente da malha de controle.

O item 6 da metodologia descrita acima só é executado após o sistema de controle entrar no regime permanente, considerando um erro de regime de 1%. Nesse sentido, qualquer erro acima de 1% será considerado, neste trabalho, como uma falha do controlador.

A técnica de controle implementada é um controle proporcional integrativo (PI), que opera em uma taxa de amostragem de 100 ms e com ganhos de $K_P = 1.6$ e $K_I = 0.15$. Como os processos de modelagem e sintonia do controlador não fazem parte dos objetivos da aplicação, foram utilizados valores padrões de outros trabalhos desenvolvidos com a mesma planta.

Foram realizados 8 (oito) testes com a arquitetura proposta na Figura 5.1, onde o controlador recebe o valor de PV apenas do sensor LD01 e o *link* 0 é o caminho a ser atenuado. O período de execução dos testes foi de no mínimo 20 minutos, considerando um tempo compatível para iniciar o controlador, determinar o valor de nível desejado e aguardar o sistema alcançar o regime permanente. E, a partir da aplicação de supervisão desenvolvida, foram gerados relatórios contendo os valores dos dados nesse período de tempo de realização dos testes.

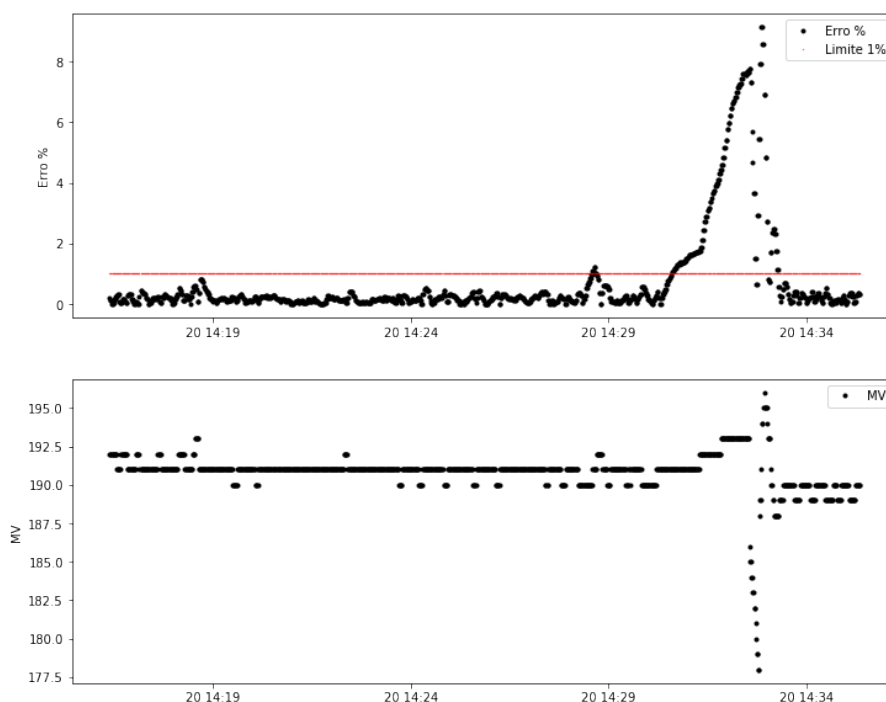
Contudo, para obter uma melhor visualização dos dados neste documento, serão apresentados os dados de forma gráfica considerando apenas os períodos em que ocorreu variação na estabilidade ou no erro do controlador. Com isso, para analisar os dados e

a influência do fator de estabilidade do *link* no controle, a análise gráfica dos dados foi dividida em três testes: Teste 01, Teste 02 e Teste 03.

5.2.1 Teste 01

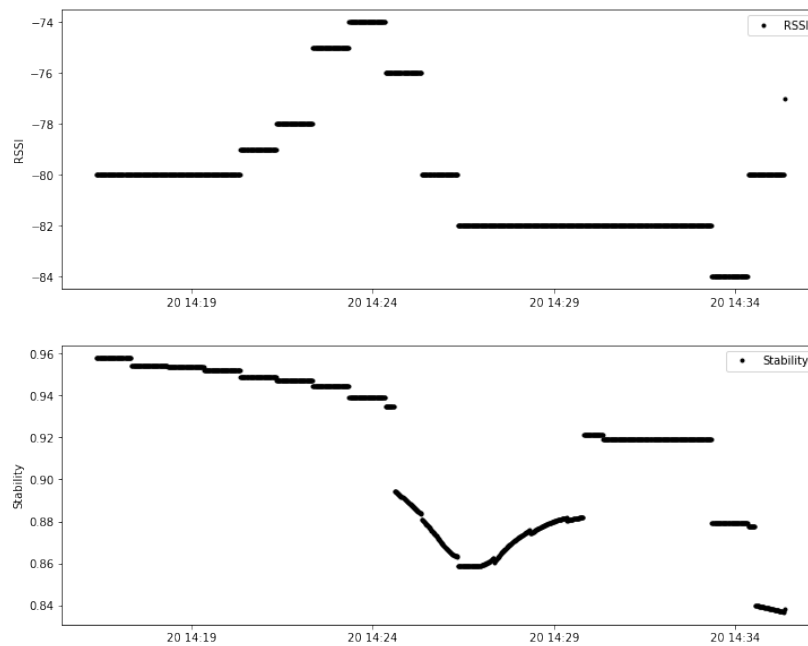
O primeiro gráfico de resultado do teste 01 apresenta as variáveis relacionadas à malha de controle: Erro (diferença entre a variável de processo e o valor desejado) e MV (variável manipulada). O controlador gera o valor da saída do controle PI (variável MV), numa faixa de 0 a 255, para enviar um sinal de modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM) para o atuador da malha: a bomba. O comportamento dessas variáveis são apresentados na Figura 5.8.

Figura 5.8: Teste 01: Variáveis do controle (Erro e MV) no período do teste.

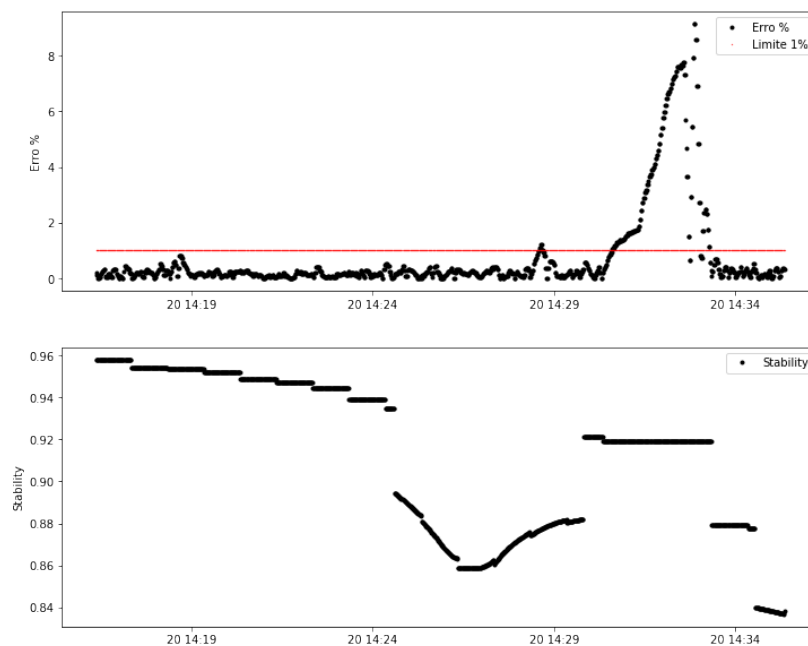


Observa-se que aproximadamente no período entre 14h30m e 14h33m o erro absoluto em regime permanente do sistema de controle ultrapassa os limites de 1%, alcançando até cerca de 9% de erro. Essa alteração do erro causa naturalmente uma alteração no sinal da bomba(MV), mostrado no segundo gráfico da Figura 5.8.

Ao analisar o fator de estabilidade do *link0*, caminho do sensor LD01 para o TT05, é possível verificar que a variação da atenuação causada no caminho gerou uma redução do valor da estabilidade. Esse comportamento do valor da potência do sinal recebido e a estabilidade do *link0* pode ser constatado nos dois gráficos da Figura 5.9. O primeiro gráfico da Figura 5.9 apresenta os valores de RSSI do *link* e o segundo gráfico os valores do fator de estabilidade.

Figura 5.9: Teste 01: RSSI e Estabilidade do *Link0*.

Após obter os valores de estabilidade do *link*, iniciou-se uma investigação da influência do fator estabilidade no erro em regime do controlador. Essa análise pode ser observada na Figura 5.10.

Figura 5.10: Teste 01: Erro absoluto (%) e Estabilidade do *Link0*.

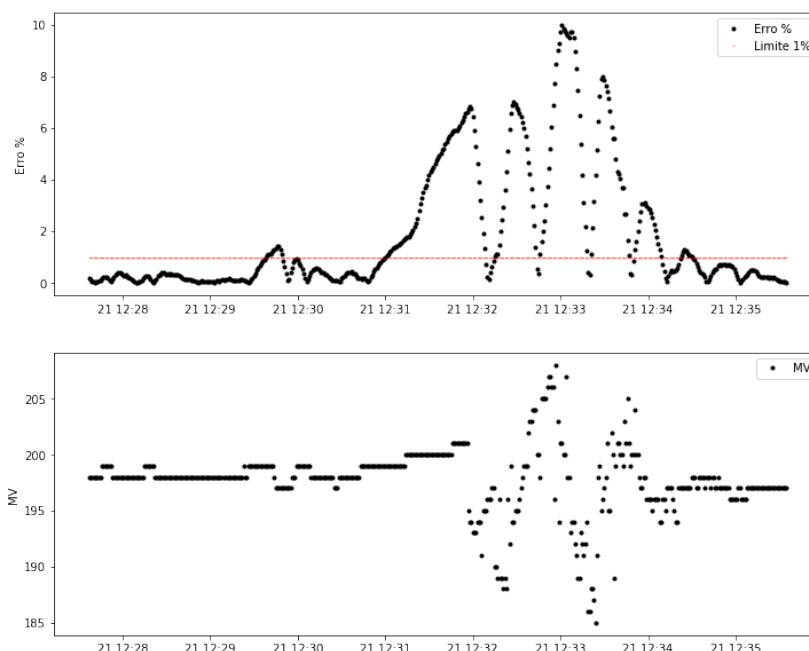
É notável pela Figura 5.10 que a variação do fator de estabilidade ocorreu antes da variação do erro do controle. A partir desses gráficos, estabeleceu-se uma investigação inicial sobre a influência do fator de estabilidade do *link* no erro do controlador.

Nesse seguimento, serão analisados gráficos de outros dois testes.

5.2.2 Teste 02

O teste 02 também apresentou uma alteração da controlador após entrar no regime permanente. Os valores do erro absoluto também ultrapassaram o limite de 1% definido como requisito do sistema, como mostra a Figura 5.11.

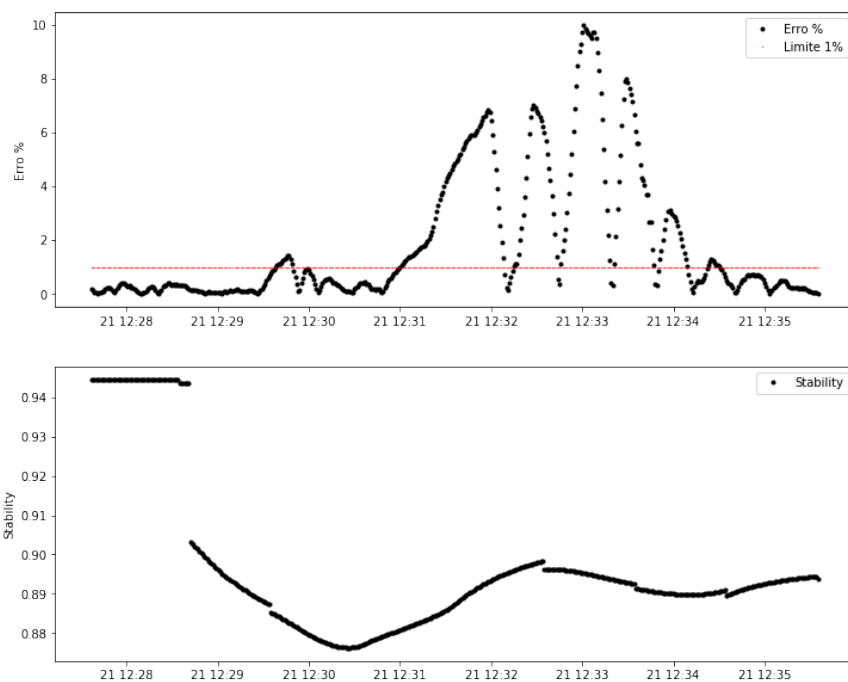
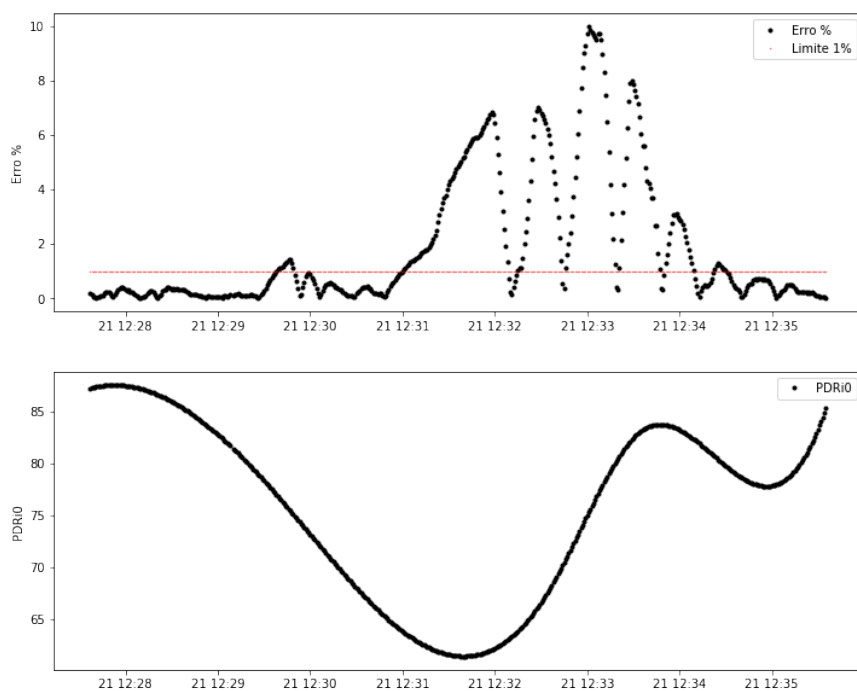
Figura 5.11: Teste 02: Variáveis do controle (PV, SP e MV) no período do teste.



Da mesma forma como ocorreu no teste 01, o fator de estabilidade do *link*, mostrado no primeiro gráfico da Figura 5.12, apresentou uma variação e, após um período, um aumento no erro absoluto em regime do controlador. Esses comportamentos dessas variáveis são apresentados nos gráficos da Figura 5.12.

Uma etapa de análise essencial é a verificação da taxa de pacotes entregues instantânea (PDRi). A relação do PDRi do *link0* com o erro de regime do controle é mostrado nos gráficos da Figura 5.13. Nota-se que a variação do erro do controle ocorre posteriormente à redução da taxa de entregue de pacotes.

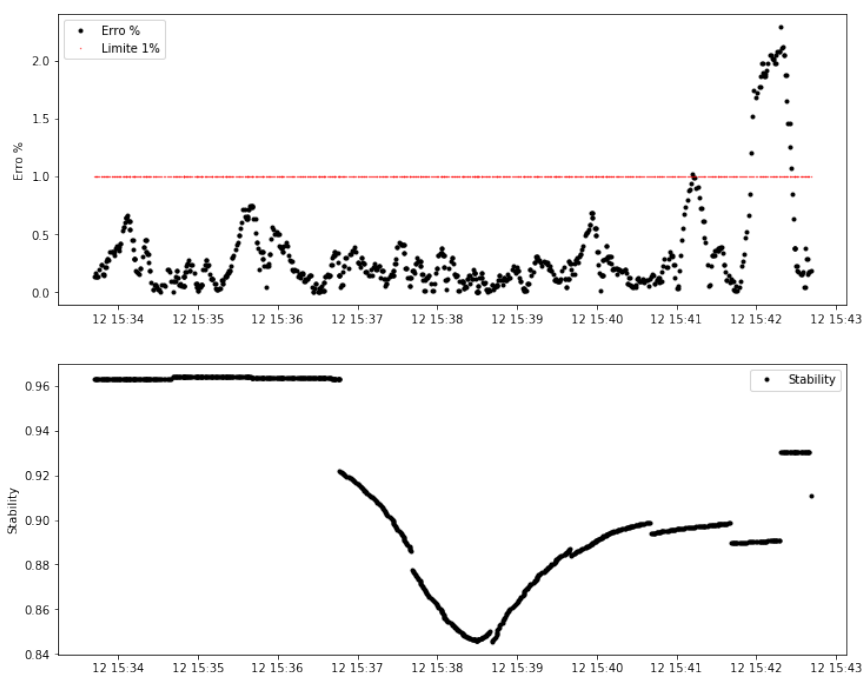
Ao realizar uma análise dos gráficos das Figuras 5.12 e 5.13, considerando o mesmo período de tempo no eixo das abcissas (Tempo), comprova-se que a redução do fator da estabilidade do *link* causa uma variação na taxa de pacotes entregues, que, conseqüentemente, eleva o erro absoluto do sistema de controle.

Figura 5.12: Teste 02: Erro absoluto (%) e Estabilidade do *Link0*.Figura 5.13: Teste 02: Erro absoluto (%) e PDRi *Link0*.

5.2.3 Teste 03

Os resultados obtidos no teste 03 corroboram com a mesma conclusão dos outros testes, como mostra a Figura 5.14. O fator de estabilidade do *link* proporciona um prognóstico, ou até uma previsão, do comportamento do sistema de controle nos próximos minutos.

Figura 5.14: Teste 03: Erro absoluto (%) e Estabilidade do *Link0*.



5.2.4 Síntese dos testes

Com base nas análises dos testes apresentadas, é possível concluir que o fator de estabilidade do *link* permite uma previsão da alteração do erro do sistema de controle.

O segundo gráfico da Figura 5.14 (teste 03) mostra que em aproximadamente 15h36m40s a estabilidade do *link* reduziu para cerca de 0.92 (92%) e continuou diminuindo até cerca de 0.85 (85%). Em aproximadamente 15h41m40s, 5 minutos após a queda do nível de estabilidade, o erro em regime inicia sua ascensão até chegar próximo de 3% de erro.

Os valores de redução do fator de estabilidade e de tempo entre a variação da estabilidade e o aumento do erro são essenciais para utilizar a estabilidade do *link* como um fator decisivo na malha de controle. Assim, uma síntese dos dados dos testes realizados é apresentada na Tabela 5.5.

O quarto parâmetro da Tabela 5.5 contém o valor da mediana da curva de decaimento do fator de estabilidade. Com isso, foi calculado a mediana desses valores contidos na quarta coluna da Tabela 5.5. A mediana dos valores de estabilidade quando ocorre o declínio é de 88%.

Tabela 5.5: Resumo dos dados dos testes.

Teste	Comportamento de previsão	Tempo aproximado de previsão	Faixa de valores do declínio do fator de estabilidade
01	✓	5 min	90% a 86% (Mediana: 88%)
02	✓	3 min	92% a 88% (Mediana: 90%)
03	✓	5 min	92% a 85% (Mediana: 89%)
04	✓	7 min	92% a 87% (Mediana: 89%)
05	✓	7 min	88% a 86% (Mediana: 87%)
06	✓	5 min	62% a 58% (Mediana: 60%)
07	✓	4 min	89% a 86% (Mediana: 88%)
08	✓	3 min	92% a 90% (Mediana: 91%)

5.3 Lógica de Controle baseada na Estabilidade do *Link*

Nos testes prévios realizados na seção anterior, o controlador recebe o valor de PV do sensor LD01 e executa a lógica de controle. Contudo, foram observados período de falhas após uma redução do valor da estabilidade do *link* para, em média, 88%. Como função de ajuste, será considerado um valor de 89% para seleção do *link* adequado.

Conforme detalhado na Figura 5.5, nesta aplicação de controle o valor de PV é selecionado pela função de estabilidade dos *links*. O controlador ESP32 recebe os valores de RSSI dos *links*, armazena os valores, após conversão para mW, em um vetor e calcula os valores de estabilidade desses *links*.

O *link0*, indicado na Figura 5.5, é o caminho preferencial para aquisição do valor de nível (PV1). Porém, se o nível de estabilidade do *link0* estiver igual ou abaixo de 89%, o controlador seleciona o valor de PV do *link* alternativo: *link2*, PV2.

A lista de ações implementadas no controlador são apresentados abaixo.

1. Leitura do valor de PV1 (Módulo: Comunicação Modbus TCP com o *Gateway*);
2. Leitura do valor de PV2 (Módulo: Comunicação Modbus TCP com o *Gateway*);
3. Leitura do valor de SP (Módulo: Comunicação Modbus TCP com o SCADABr);
4. Leitura dos dados dos *links* (Módulo: Comunicação GSAP com o *Gateway*);
5. Cálculo do valor da estabilidade do *link0* (Módulo: Função de Estabilidade);
6. Cálculo do valor da estabilidade do *link2* (Módulo: Função de Estabilidade);
7. Seleção do valor de PV a partir dos valores de estabilidade;
8. Execução do controle PI (Módulo: Controle PI);
9. Envio do sinal de MV, após conversão em um sinal PWM, para a bomba;
10. Atualização dos dados para o sistema de supervisão (Módulo: Modbus TCP com o ScadaBR).

O pseudocódigo 2 apresenta uma síntese das linhas de código implementadas no con-

trolador ESP32 para o controle de nível baseado no fator de estabilidade dos *links*.

Algoritmo 2: Pseudocódigo do código implementado no controlador.

Entrada: listaRSSI[], PDR

Saída: estabilidade

```

1  início
2      PV1 = modbusGW_request(1, 13, 2);
3      PV1 = (double)PV1;
4      PV2 = modbusGW_request(1, 34, 2);
5      PV2 = (double)PV2;
6      SP = (int) modbus_scada.Hreg(HREG_SP);
7      gsap_requestLinks();
8      stability0 = func_stability0();
9      stability2 = func_stability2();
10     if stability0 > 0.89 then
11         |   PV = PV1;
12     else
13         |   PV = PV2;
14     end
15     MV = pidTank.Compute(SP, PV);
16     tensaoPWM = (int)MV;
17     analogWrite(BOMBA, tensaoPWM);
18     update_scadabr();
19 fim

```

Cada linha ou grupo de linhas de códigos realizam uma ação da lista 5.3. Os comandos *modbusGW_request(x, y, z)* nas linhas de código 2 e 4 realizam as requisições das variáveis PV de cada instrumento, onde *x* é o *id* do escravo (comunicação mestre-escravo), *y* é o endereço da variável no mapeamento de memória Modbus do escravo e *z* é o tamanho da variável, sendo sempre múltiplos de 16 bits. Assim, como o escravo da comunicação é o *gateway*, a linha de código 2 realiza a requisição do valor da PV, mapeado na posição 13, com tamanho de 32 bits.

Considerando que, diferente da comunicação do controlador ESP32 com o *gateway*, na comunicação com a aplicação do ScadaBR o controlador atua como escravo e o ScadaBR como mestre. Nesse sentido, o comando *modbus_scada.Hreg(x)* realiza a leitura do valor contido na posição *x* da memória Modbus do próprio controlador ESP32. Essa posição de memória é escrita na aplicação do ScadaBR, ou melhor, pelo operador nos

comandos de escrita Modbus.

A linha de código 7 realiza a aquisição dos dados dos *links* da rede utilizados para gerar o fator de estabilidade dos *links*. Esse comando atualiza as seguintes variáveis globais do código: RSSI0, RSSI1, RSSI2, DPDUTx0, DPDUTxFail0, DPDUTx1, DPDUTxFail1, DPDUTx2 e DPDUTxFail2. Algumas dessas variáveis são utilizadas pela função de estabilidade executada nas linhas de código 8 e 9.

Após a geração dos valores de estabilidade, o trecho entre as linhas de código 10 e 13 garante que o valor do sensor LD01 (PV1) só será utilizado enquanto a estabilidade estiver maior que 89%. Ao contrário, o valor do sensor LD02 será utilizado na execução da malha de controle.

Diante de todas as variáveis de controle, o ESP32 executa controle PI na linha de código 15 e envia o sinal para a bomba (atuador do sistema) na linha de código 17. Ao final, todos os dados da malha de controle e da rede são atualizados na memória Modbus a fim de repassar para aplicação SCADA.

5.4 Resultados: Análise de Desempenho do Controle

Nesta última seção do capítulo de aplicação do sistema de controle baseado no fator de estabilidade dos *links* serão apresentados os resultados da aplicação do sistema mostrado na Figura 5.1.

Ao contrário dos resultados prévios detalhados na seção 5.2, nesta seção o controlador seleciona o melhor valor de PV de acordo com o fator de estabilidade dos *links* do sensor LD01 e do sensor LD02.

É mostrado na Figura 5.15 que o erro absoluto (%) do controlador diminui após um determinado tempo até o final do teste.

Observa-se que a permanência do erro abaixo do valor limite máximo, com baixa variação, garante que a variável manipulada da malha de controle permaneça regulada.

Nesse último teste foram realizados os mesmos procedimentos de atenuação do *link* do sensor de medição do nível, o motivo da permanência do erro abaixo do limite máximo é devido à implementação do algoritmo 2 no controlador do sistema.

Ao detectar valores de estabilidade do *link* igual ou menor que 89%, o controlador altera a escolha do valor de PV. Esse comportamento pode ser observado na Figura 5.16.

O segundo gráfico da Figura 5.16 apresenta através de uma linha vertical de cor vermelha o horário que o controlador detectou um valor de estabilidade menor que 89% e realizou a troca do valor de SP para o segundo *link*. Essa troca impediu que o erro absoluto ultrapassasse o limite como ocorreu nas situações analisadas na seção 5.2.

Assim, a partir dos resultados do uso do fator de estabilidade apresentados neste capítulo, é possível atestar que o modelo proposto é capaz de identificar as instabilidades e prevenir que o controlador entre em estado de falha.

Figura 5.15: Resultado da Malha de Controle baseada na Estabilidade do *link*: Erro absoluto (%) versus MV.

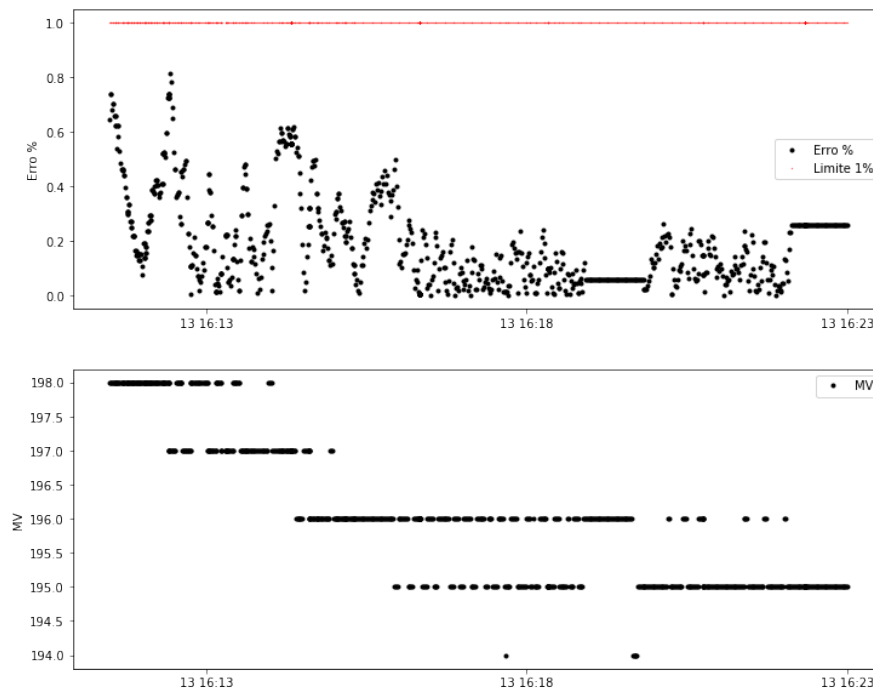
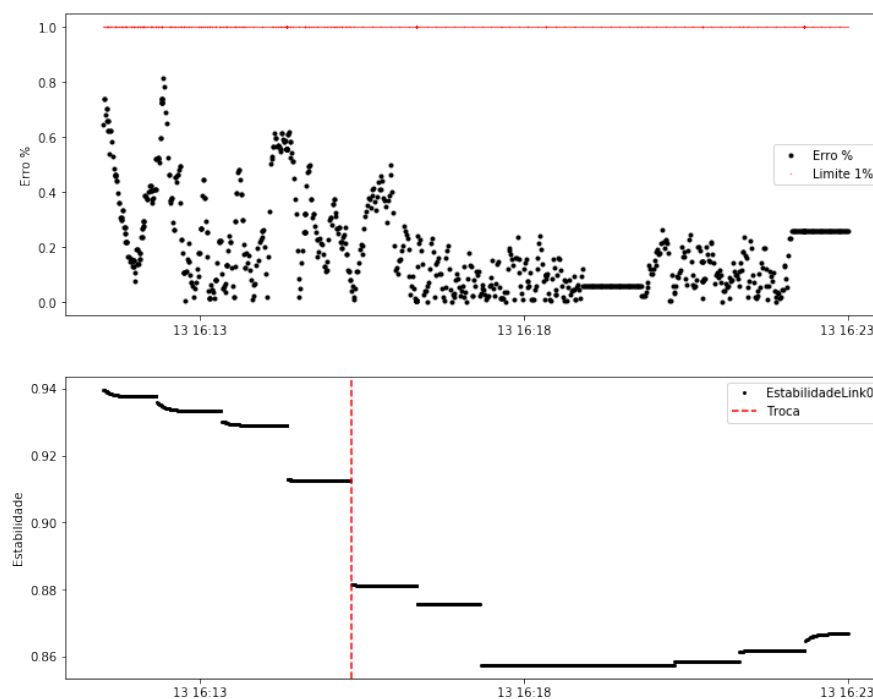


Figura 5.16: Resultado da Malha de Controle baseada na Estabilidade do *link*: Erro absoluto (%) versus Estabilidade do *Link*.



Capítulo 6

Considerações finais

A presente tese apresentou um modelo analítico para avaliação da estabilidade de *links* em redes de sensores sem fio industriais. A principal motivação do trabalho foi a carência de métrica para definição de estabilidade de *links* em redes sem fio aplicadas ao ambiente industrial. A avaliação das estabilidades dos *links* influencia diretamente em diversos outros fatores de desempenho do sistema, como confiabilidade e disponibilidade.

Inicialmente, foi realizado uma pesquisa de trabalhos publicados no período de 2010 a 2018 na área de redes sem fio, objetivando identificar os trabalhos que definem o termo de estabilidade de *links* e os principais parâmetros utilizados na definição da métrica de estabilidade. A partir dessa pesquisa foi possível observar que a maioria dos trabalhos que descrevem a estabilidade como um fator de desempenho das redes sem fio são trabalhos na área de redes móveis. Constatou-se apenas um trabalho na área de redes de sensores sem fio.

Os elementos de uma rede de sensores sem fio no ambiente industrial apresentam, em sua grande maioria, localização fixa nos pontos de medição e atuação da planta. Com isso, o índice de mobilidade desses nós nas redes industriais é baixo. Nesse contexto, o conceito de mobilidade utilizado nas redes móveis foi personalizado para as redes de sensores sem fio industriais através da caracterização da variação da potência dos sinais dos *links*.

A taxa de entrega de pacotes é um parâmetro essencial para a identificação do comportamento prévio do *link*, porém a taxa unicamente não é suficiente para representar o desempenho do *link*. Nesse sentido, após análise dos parâmetros utilizados nos trabalhos relacionados, foi desenvolvido o modelo analítico da estabilidade de *link* baseado na variação da intensidade do sinal recebido e na taxa de entrega de pacotes. A variação é calculada a partir de uma razão do RSS que relaciona o quão distante a intensidade do sinal está do melhor valor de nível de sinal alcançado na janela de amostras. A razão foi aplicada às medidas de variância e média móvel exponencial para ajustar a representação do comportamento de estabilidade do *link*.

A partir de dados reais coletados de redes ISA 100.11a, os resultados experimentais mostraram que o fator desenvolvido no modelo analítico conseguiu detectar as situações de instabilidades dos *links*. Além disso, diante dos dados dos três cenários observados, torna-se claro que uma análise baseada apenas no fator PDR não é suficiente para identificar essas irregularidades na comunicação. Contudo, não foi possível comparar o modelo

com outros devido à ausência de modelos aplicados às redes industriais e de ferramentas de simulação.

Uma segunda etapa desta tese foi o desenvolvimento de um sistema de controle em rede sem fio, na qual o controlador emprega o modelo de estabilidade de *links* desenvolvido para escolher o valor adequado da variável de processo. A aplicação foi implementada com o intuito de validar o modelo proposto e analisado nesta tese. Os resultados obtidos nessa etapa de aplicação do fator de estabilidade no sistema de controle de nível constatou que o fator consegue detectar irregularidades nos enlaces de comunicação e, se utilizado na escolha dos valores de medição em uma rede redundante, garantir o desempenho adequado da malha de controle.

Dependendo do tamanho da janela de amostras definido no algoritmo do modelo, o tempo de processamento e o uso da memória pode aumentar. No entanto, recomenda-se que o modelo analítico seja implementado no próprio gerente da rede. As versões comerciais dos *gateway* que incorporam os gerentes de rede e de segurança apresentam unidades com alta capacidade de processamento computacional para executar todas as tarefas da rede. Desde a coleta de informações dos nós da rede, a formação de *links*, até as tarefas de escalonamento e roteamento já são executadas pelo gerente. Nesse sentido, torna-se viável e adequada a execução do modelo para gerar o fator de estabilidade dos *links* nos equipamentos disponíveis no mercado.

6.1 Contribuições

Quando se restringe a pesquisas com redes de sensores sem fio industriais, o modelo proposto traz contribuições originais destacadas a seguir:

- Através da revisão bibliográfica, a primeira contribuição é um estudo atualizado dos principais parâmetros utilizados para definição da estabilidade de *link*.
- A partir da revisão bibliográfica identificou que não existe a definição do fator de estabilidade do *link* em trabalhos na área de redes de sensores sem fio industriais. Assim, a principal contribuição original desta tese é o desenvolvimento do modelo de estabilidade.
- Por fim, a implantação de um sistema de controle em rede sem fio baseado na estabilidade dos *links* é a última contribuição.

6.2 Trabalhos desenvolvidos

O desenvolvimento da tese contribuiu direta ou indiretamente para a publicação dos seguintes trabalhos:

Conferências

- **FLORENCIO, Heitor**; NETO, Adrião Dória. Probabilistic Inference of the Packet Delivery Ratio in Industrial Wireless Sensor Networks. In: 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE, 2018. p. 1-8.

- ARAUJO JUNIOR, Sidnei; **FLORENCIO, Heitor**; et al. Avaliação de Sistema de Controle em Redes Industriais Sem Fio ISA 100.11a. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI). 2019.

Capítulo de livro

- SANTOS, A. C. S. ; MARTINS, D. L. ; **FLORENCIO, H. M.** ; MELO, J. D. ; DÓRIA NETO, A. D. . Optimal Placement of Routers in Industrial Wireless Networks Based on Multi-Objectives. In: Eduardo Paciencia Godoy. (Org.). Networked Control Systems: Research Challenges and Advances for Application. 1ed.New York: Nova Science Publishers, 2018, v. 1, p. 85-116.

Revista

- **FLORENCIO, Heitor**; DORIA NETO, Adrião. Method for Link Stability Evaluation of Industrial Wireless Sensor Networks (ISA 100.11a). Przegląd Elektrotechniczny, v. 95, n. 11, p. 176-183, 2019.

6.3 Propostas de Trabalhos Futuros

Como continuidade dos estudos realizados nesta tese de doutorado, as seguintes propostas de trabalhos futuros são sugeridas:

- Adaptar o modelo analítico para considerar situações em que existe alta variação no nível do sinal mas o valor mediano não causa falha de pacotes.
- Aplicar o modelo analítico em um algoritmo de previsão para identificar falha total do *link* de comunicação.
- Desenvolver um modelo de estabilidade da rede como um todo a partir das estabilidades dos *links*.

Referências Bibliográficas

- Al-Qudah, Zakaria, Mohammad Alsarayreh, Ibrahim Jomhawy & Michael Rabinovich (2016), Internet path stability: Exploring the impact of mpls deployment, *em* '2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)', IEEE, pp. 1–7.
- Boukerche, Azzedine, Rodolfo WL Coutinho & Xiangshen Yu (2017), Lisic: A link stability-based protocol for vehicular information-centric networks, *em* '2017 IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)', IEEE, pp. 233–240.
- Brahmbhatt, Sachi, Aishwary Kulshrestha & Gaurav Singal (2015), Sslsm: signal strength based link stability estimation in manets, *em* '2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)', IEEE, pp. 173–177.
- Chama, Namusale, Rute C Sofia & Susana Sargento (2013), Multihop mobility metrics based on link stability., *em* 'AINA Workshops', pp. 809–816.
- da Silva, Ivanovitch Medeiros Dantas (2013), Uma Metodologia para Modelagem e Avaliação da Dependabilidade de Redes Industriais Sem Fio, Tese de doutorado, UFRN, Natal, RN.
- De Rango, Floriano, Francesca Guerriero & Peppino Fazio (2010), 'Link-stability and energy aware routing protocol in distributed wireless networks', *IEEE Transactions on Parallel and Distributed systems* **23**(4), 713–726.
- Gulati, Mandeep Kaur & Krishan Kumar (2014), Survey of stability based routing protocols in mobile ad-hoc networks, *em* 'ICCCS International Conference on Communication, Computing & Systems, Macau', Vol. 23, pp. 100–105.
- Idoudi, Hanen, Oumaima Ben Abderrahim & Khalil Mabrouk (2016), Generic links and paths stability model for mobile ad hoc networks, *em* '2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)', IEEE, pp. 394–398.
- IEC, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (2010), 'Iec 62591: Industrial communication networks - wireless communication network and communication profiles - wirelesshart', *IEC* .

- IEC, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (2012), 'Iec 62734: Industrial communication networks - wireless communication network and communication profiles - isa 100.11a', *IEC* .
- Li, Xianfeng & Jiaojiao Yan (2017), Lepr: Link stability estimation-based preemptive routing protocol for flying ad hoc networks, *em* '2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)', IEEE, pp. 1079–1084.
- Modbus, IDA (2012), 'Modbus application protocol specification v1.1b3', *North Grafton, Massachusetts (www.modbus.org)* .
- Nobre, Marcelo Henrique Ramalho (2015), Contribuições em Escalonamento e Análise de Desempenho de Redes WirelessHART, Tese de doutorado, UFRN, Natal, RN.
- Patil, Rohit B & Ashwini B Patil (2015), Energy, link stability and queue aware olsr for mobile ad hoc network, *em* '2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)', IEEE, pp. 1020–1025.
- Priya, Divya et al (2017), An energy efficient link stability based routing scheme for wireless sensor networks, *em* '2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)', IEEE, pp. 1828–1832.
- Sha, Mo, Dolvara Gunatilaka, Chengjie Wu & Chenyang Lu (2015), Implementation and experimentation of industrial wireless sensor-actuator network protocols, *em* 'European Conference on Wireless Sensor Networks', Springer, pp. 234–241.
- Sha, Mo, Dolvara Gunatilaka, Chengjie Wu & Chenyang Lu (2017), 'Empirical study and enhancements of industrial wireless sensor-actuator network protocols', *IEEE Internet of Things Journal* **4**(3), 696–704.
- Sharma, Shubham & Deepak Pathak (2015), Energy aware path formation with link stability in wireless adhoc network, *em* '2015 International Conference on Advances in Computer Engineering and Applications', IEEE, pp. 826–831.
- Sun, Jianzhen, Yuan'an Liu, Hefei Hu & Dongming Yuan (2010), Link stability based routing in mobile ad hoc networks, *em* '2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications', IEEE, pp. 1821–1825.
- Systems, Espressif (2020), 'Esp32 series: Datasheet', *Reference ESP32-V3* .
- Tipsuwan, Yodyium & Mo-Yuen Chow (2003), 'Control methodologies in networked control systems', *Control engineering practice* **11**(10), 1099–1111.
- Wang, Quan & Jin Jiang (2016), 'Comparative examination on architecture and protocol of industrial wireless sensor network standards', *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS TUTORIALS* **18**(3), 2197–2219.

- Wang, Shiqiang, Qingyang Song, Jianxin Feng & Xingwei Wang (2010), Predicting the link stability based on link connectivity changes in mobile ad hoc networks, *em* ‘2010 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security’, IEEE, pp. 409–414.
- Wenqing, Lei (2011), Path stability based source routing in mobile ad hoc networks, *em* ‘Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)’, Vol. 1, pp. 774–778.
- Willig, Andreas, Kirsten Matheus & Adam Wolisz (2005), ‘Wireless technology in industrial networks’, *Proceedings of the IEEE* **93**(6), 1130–1151.
- Wu, Chenshu, Zheng Yang, Yunhao Liu & Wei Xi (2012), ‘Will: Wireless indoor localization without site survey’, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* **24**(4), 839–848.
- Zhang, Jian, David B Smith, Leif W Hanlen, Dino Miniutti, David Rodda & Ben Gilbert (2008), ‘Stability of narrowband dynamic body area channel’, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **8**, 53–56.
- Zhang, Zhiyong, Zhiping Jia & Hui Xia (2012), Link stability evaluation and stability based multicast routing protocol in mobile ad hoc networks, *em* ‘2012 IEEE 11th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications’, IEEE, pp. 1570–1577.
- Zou, Yuanyuan & Yang Tao (2012), A method of selecting path based on neighbor stability in ad hoc network, *em* ‘2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)’, Vol. 2, IEEE, pp. 675–678.