

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

ALCEO CARTA NETO

**ESTIMATIVA DA CONFIABILIDADE DA COMUNICAÇÃO
DE REDES DE SENSORES SEM FIO WIRELESSHART**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2013

ALCEO CARTA NETO

**ESTIMATIVA DA CONFIABILIDADE DA COMUNICAÇÃO
DE REDES DE SENSORES SEM FIO WIRELESSHART**

Proposta de projeto de pesquisa,
apresentada ao Curso de Especialização
em Engenharia da Confiabilidade da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. MSc. Carlos Henrique
Mariano
Co-orientador: Eng. Claudio Caiani Spanó
(Reliasoft Brasil)

CURITIBA
2013

RESUMO

CARTA NETO, Alceo. Estimativa da Confiabilidade da Comunicação de Redes de Sensores Sem Fio WirelessHART. 2014. 33f. Monografia de Especialização (Especialização em Engenharia da Confiabilidade). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

Redes de sensores sem fio são utilizadas na indústria para monitoramento de variáveis de processo, como por exemplo, temperatura, pressão, nível e vazão. Este trabalho apresenta a aplicação de regressão logística múltipla para estimativa da confiabilidade da comunicação entre sensores sem fio em redes industriais padrão WirelessHART. Os parâmetros de qualidade do sinal – Estabilidade e RSSI (indicador de potência do sinal recebido) foram considerados como preditores. Ambos mostraram-se importantes para estimar a confiabilidade da comunicação.

Palavras chave: Redes de Sensores Sem Fio. WirelessHART. Regressão Logística.

TERMO DE APROVAÇÃO

ESTIMATIVA DA CONFIABILIDADE DA COMUNICAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO WIRELESSHART

Esta monografia foi apresentada às h. min, do dia de fevereiro de 2014, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade– Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato apresentou o trabalho para a Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho

.....
(aprovado, aprovado com restrições, reprovado)

.....
Prof. MSc. xxxxxxx
(UTFPR)

.....
Prof. MSc. yyyyyyy
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

.....
Prof. Dr. Emerson Rigoni
Coordenador do Curso de Especialização em
Engenharia da Confiabilidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	JUSTIFICATIVA	7
1.2	OBJETIVOS	7
1.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	8
1.4	EMBASAMENTO TEÓRICO	8
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2	REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1	HISTÓRICO DA TRANSMISSÃO DE SINAIS NA INDÚSTRIA DE PROCESSO	10
2.1.1	TRANSMISSÃO PNEUMÁTICA	10
2.1.2	TRANSMISSÃO ANALÓGICA	11
2.1.3	TRANSMISSÃO DIGITAL E REDES DE CAMPO	11
2.1.4	REDES DE SENSORES SEM FIO	12
2.2	O PADRÃO WIRELESSHART	14
3	METODOLOGIA	20
3.1	AQUISIÇÃO DOS DADOS	20
3.2	REGRESSÃO LOGÍSTICA MÚLTIPLA	21
3.2.1	Ajuste do modelo de regressão logística múltipla	22
3.2.2	Teste de significância do modelo	23
3.2.3	Intervalos de confiança	23
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	25
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	29
	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de transmissão de dados sem fio tiveram grande evolução no século XXI (RACKLEY apud RIEGO, 2009, p. 18). Estas tecnologias passaram a ser utilizadas na indústria de processos, como por exemplo, no monitoramento de poços petrolíferos terrestres (SILVA, 2008). A evolução dos rádios digitais permitiu o desenvolvimento das redes de sensores sem fio (Wireless Sensor Network – WSN), que têm como uma das aplicações o monitoramento de variáveis de processo tais como temperatura, pressão, nível e vazão (ZHAO, 2011).

A utilização das redes de sensores sem fio é bastante promissora (SILVA et al., 2012), entretanto demanda uma avaliação criteriosa de aspectos não presentes na comunicação com fio, tais como topologias a serem utilizadas, redundância de caminhos e segurança de rede. A instalação destas redes geralmente demanda uma avaliação de campo (*site survey*) antes da instalação, a fim de antecipar problemas de comunicação que levam à perda de informação (ZHAO, 2011).

Os principais protocolos de comunicação sem fio aplicados à indústria de processos são: WirelessHART, desenvolvido pela Hart Foundation e reconhecido internacionalmente pela norma IEC 62591 e o protocolo ISA 100.11a, definido pela International Society of Automation – ISA (ZHAO, 2011). Ambos utilizam na camada física (Physical Layer – PHY), e de controle de acesso (Medium Access Control – MAC), o protocolo IEEE 802.15.4 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2011).

As redes de sensores sem fio industriais são compostas basicamente por instrumentos de medição providos de alimentação e rádio para comunicação e um elemento central que estabelece comunicação com o Sistema de Supervisão e Controle (SSC), denominado *Gateway* ou *Multi-Node*. Os instrumentos podem ainda atuar como roteadores na rede, encaminhando dados de outros instrumentos até o *Gateway*. A figura 1 apresenta um exemplo de rede de sensores sem fio.

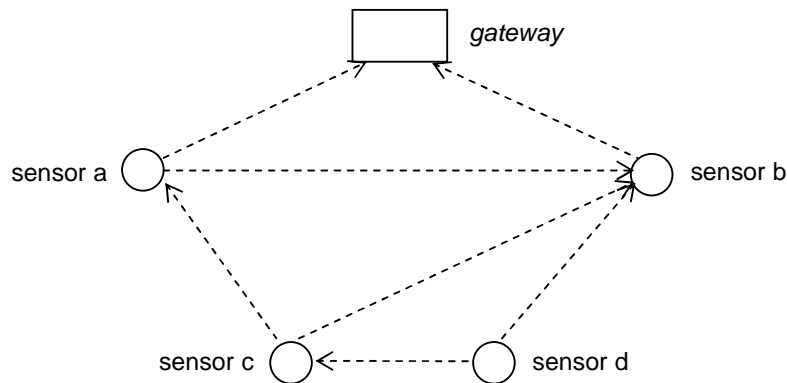


Figura 1 – Exemplo de rede de sensores sem fio.
Fonte: Autoria Própria (2014)

Portanto, a confiabilidade de que a informação de um instrumento (dado de processo) será entregue ao SSC depende do próprio instrumento, do *gateway*, dos instrumentos roteadores que fazem parte da rota de comunicação, além da confiabilidade dos caminhos de comunicação estabelecidos entre os elementos da rede e redundâncias. O objetivo do trabalho está relacionado à obtenção de uma estimativa desta confiabilidade.

Dada a complexidade de se estabelecer a confiabilidade de uma rede de sensores sem fio, este trabalho se limitará em analisar a confiabilidade do caminho de comunicação estabelecido entre o *gateway* e um instrumento. A rede simplificada utilizada neste trabalho é ilustrada na figura 2.

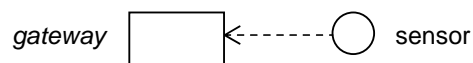


Figura 2 – Rede utilizada
Fonte: Autoria Própria (2014)

A função de um instrumento em uma indústria é a medição de uma variável de processo (temperatura, pressão, entre outras). A disponibilidade da medição é desejável durante toda a campanha de uma unidade de processo. As grandezas medidas em diferentes pontos de uma unidade possuem criticidades diferentes, de acordo com sua importância para o processo. Sendo assim, grandezas mais críticas geralmente possuem requisitos de confiabilidade mais restritivos que as menos críticas, pois são mais importantes para tomada de decisão dos operadores.

A confiabilidade de uma variável transmitida em uma rede sem fio depende, entre outros fatores, da confiabilidade dos *links* de comunicação até o *gateway*. Neste contexto, é proposto o seguinte problema de pesquisa: como estimar, considerando parâmetros disponíveis e relativos à transmissão, a confiabilidade da comunicação entre os elementos da rede WirelessHART?

A confiabilidade da comunicação entre elementos de uma rede de sensores sem fio industrial pode decair temporariamente por fatores externos transitórios, como por exemplo interferência eletromagnética, levando a falhas transitórias. Já falhas permanentes afetam diretamente os dispositivos e têm sua origem em problemas de hardware (SILVA et al, 2012, p. 807).

1.1 JUSTIFICATIVA

Falhas transitórias podem acarretar em uma diminuição da confiabilidade em um intervalo de tempo, levando à perda de atualizações da variável de processo. Possíveis conseqüências dessa perda de atualizações são o possível congelamento do valor medido para a operação, ou até à queda da comunicação entre o instrumento e o *gateway*. Ambas situações não são desejáveis, pois afetam a tomada de decisão dos operadores, com impacto na segurança operacional.

1.2 OBJETIVOS

Dada uma rede simplificada de sensores sem fio WirelessHART, composta por um *gateway* e um instrumento, o objetivo do trabalho é estimar a confiabilidade da comunicação entre os elementos da rede a partir de parâmetros de qualidade do link.

Esta metodologia tem como pré-requisitos a medição e disponibilização dos parâmetros relativos à comunicação dos elementos da rede pelo sistema. Será necessário cumprir as seguintes etapas:

- Historiar periodicamente dados relativos ao *link* de transmissão durante operação normal da rede objeto deste estudo.
- Aplicar o modelo de regressão proposto.
- Estimar a confiabilidade em função dos parâmetros preditores e suas respectivas relevâncias para o modelo.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta proposta de pesquisa é de natureza aplicada (ORGANISATION DE COOPERATION ET DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUES, 2002, p. 34), cujo interesse é adquirir conhecimento específico sobre a confiabilidade da comunicação entre elementos de um sistema industrial de sensores sem fio padrão WirelessHART.

Trata-se de pesquisa de campo, de caráter explicativo, visando estabelecer uma metodologia para estudo da confiabilidade da comunicação entre dois dispositivos, em um determinado contexto (ORGANISATION DE COOPERATION ET DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUES, 2002).

Após a aplicação do modelo de regressão proposto, será possível avaliar sua aderência aos dados de confiabilidade observados.

1.4 EMBASAMENTO TEÓRICO

A transmissão de sinais através de redes de sensores sem fio apresenta-se como a evolução das redes industriais de campo. Este trabalho busca apresentar o histórico desta evolução, bem como os aspectos desta tecnologia de transmissão quanto à sua confiabilidade, baseando-se em Considine (1974, 1985), Riego (2009), Silva(2008), Silva et al. (2012) e Zhao (2011), porém com foco em um componente específico destas redes.

Este trabalho aplica aos links de comunicação entre o gateway e instrumentos destas redes. A atualização da variável de processo nestas redes é discreta, com taxa de atualização configurável pelo usuário. Uma atualização pode ser bem sucedida ou mal sucedida, configurando-se portanto como uma variável dicotômica. A confiabilidade em um intervalo de tempo pode ser definida como a razão entre a quantidade de atualizações bem sucedidas e a quantidade total de atualizações esperadas.

O objetivo principal de uma análise de regressão é encontrar um modelo que descreva o relacionamento entre uma variável resposta e um conjunto de variáveis preditoras (ou explanatórias) independentes.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será dividido em cinco capítulos, sendo que o primeiro capítulo apresentará uma breve descrição sobre o tema.

No capítulo 2 serão apresentados um breve histórico da transmissão de dados na indústria de processo, bem como as características mais importantes do protocolo de comunicação WirelessHART.

O capítulo 3 apresenta a metodologia e procedimentos adotados.

Em seguida, o capítulo 4 apresenta os resultados da análise de regressão para estimativa da confiabilidade da comunicação em redes de sensores sem fio, objetivo do trabalho de conclusão de curso.

Finalmente, o capítulo 5 apresentará as conclusões do trabalho, seguido das referências utilizadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 HISTÓRICO DA TRANSMISSÃO DE SINAIS NA INDÚSTRIA DE PROCESSO

Até 1940, a operação nas indústrias de processo era local, com operadores trabalhando de forma descentralizada (RIEGO, 2009, p. 24). Com a introdução da teoria da transmissão de sinais, que consiste basicamente em um transmissor e um receptor (CONSIDINE, 1985, p.16.27 apud RIEGO, 2009, p.25), permitiu-se a centralização das operações de controle e monitoramento da planta em um único local.

A figura 3 ilustra a evolução da transmissão de sinais de campo, iniciando com a transmissão pneumática, evoluindo para a tecnologia analógica, digital, redes de campo e finalmente para as redes de sensores sem fio.

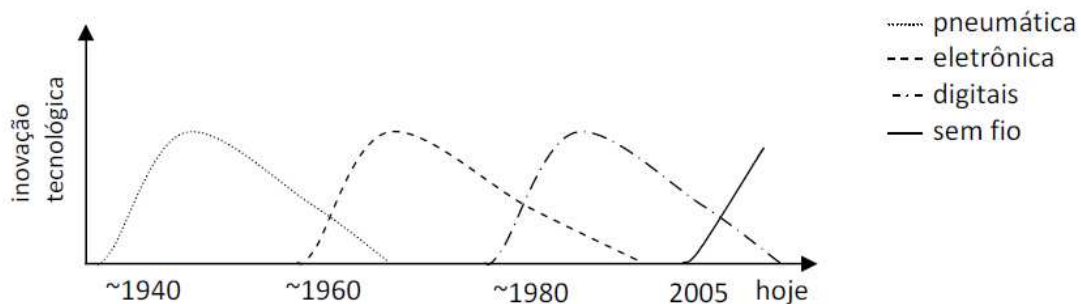


Figura 3 – Evolução das tecnologias de transmissão
 Fonte: Riego, 2009, p.26

2.1.1 TRANSMISSÃO PNEUMÁTICA

Foi o primeiro método de transmissão aplicado na indústria de processo (RIEGO, 2009, p.26).

Sistemas Pneumáticos de transmissão consistem em uma fonte de ar comprimido, um transmissor que modula o suprimento de ar, “tubing” ou tubulação para carregar o sinal pneumático modulado ao ponto receptor, e um ou mais receptores conectados em paralelo (CONSIDINE, 1974, p.16.3).

Com o desenvolvimento da tecnologia, diversos padrões de sinais surgiram, sendo os sinais de 3 a 15 psig e de 3 a 27 psig padronizados pela norma ISA S7.4, em 1981.

2.1.2 TRANSMISSÃO ANALÓGICA

Devido à evolução no campo da eletrônica, a tecnologia de transmissão analógica de sinais de corrente ou tensão passou a ser utilizada, utilizando um par de fios. Surgiram então instrumentos a dois fios, três fios e quatro fios, sendo que no primeiro a alimentação e transmissão do sinal são realizadas pelo mesmo condutor, no segundo a alimentação e transmissão são realizadas por condutores distintos, porém com retorno comum, e no último a alimentação e transmissão do sinal medido são separadas (RIEGO, 2009, p.29). Trata-se de transmissão ponto a ponto, ou seja, para cada variável medida é necessário um par de fios interligando o SSC ao instrumento.

Com o desenvolvimento da tecnologia, diversos padrões de sinais surgiram, sendo o mais utilizado o sinal de corrente de 4 a 20 mA, padronizado pela ISA SP-50 em 1975 (RIEGO, 2009, p.29).

2.1.3 TRANSMISSÃO DIGITAL E REDES DE CAMPO

Com o avanço da eletrônica, foi desenvolvido no início dos anos 80 o protocolo HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) pela empresa Rosemount Inc. Trata-se de um sinal digital superimposto ao sinal de transmissão analógico de 4 a 20 mA. Em 1993 foi criada a HART Communication Foundation para prover suporte e continuar o desenvolvimento da tecnologia (ZHANG, 2008, p.377). O protocolo HART é reconhecido como o padrão industrial para instrumentação analógica com comunicação digital superimposta (ZHANG, 2008, p.406).

A utilização do HART permite a configuração, leitura remota de diagnósticos e detecção de problemas dos sensores, sendo um importante recurso para manutenção da disponibilidade das plantas industriais (ZHANG, 2008, p.378).

Posteriormente, surgiram as redes de campo, com destaque para os padrões Foundation Fieldbus, Profibus-PA e Modbus RTU na indústria de processos.

Algumas características do Foundation Fieldbus: segurança intrínseca para uso em área classificada, dispositivos alimentados pelo barramento, topologia em barramento ou em árvore, suporte a múltiplos mestres, comportamento determinístico, transferência de dados distribuída, blocos padronizados possibilitando interfaces uniformes (SAMSON, 2000, p. 8).

Características importantes do Profibus-PA: segurança intrínseca, dispositivos alimentados pelo barramento, transmissão de dados confiável e interoperabilidade (funções padronizadas) (SAMSON, 2000, p. 8). Um estudo conduzido pela NAMUR, uma associação internacional de usuários de tecnologias de automação em indústrias de processo, mostrou que o Profibus-PA pode alcançar uma redução de custo de mais de 40% em planejamento, cabeamento e manutenção, conforme ilustrado na figura 4 (SAMSON, 1999, p. 10).

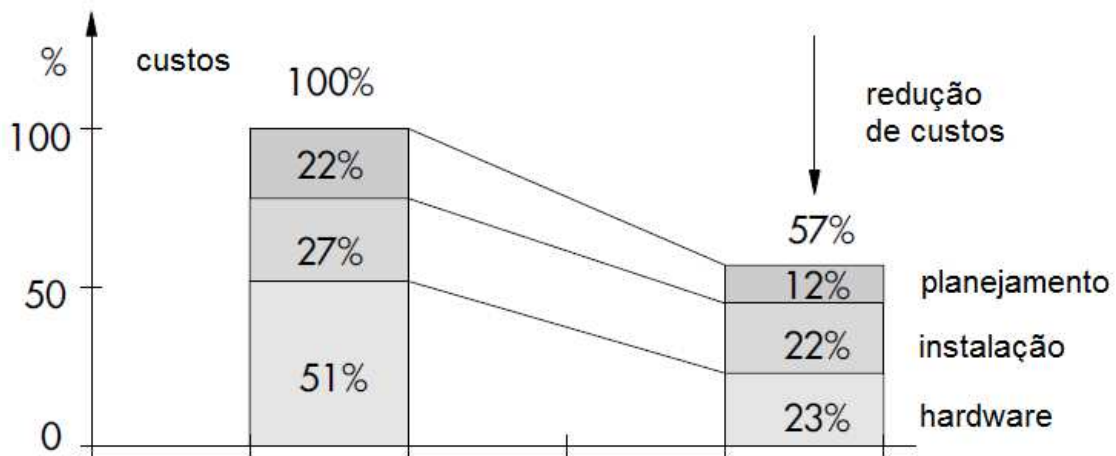


Figura 4 – Redução de custos pelo emprego de redes de campo
 Fonte: Adaptado de Samson, 1999, p.10

2.1.4 REDES DE SENSORES SEM FIO

Os avanços da tecnologia, como microcontroladores de baixo consumo, rádios encapsulados em circuitos integrados, protocolos de rede ad-hoc e sistemas operacionais otimizados para sistemas embarcados possibilitaram o desenvolvimento das redes de sensores sem fio (PAALOVA, 2007, p. 13). Uma das principais aplicações é o monitoramento na indústria (CULLER et al, 2004, p. 42).

De modo geral, as redes possuem o desafio de operar por longos períodos de tempo com energia limitada. Para minimizar o consumo, diversos componentes dos dispositivos, inclusive o rádio, são desligados durante a maior parte do tempo, sendo religados conforme a necessidade de transmissão (CULLER et al, 2004, p. 41). A comunicação é geralmente a atividade que mais consome energia, portanto o protocolo tende a minimizar a comunicação ou desligar o rádio em períodos desnecessários. (CULLER et al, 2004, p. 47). A miniaturização dos circuitos integrados contribui para o aumento da eficiência, diminuindo o consumo (CULLER et al, 2004, p. 46).

Um nó da rede é composto por um microcontrolador, dispositivo de armazenamento de dados, sensores, conversores analógico-digitais, rádio e uma fonte de energia, usualmente uma bateria (CULLER et al, 2004, p. 46). Em uma rede de alta densidade a interação entre os nós é grande, dificultando o gerenciamento da rede para o protocolo de comunicação (CULLER et al, 2004, p. 41).

Uma rede consiste de vários nós conectados entre si. A informação é transmitida através de saltos entre os nós, desde o ponto gerador até o ponto central. Ao trocar informações, um nó descobre os nós adjacentes (vizinhos), possibilitando ao algoritmo de controle determinar as rotas, adaptando-se ao ambiente (CULLER et al, 2004, p. 46).

Nas redes de sensores sem fio industriais, sensores e atuadores se comunicam através de antenas com um ponto de acesso (por exemplo, um gateway), o qual está conectado ao SSC (ZHAO, 2011, p.48).

As redes de sensores sem fio industriais baseiam-se em diversos padrões. Quanto às camadas mais baixas, o padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011) é o mais utilizado (SILVA et al., 2012, p. 811). Quanto à implementação das camadas mais altas, os padrões WirelessHART, descrito brevemente no subitem 2.2, e ISA 100.11a são adequados para utilização em ambiente industrial (SILVA et al., 2012, p. 811).

Estas redes podem ser configuradas em diversas topologias, como por exemplo: Estrela, Ponto a Ponto (*Mesh*) ou em *Árvore (Cluster)*, conforme mostrado na figura 5.

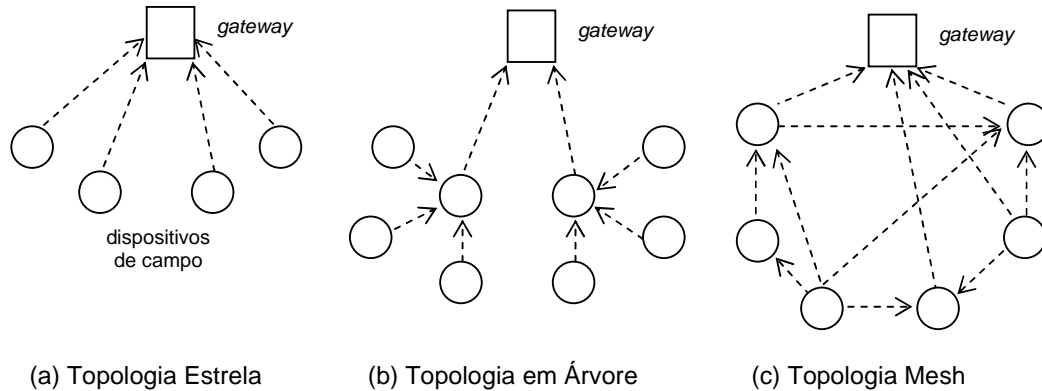


Figura 5 – Exemplos de topologias de redes de campo
Fonte: Autoria própria (2014)

Na topologia estrela o gateway comunica diretamente com todos os dispositivos da rede. Trata-se de uma topologia simples, apropriada para aplicações menores. Na topologia mesh todos os dispositivos possuem capacidade de roteamento, provendo uma série de caminhos redundantes para a informação, aumentando a robustez. Já a topologia em Árvore possui alguns dispositivos com capacidade de roteamento, que provêm um caminho para os demais dispositivos da rede (ZHANG, 2008, p.382-383).

Em redes industriais, a confiabilidade e área de cobertura podem ser afetadas por ruídos, propagação por múltiplos caminhos, utilização da banda de comunicação por outros equipamentos, além de fatores ambientais, como temperatura, vibração, entre outros (LOW et al, 2005, p. 275). Entretanto, o uso de técnicas de modulação de rádio pode reduzir o efeito dessas interferências (LOW et al, 2005, p. 275).

Outros desafios para essas redes são o gerenciamento de energia e segurança. Os sensores são geralmente alimentados por baterias, portanto é desejável um baixo consumo de energia. Existem também preocupações quanto à segurança, pois os dados transmitidos podem ser facilmente captados, necessitando de algoritmos robustos de autenticação e codificação (LOW et al, 2005, p. 276).

2.2 O PADRÃO WIRELESSHART

O protocolo WirelessHART é o primeiro padrão aberto de comunicação sem fio desenvolvido para atender as necessidades de robustez, segurança e confiabilidade da indústria de processo (ZHANG, 2008, p.382). Trata-se de um

padrão aprovado pela IEC (62591) que define uma rede *mesh* auto-organizável (EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2012, p.7)

A rede wirelessHart é composta por dispositivos de campo (sensores) e pelo menos um gateway e um gerenciador de rede. Os tipos de dispositivos definidos pela norma são ilustrados na figura 6.

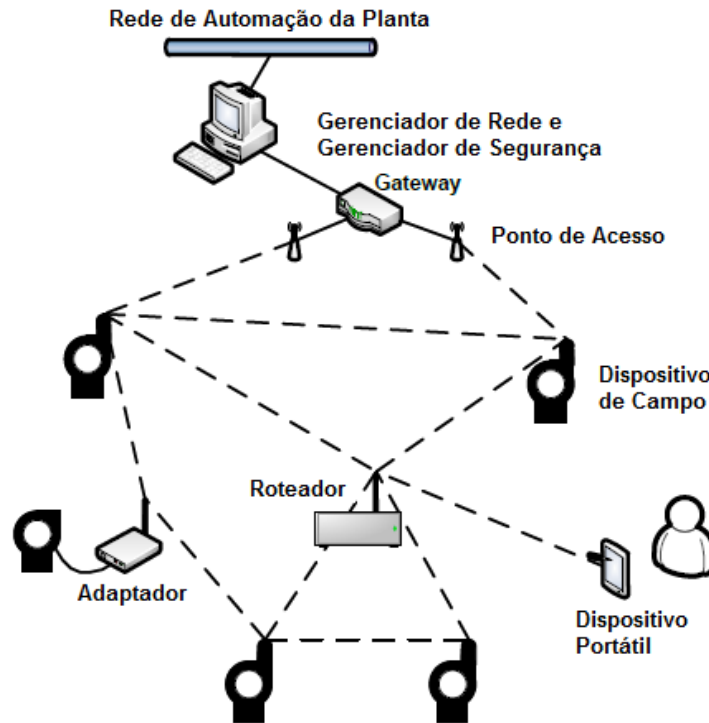


Figura 6 – Tipos de dispositivos da rede WirelessHART
 Fonte: Adaptado de Silva et al, 2012, p.812

O gerenciador de rede é o núcleo da rede WirelessHART. É responsável pelo estabelecimento e escalonamento da comunicação com os dispositivos de campo, roteamento e monitoramento da rede (ZHANG, 2008, p.382-383; SILVA et al., 2012, p. 812).

O gateway é responsável pela conexão entre a rede WirelessHART e a rede de automação da planta, atuando como um ponto central de toda comunicação sem fio. Este tráfego ocorre através de pontos de acesso instalados no gateway (SILVA et al., 2012, p.812).

Os dispositivos de campo são os dispositivos mais básicos da rede, diretamente conectados ao processo para medição de variáveis. Podem ser alimentados através de bateria ou cabo (SILVA et al., 2012, p.812).

Os adaptadores são dispositivos que agregam podem ser interligados a instrumentos HART, agregando a estes capacidade de transmissão sem fio (ZHANG, 2008, p.382-383). Dispositivos portáteis são utilizados durante as fases de configuração, comissionamento e manutenção de dispositivos de campo (ZHANG, 2008, p.382-383).

Roteadores são utilizados para encaminhar mensagens de outros dispositivos da rede, aumentando a cobertura do sinal e minimizando o consumo de energia em dispositivos de campo. Dispositivos de campo podem possuir capacidade de roteamento (SILVA et al., 2012, p.812).

O gerenciador de segurança é responsável por garantir a segurança da rede WirelessHART. Administra as chaves de acesso e de sessão para todos os dispositivos, utilizadas para autenticação e codificação de dados (SILVA et al., 2012, p. 812).

A tabela 1 ilustra as camadas do protocolo WirelessHart de acordo com o modelo OSI (Open Systems Interconnection). A camada física do protocolo baseia-se no padrão IEEE 802.15.4, porém o protocolo implementa seu próprio endereço MAC (Controle de Acesso ao Meio - "Medium Access Control") baseado em acesso TDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo – "Time Division Multiple Access") (SILVA et al., 2012, p.813).

Tabela 1 – Camadas do protocolo WirelessHART

Camada OSI	Finalidade	Camada WirelessHART
Camada de Aplicação	Interação entre máquina e usuário.	Orientada a comandos. Dados e procedimentos predefinidos.
Camada de Apresentação	Conversão de dados da aplicação entre formato local e formato para a transmissão na rede.	
Camada de Sessão	Gerenciamento de conexões para as aplicações.	
Camada de Transporte	Garante a transferência de mensagens independente da rede.	Transferência de dados auto-segmentada.
Camada de Rede	Resolve endereçamento de rede, roteamento dos pacotes de dados.	Rede mesh com caminhos redundantes, otimização de consumo de energia, auto-organizável.
Camada de Enlace	Delimitação dos quadros, estrutura dos pacotes de dados, detecção de erros.	TDMA/CSMA, sincronismo de tempo, ARQ.
Camada Física	Especificações físicas dos meios de transmissão (elétricas e mecânicas)	Baseada no protocolo IEEE 802.15.4, frequência de 2,4 GHz,

Fonte: Adaptado de Zhang, 2008, p. 408

A escolha dos radios baseados no protocolo IEEE802.15.4 se deve à sua baixa demanda de potência de transmissão. Além disso, a taxa de transmissão de 250kbps é suficiente para transmissão do volume de dados de variáveis de processo (WU, 2012, p.9).

Algumas técnicas utilizadas pelo protocolo WirelessHART para coexistir com outros equipamentos transmissores de radiofrequência são (EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2012, p.81-82):

- segmentação de rede: cada dispositivo possui um identificador de rede único, possibilitando a coexistência de diversas redes WirelessHART em um mesmo local;
- baixa potência: a potência de transmissão é baixa quando comparada a outros dispositivos, como por exemplo 802.11 (WiFi), tornando difícil que um dispositivo WirelessHART cause interferência em outros equipamento sem fio;
- a utilização pseudo-aleatória dos 15 canais de comunicação assegura uma comunicação confiável mesmo quando há algum canal sofrendo interferência. Canais muito utilizados por outras redes e sofrem interferências constantes são excluídos temporariamente a lista de canais ativos;
- redes mesh auto-organizáveis WirelessHART otimizam a utilização de caminhos que reúnem as melhores condições de transmissão;
- Espalhamento Espectral por Sequência Direta – DSSS aumenta a resistência do sinal a ruídos;
- camada de enlace, baseada em TDMA, define uma janela de tempo (timeslot) de 10 ms, provendo em uma mesma rede comunicação coordenada, livre de colisões e determinística.

A figura 7 mostra a sobreposição potencial entre os protocolos IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, considerando os três canais 802.11 não sobrepostos.

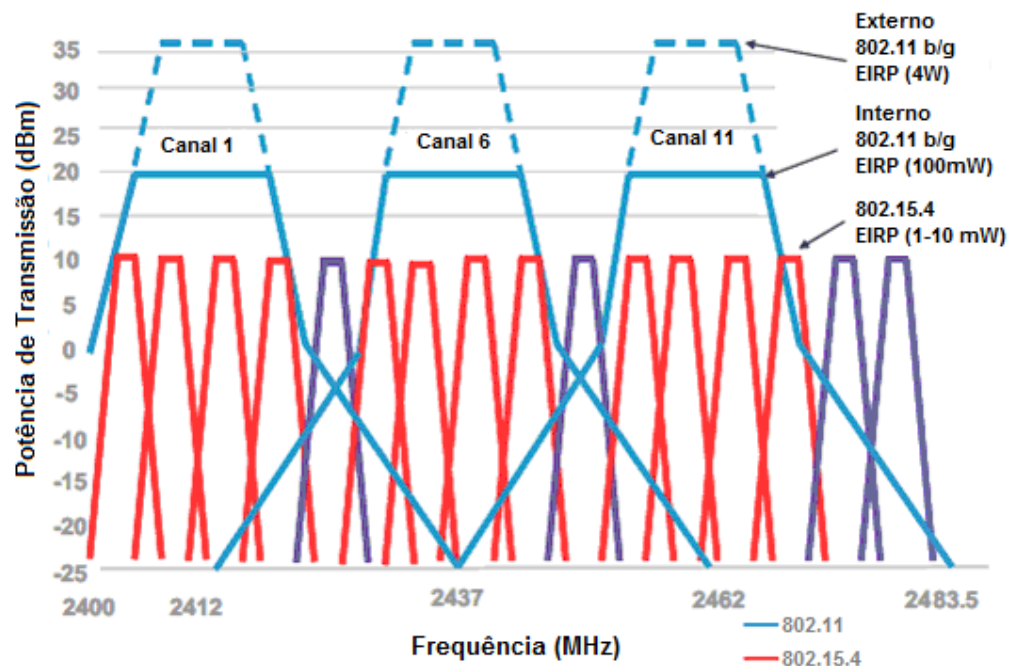


Figura 7 – Frequências e Potência de transmissão dos protocolos 802.15.4 e 802.11
 Fonte: Adaptado de Wu, 2012, p. 9

2.3 TRABALHOS RELACIONADOS

A confiabilidade de uma rede sem fio é afetada por sua dinâmica, pois links de comunicação sem fio tendem a falhar com maior frequência que em redes com fio (SILVA ET AL, 2012, p. 810). Neste contexto, o conhecimento do relacionamento entre o processo de erro e parâmetros relacionados à comunicação em um link sem fio é importante (ILYAS, RADHA, 2008, p. 1).

Tang et al (2007) também realizaram uma série de medições com o objetivo de observar as características de qualidade de um canal IEEE 802.15.4, verificando-se dependência complexa da potência do sinal recebido em relação à distância e a obstáculos ao redor dos sensores. Ilyas e Radha (2008) realizaram uma análise detalhada do canal IEEE 802.15.4 e propuseram um modelo relacionando a taxa de erro de bit dos pacotes de dados e os parâmetros de qualidade do canal.

Huang et al (2010) conduziram um estudo de confiabilidade de redes de sensores sem fio utilizando regressão logística. Neste estudo, a confiabilidade foi modelada a partir da densidade de sensores e do alcance do sinal, utilizando dados simulados.

Em uma rede sem fio industrial, a confiabilidade de uma variável de processo depende de todos os sensores envolvidos no roteamento até o sistema de supervisão e controle. Neste contexto, Silva et al (2012) propuseram uma metodologia baseada em árvore de análise de falhas para avaliação da confiabilidade e disponibilidade em redes de sensores sem fio, com foco em falhas permanentes dos sensores.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos adotados para aquisição dos dados e aplicação da regressão logística múltipla, com a finalidade de se obter a curva de confiabilidade estimada para o link de comunicação.

3.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Os dados foram adquiridos considerando-se a rede WirelessHART mais simplificada possível, composta por um gateway e um dispositivo de campo (sensor), conforme figura 2. Foram selecionados como preditores os parâmetros de Estabilidade e RSSI.

O parâmetro RSSI é definido como a potência do sinal recebida por um dispositivo, em um determinado link de comunicação, em dBm. A Estabilidade é definida como o percentual de transmissões recebidas com sucesso em um determinado caminho, ou seja, um valor abaixo de 100% indica que houve necessidade de retransmissão de pacotes.

O gateway foi mantido em posição fixa e o dispositivo de campo teve sua localização alterada, com a finalidade de se obter dados de variabilidade dos parâmetros explicativos.

Este estudo não visa correlacionar a confiabilidade do link WirelessHART com fatores externos que possam influenciar na qualidade da comunicação (distância, obstáculos, interferências eletromagnéticas, entre outros). Considera-se, para efeito deste estudo, que esses fatores irão impactar diretamente nos parâmetros de qualidade do link.

Sendo assim, os locais para o posicionamento do dispositivo de campo foram selecionados aleatoriamente, variando-se distância, obstáculos e diferença de elevação entre o dispositivo e o gateway. Fatores climáticos, interferências eletromagnéticas, entre outros possíveis fatores, não foram monitorados.

Após a alteração da localização do dispositivo de campo, foram descartados os dados relativos às quatro horas subseqüentes. Este período é o mínimo recomendado para estabilização do sinal durante o comissionamento de uma rede WirelessHART (HART COMMUNICATION FOUNDATION, 2013; EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2012, p.62).

O sistema disponibiliza os valores dos parâmetros de qualidade do link utilizados como preditores: Estabilidade e RSSI. Além desses parâmetros, foi monitorada também a quantidade de atualizações perdidas para cada intervalo de tempo. A taxa de atualização utilizada foi de 1 segundo.

A confiabilidade observada para cada intervalo foi então calculada como:

$$R = 1 - \frac{\text{ATUALIZAÇÕES PERDIDAS}}{\text{TOTAL DE ATUALIZAÇÕES}} \quad (1)$$

3.2 REGRESSÃO LOGÍSTICA MÚLTIPLA

A função logística é uma função flexível e simples, cuja saída varia suavemente entre 0 e 1 (HOSMER, 2000, p. 5-6). O modelo de regressão logística múltipla considera mais de uma variável preditora. O objetivo da regressão é encontrar os coeficientes do modelo para cada uma das variáveis predictoras e verificar sua significância (HOSMER, 2000, p. 31).

As variáveis predictoras selecionadas para estimar a confiabilidade do link de comunicação são: Estabilidade e RSSI. Será verificada a significância de cada variável para o modelo.

A função logística múltipla é dada pela seguinte equação:

$$\pi(x_1, x_2, \dots, x_p) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p}} \quad (2)$$

A transformação logit possui propriedades do modelo de regressão linear, sendo linear em seus parâmetros, podendo ser contínua (HOSMER, 2000, p. 6). Esta transformação é definida como:

$$g(x) = \ln\left(\frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p \quad (3)$$

A função logística múltipla utilizada no desenvolvimento deste trabalho, aplicada para análise da confiabilidade em função da Estabilidade e RSSI, é dada por:

$$R = 1 - \pi = \frac{1}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1^{ES} + \beta_2^{RSSI}}} \quad (4)$$

3.2.1 Ajuste do modelo de regressão logística múltipla

O próximo passo é realizar o ajuste do modelo, ou seja, estimar seus parâmetros. Para isso, é utilizado o método da máxima verossimilhança. Entretanto, é matematicamente mais simples utilizar o log da função de verossimilhança. A função de log-verossimilhança para dados agrupados é calculada a partir da equação:

$$L(\beta) = \ln[l(\beta)] = \sum_{i=1}^n \{m_i \cdot [y_i \cdot \ln(\pi(x_i)) + (1 - y_i) \cdot \ln(1 - \pi(x_i))]\} \quad (5)$$

onde “ x_i ” representa as variáveis explicativas, “ y_i ” representa a quantidade de ocorrências de um evento (no caso, atualizações perdidas), “ m_i ” representa a quantidade de ensaios em uma amostra (no caso, o total de atualizações esperado) e “ n ” é o tamanho da amostra. A máxima verossimilhança é obtida através da maximização do valor da função de verossimilhança através de métodos numéricos, como por exemplo o método de Newton-Raphson.

O método para estimativa das variâncias e covariâncias segue a teoria da máxima verossimilhança, em que os estimadores são obtidos a partir da matriz de derivadas segunda parciais da função log-verossimilhança, denotada por $l(\beta)$. As variâncias e covariâncias dos coeficientes são obtidos a partir da matriz inversa de $l(\beta)$, denotada por $Var(\beta) = I^{-1}(\beta)$ (HOSMER, 2000, p. 34). A matriz pode ser obtida pela formulação:

$$\hat{I}(\hat{\beta}) = X'VX \quad (6)$$

, onde a matriz “X” contém as variáveis explicativas para cada amostra e a matriz “V” é uma matriz diagonal contendo os elementos “ $m_i \cdot \pi_i \cdot (1 - \pi_i)$ ” (HOSMER, 2000, p. 35). A forma geral das matrizes X e V é dada por:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2p} \\ 1 & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V = \begin{bmatrix} m_1 \cdot \hat{\pi}_1 \cdot (1 - \hat{\pi}_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 \cdot \hat{\pi}_2 \cdot (1 - \hat{\pi}_2) & \cdots & 0 \\ 0 & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_n \cdot \hat{\pi}_n \cdot (1 - \hat{\pi}_n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2.2 Teste de significância do modelo

Para realizar o teste de significância de uma variável explicativa, é necessário comparar a verossimilhança da função com a variável e sem a variável (HOSMER, 2000, p.14):

$$G = -2 \ln \left(\frac{\text{verossimilhança sem a variável}}{\text{verossimilhança com a variável}} \right) \quad (9)$$

A estatística G segue uma distribuição qui-quadrado com “p” graus de liberdade.

3.2.3 Intervalos de confiança

O cálculo dos intervalos de confiança para os parâmetros “ $\hat{\beta}_0 \dots \hat{\beta}_p$ ” da função logit é dado por:

$$IC(\hat{\beta}_i, 1 - \alpha) = \left[\hat{\beta}_i - z_{(1-\alpha/2)} \cdot \hat{SE}(\hat{\beta}_i) ; \hat{\beta}_i + z_{(1-\alpha/2)} \cdot \hat{SE}(\hat{\beta}_i) \right] \quad (10)$$

onde “ α ” é o nível de significância da normal padronizada e $\hat{SE}(\hat{\beta}_i) = \sqrt{\hat{V}ar(\hat{\beta}_i)}$ é o desvio padrão do respectivo parâmetro dos estimadores (HOSMER, 2000, p.41). A variância da função logit é calculada por:

$$\hat{V}ar[\hat{g}(x)] = \sum_{i=0}^p x_i^2 \hat{V}ar(\hat{\beta}_i) + \sum_{i=0}^p \sum_{j=i+1}^p 2x_i x_j \text{Cov}(\hat{\beta}_i, \hat{\beta}_j) \quad (11)$$

O cálculo dos intervalos de confiança da função logit é dado por:

$$IC(\hat{g}(x), 1-\alpha) = [\hat{g}(x) - z_{(1-\alpha/2)} \cdot \hat{SE}(\hat{g}(x)) ; \hat{g}(x) + z_{(1-\alpha/2)} \cdot \hat{SE}(\hat{g}(x))] \quad (12)$$

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante a aquisição dos dados, foi verificado que o intervalo de atualização dos parâmetros de Estabilidade é variável, com tempo médio de 15 minutos e desvio padrão de 1 minuto e 6 segundos. O tamanho dos grupos (m) ficou entre 725 e 1025, com tamanho médio de 900 amostras para a taxa de atualização de 1 segundo, utilizada neste trabalho. Foram amostrados 910 grupos de dados ($n = 910$).

Os valores de Estabilidade amostrados variaram entre 7,5% e 99%, enquanto os valores de RSSI tiveram variação entre -68 dBm e -87 dBm. Valores de Estabilidade e RSSI mais baixos acarretaram em queda definitiva do link de comunicação antes do período de estabilização de 4 horas. Nesse caso, a confiabilidade cai a zero.

Após aquisição dos dados, foi realizado o cálculo dos parâmetros do modelo, suas variâncias e covariâncias, através da maximização da função de log-verossimilhança (equação 5) e matriz de segundas parciais (equações 6-8). Os parâmetros são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros, Variâncias e Covariâncias Estimados para o Modelo

Parâmetros	Variâncias	Covariâncias
$\hat{\beta}_0 = 1,195$	$V\hat{a}r(\hat{\beta}_0) = 4,447 \cdot 10^{-2}$	$C\hat{o}v(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) = -2,447 \cdot 10^{-5}$
$\hat{\beta}_1 = -0,159$	$V\hat{a}r(\hat{\beta}_1) = 4,663 \cdot 10^{-7}$	$C\hat{o}v(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_2) = 5,432 \cdot 10^{-4}$
$\hat{\beta}_2 = -0,013$	$V\hat{a}r(\hat{\beta}_2) = 6,625 \cdot 10^{-6}$	$C\hat{o}v(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2) = -1,968 \cdot 10^{-7}$

Fonte: Autoria própria (2014)

A tabela 3 sumariza os resultados do teste de significância para cada variável, através do teste da razão de verossimilhança apresentado no subitem 3.2.2.

Tabela 3 – Teste da razão de verossimilhança

	Modelo Completo	Modelo Sem Variáveis	Modelo Sem Estabilidade	Modelo Sem RSSI
$\hat{\beta}_0$	1,195	-2,237	-29,874	2,240
$\hat{\beta}_1$	-0,159	0	0	-0,159
$\hat{\beta}_2$	-0,013	0	-0,345	0
L	-136153	-259545	-222483	-136163
G		246784	172659	20,571
$P(\chi^2_i > G)$		0	0	< 0,001

Fonte: Autoria própria (2014)

A figura 8 mostra a dispersão dos dados amostrados e o ajuste do modelo de regressão logística estimado. A figura 9 mostra o ajuste do modelo e os limites superior e inferior para 95% de confiança.

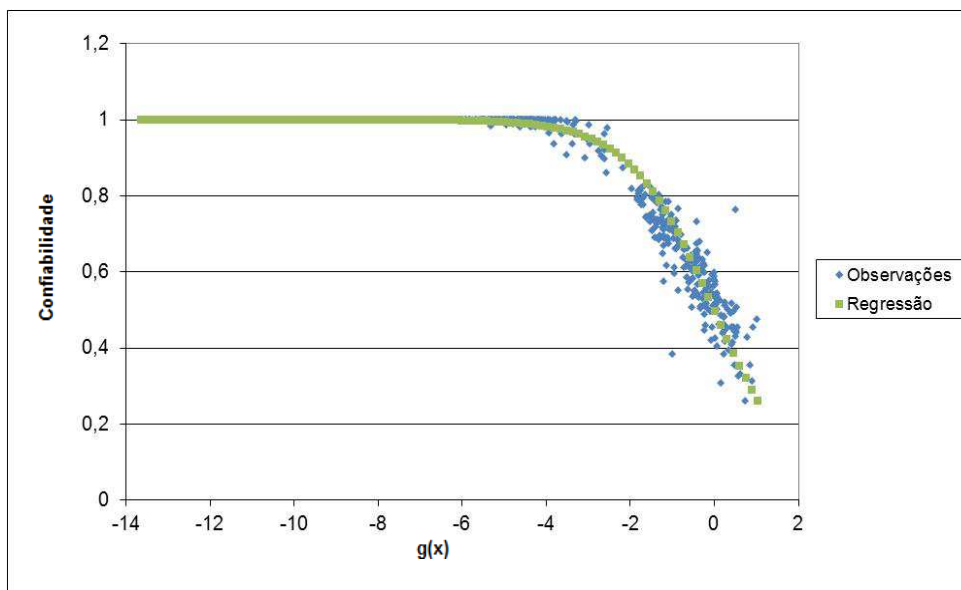


Figura 8 – Dados de confiabilidade observados e curva de confiabilidade estimada
Fonte: Autoria própria (2014)

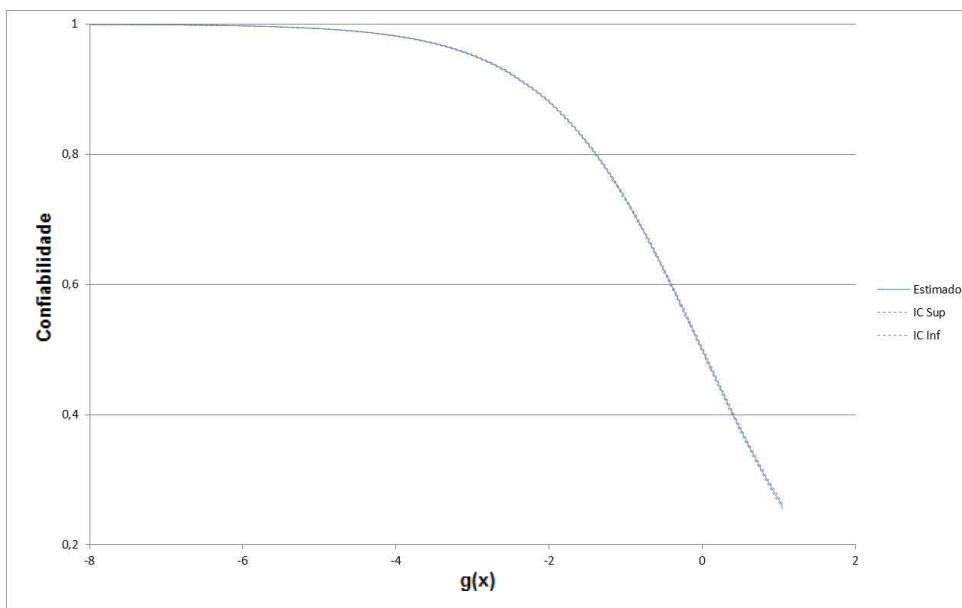


Figura 9– Curva de confiabilidade estimada com limites de confiança
Fonte: Autoria própria (2014)

O gráfico de dispersão apresentado na figura 10 mostra o modelo linear ajustado para os valores de confiabilidade observados e estimados. Já o gráfico de superfície apresentado na figura 11 ilustra o comportamento da confiabilidade estimada em função das variáveis explicativas.

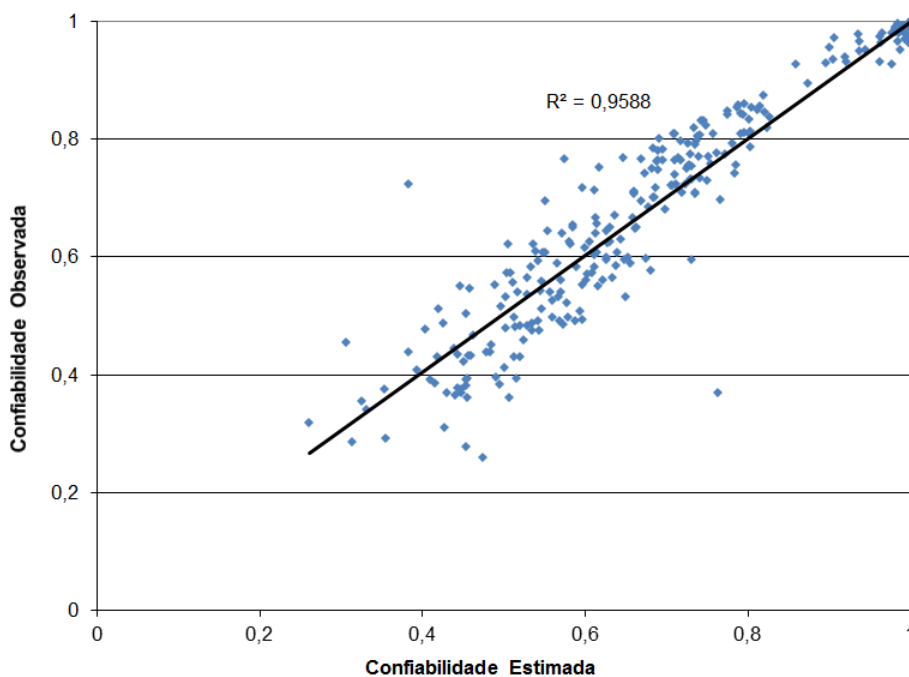


Figura10 – Dados de confiabilidade observados x estimados
Fonte: Autoria própria (2014)

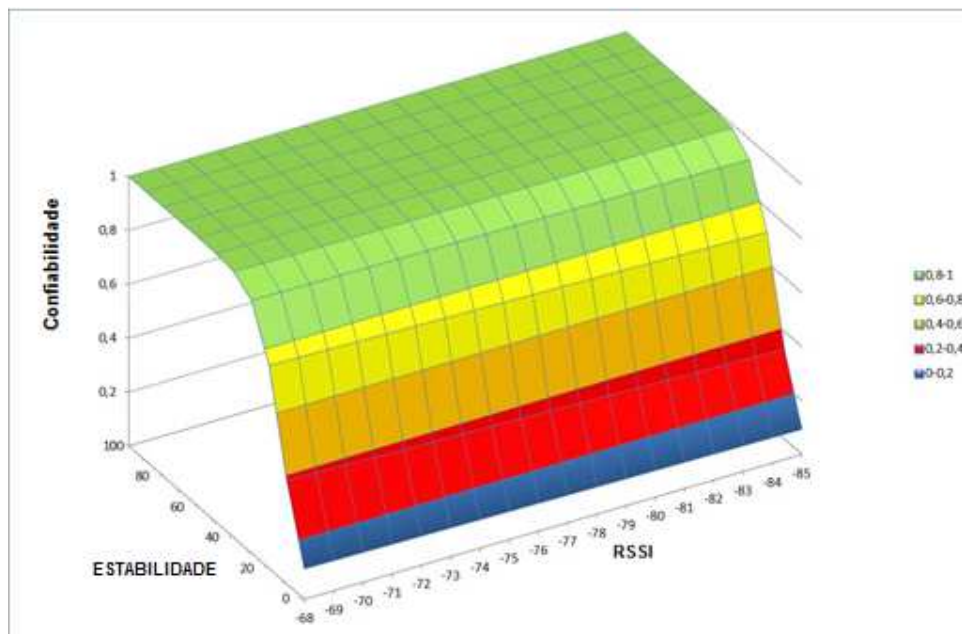


Figura11 – Dados de confiabilidade amostrados x estimados
Fonte: Autoria própria (2014)

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Após estimativa dos parâmetros, verifica-se através do teste de razão de verossimilhança (subitem 3.2.2) que tanto a Estabilidade quanto o RSSI são importantes para o modelo. O resultado do p-valor para o teste do qui-quadrado foi inferior a 0,001 para as duas variáveis explicativas.

Através da figura 11, verifica-se a influência das variáveis explicativas para a confiabilidade do link. A confiabilidade aumenta com o aumento da Estabilidade e do RSSI. Observa-se pelo gráfico que a variação da Estabilidade influencia mais no resultado da confiabilidade que o RSSI.

O gráfico apresentado na figura 10 mostra a correlação linear entre os valores de confiabilidade observados e estimados. O coeficiente de determinação da regressão linear (R^2) foi de 0,9588. Este valor indica que aproximadamente 95,9% da variabilidade é explicada pela regressão linear entre os valores de confiabilidade observados e estimados, sendo um indicativo qualitativo do ajuste obtido através do modelo logístico (não linear).

REFERÊNCIAS

CONSIDINE, Douglas M. **Process Instruments and Controls Handbook**. 2. Ed. Los Angeles: McGraw Hill, 1974. 963p.

CONSIDINE, Douglas M. **Process Instruments and Controls Handbook**. 3. Ed. Los Angeles: Ed. McGraw Hill, 1985. 764p.

CULLER, D., et. al. **Overview of Sensor Networks**. IEEE Computer Society. Computer, v.37, p.41-49, 2004.

EMERSON PROCESS MANAGEMENT. **IEC 62591 WirelessHART® System Engineering Guide**. 2012. rev 3.0. 87p. Disponível em: <[http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM Central Web Documents/EMR_WirelessHART_SysEngGuide.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/EMR_WirelessHART_SysEngGuide.pdf)> Acesso em: 14 abr. 2013

HART COMMUNICATION FOUNDATION – HCF. **HART Communication Protocol - Wireless HART Getting Started**. Disponível em: http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_getting_started.html. Acesso em: 03 fev. 2013.

HOSMER, David W., et al. **Applied Logistic Regression**. 2. Ed. New Jersey: Wiley Interscience, 2000. 963p.

HUANG, Fei, et al. **Reliability Evaluation of Wireless Sensor Networks Using Logistic Regression**. In: 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing. **Anais...** IEEE, p. 334-338, 2010.

ILYAS, Muhammad U., RADHA, Hayder. **A Channel Model for the Bit Error Rate Process in 802.15.4 LR-WPAN Wireless Channels**. In: IEEE International Conference on Communications 2008. **Anais...** IEEE, p.257 -261, 2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. IEEE 802.15.4-2011, Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). New York, 2011.

LOW, K. S., et. al. **Wireless Sensor Networks for Industrial Environments**. In: International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and

Automation, 2005 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies, and Internet Commerce. **Anais...** IEEE, v. 2, p. 271-276, 2005.

ORGANISATION DE COOPERATION ET DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUES – OCDE. **Méthode type proposée pour les enquêtes sur la recherche e le développement expérimental, Manuel de Frascati.** Paris : OCDE, 2002. 292p.

PAAVOLA, M. **Wireless Technologies in Process Automation: A Review and an Application Example.** University of Oulu, Control Engineering Laboratory, 63p, 2007.

RIEGO, Henrique B. **Redes Sem Fio na Indústria de Processos: Oportunidades e Desafios.** 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SAMSON AG. **Foundation Fieldbus – Technical Information.** Frankfurt, 2000. 42p
Disponível em: < http://www.samson.de/pdf_en/l454en.pdf >. Acesso em: 19 out. 2013

SAMSON AG. **Profibus PA – Technical Information.** Frankfurt, 1999. 43p.
Disponível em: < http://www.samson.de/pdf_en/l453en.pdf >. Acesso em: 19 out. 2013

SILVA, Ivanovitch M. D. da. **Análise de Desempenho de Sistemas de Comunicação Sem-Fio para Monitoramento de Unidade de Produção de Poços Petrolíferos Terrestres.** 2008. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SILVA, Ivanovitch M. D. da., et al **Reliability and Availability Evaluation of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications.** Sensors, p. 806-838, dez. 2012.

TANG, Lei, et al. **Channel Characterization and Link Quality Assessment of IEEE 802.15.4-Compliant Radio for Factory Environments.** IEEE Computer Society. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v.3, p.99-110, 2007.

WU, X. **MODELING AND PERFORMANCE EVALUATION OF WIRELESSHART.** 2012. 89 f. Tese de mestrado, University of Twente, Enschede, Holanda, 2012.
Disponível em: <essay.utwente.nl/62487/1/MSc_X_Wu.pdf>. Acesso em: 19 set. 2013

ZHANG, P. **Industrial Control Technology: A Handbook for Engineers and Researchers**. 900p. 2008

ZHAO, G. Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey. **Network Protocols and Algorithms**. Las Vegas, v. 3, n. 1, p. 46-63, 2011.
Disponível em: <<http://www.macrothink.org/journal/index.php/npa/article/view/580>>.
Acesso em: 16 mai. 2013