

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WELDER SIENA

**MODELO DE PERDA DE PACOTE PARA PROJETO E SIMULAÇÃO  
DE SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE SEM FIO**

CURITIBA

2016

WELDER SIENA

**MODELO DE PERDA DE PACOTE PARA PROJETO E SIMULAÇÃO  
DE SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas Eletrônicos, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Parente  
Ribeiro

CURITIBA

2016

Siena, Welder

Modelo de perda de pacote para projeto e simulação de sistemas de controle em rede sem fio / Welder Siena. – Curitiba, 2016.  
63 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Eduardo Parente Ribeiro  
Bibliografia: p.61-63

1. Sistemas de controle em redes. 2. Perdas. 3. Modelo de Bernoulli. I. Ribeiro, Eduardo Parente. II. Título.

CDD 660.2815

## TERMO DE APROVAÇÃO

WELDER SIENA

### MODELO DE PERDA DE PACOTE PARA PROJETO E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE SEM FIO

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de  
Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal do Paraná.



---

Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro – Orientador  
Universidade Federal do Paraná



---

Prof. Dr. Flavio Neves Junior – Convidado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



---

Prof. Dr. Gideon Villar Leandro – Convidado  
Universidade Federal do Paraná



---

Prof. Dr. Leandro dos Santos Coelho – Convidado  
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 12 de maio de 2016.

*Dedico este trabalho aos meus amados pais, Benedito Siena e Leonice M. Juliani Siena pelos seus ensinamentos e apoio ao longo de minha jornada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Eduardo Parente Ribeiro que me concedeu a oportunidade de continuar no caminho do aprendizado e desenvolvimento acadêmico, muito obrigado pela disponibilidade, orientação, paciência e incentivo ao longo deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR, pelos auxílios e ensinamentos.

Aos colegas do SENAI - CIC pela compreensão e apoio durante o desenvolvimento das pesquisas.

A minha futura esposa Iara L. Peters pela motivação, e compreensão de minha ausência, muito obrigado.

À todas as pessoas que influenciaram meu trabalho, direta ou indiretamente.

Por fim, à Deus que permitiu a realização de mais uma etapa em minha vida.

## RESUMO

A compreensão da dinâmica intrínseca em um sistema de controle de rede sem fios (WNCS - *Wireless Networked Control System*) é relevante para o desenvolvimento e análise de estratégias de controle que proporcionem o funcionamento do sistema em condições adversas, como em casos onde ocorre uma alta taxa de perda de pacotes durante a comunicação. A perda de pacotes é uma das principais deficiências presentes na transmissão de dados sem fios, as quais afetam diretamente a qualidade do sistema de controle. Desse modo um modelo de perda de pacotes preciso é muito importante para o projeto e simulação de WNCS. Neste sentido o presente trabalho analisou o comportamento de um processo, em diferentes níveis de perda de pacotes utilizando o protocolo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) 802.15.4. Foram comparados dois modelos de perda de pacotes, a fim de verificar qual o modelo pode representar melhor esse comportamento em um WNCS. O comportamento real da transmissão foi obtido mediante comunicação entre dois nós xbees modelo s1. Sobre as perdas reais foram ajustados dois modelos de perdas de pacotes, sendo estes os modelos de Bernoulli, modelo utilizado em softwares de simulação de WNCS/NCS, tal qual TRUETIME e o modelo de Gilbert-Elliot. As análises mostraram em que condições os modelos de perdas diferem na representação do comportamento real do WNCS. Ambos os modelos representaram bem baixas taxas de perdas, mas o modelo de Gilbert-Elliot mostrou ser uma melhor representação para taxas de perdas mais elevadas.

Palavras-chave: Sistema de controle em rede, perda de pacote, modelo de Gilbert-Elliot, modelo de Bernoulli.

## **ABSTRACT**

The understanding of intrinsic dynamics of a wireless networked control system (WNCS) is relevant to the development and analysis of control strategies to enable the operation of the system under adverse conditions. Packet loss is one of the main deficiencies present in wireless data transmission. An accurate packet loss model is very important to WNCS design and simulation. We analyzed the behavior of a plant under different levels of packet loss using the IEEE 802.15.4 protocol. We compared two models of packet loss in order to check which model can better represent this behavior in a WNCS. The results demonstrate in which conditions the Gilbert-Elliot and Bernoulli models differ in the representation of packet loss for a WNCS. Gilbert model showed to be a better representation specially for higher loss ratios.

Key words: WNCS, packet loss, Gilbert-Elliot model, Bernoulli model.

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação de um NCS. . . . .	19
2.2	Representação de um NCS em estrutura direta. Fonte: Adaptado de TIPSUWAN(2003) . . . . .	20
2.3	Representação da estrutura hierárquica de um NCS. Fonte: Adaptado de TIPSUWAN (2008) . . . . .	21
2.4	Representação de um NCS de sentido único. Fonte: Adaptado de HESPANHA(2007) . . . . .	21
2.5	Efeitos dos atrasos sobre um NCS. Fonte: Adaptado de TIPSUWAN(2003) 23	
2.6	Equacionamento dos atrasos. Fonte: Adaptado de TIPSUWAN(2003) .	24
2.7	Efeitos das perdas de pacote na saída do WNCS. . . . .	24
2.8	Efeitos das perdas de pacote para o controlador do WNCS. . . . .	25
2.9	Taxa de amostragem sobre o desempenho de um NCS/WNCS. Fonte: Adaptado de MOYNE(2007) . . . . .	26
2.10	WNCS com período de amostragem de 10ms. . . . .	27
2.11	WNCS com período de amostragem de 30ms. . . . .	27
3.1	Classificação das RSSF. Fonte: Adaptado de YACK (2008) . . . . .	28
3.2	Análise dos padrões IEEE 802.15.4 e ZigBee. . . . .	29
3.3	Utilização dos protocolos IEEE 802.11 e 802.15.4. Fonte: Adaptado de IEEE(2006). . . . .	30
3.4	Comunicação baseada em <i>SUPERFRAME</i> e comunicação sem <i>SUPERFRAME</i> . Fonte: Adaptado de MEDEIROS(2008) . . . . .	32
5.1	Cenário para realização dos ensaios. . . . .	37
5.2	Análise dos dados pelo <i>PACKET SNIFFER</i> . . . . .	39
5.3	Análise de pacotes sem perdas e com retransmissão. . . . .	40
5.4	Análise ds pacotes com retransmissão e perdas. . . . .	40
5.5	Resultado do comportamento das perdas sobre o cenário real utilizado.	41
5.6	Modelo de Gilbert-Elliot para análise de perda de pacote . . . . .	42
5.7	Análise do comportamento dos <i>traces</i> . . . . .	44
5.8	Planta utiliza na simulação do WNCS com período de amostragem de 10 ms. . . . .	46
5.9	Algoritmo utilizado na simulação do WNCS. . . . .	47
6.1	WNCS sem perdas de pacotes. . . . .	49
6.2	WNCS com caso prático de perdas. . . . .	49
6.3	WNCS com modelo de Bernoulli. . . . .	50
6.4	WNCS com modelo de Gilbert. . . . .	50
6.5	RMSE em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10ms. . . . .	51
6.6	$R^2$ em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10ms. . . . .	52
6.7	RMSE em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10,50 e 100ms. . . . .	52

6.8	$R^2$ em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10,50 e 100ms. . . . .	53
6.9	RMSE em função da taxa de amostragem de 10% . . . . .	54
6.10	$R^2$ em função da taxa de amostragem de 10%. . . . .	54
6.11	RMSE em função da taxa de amostragem de 20% a 50%. . . . .	54

## LISTA DE TABELAS

2.1	Exemplo de fatores de degradação de um NCS/WNCS . . . . .	22
3.1	Características da camada física do padrão IEEE 802.15.4 . . . . .	30
3.2	Camada MAC do padrão IEEE 802.15.4 . . . . .	31
5.1	Configuração dos Nós na rede . . . . .	37
5.2	Perda de pacote aproximada para cada distância . . . . .	38
5.3	Configuração da transmissão de pacotes . . . . .	38
5.4	Parâmetros estimados para cada razão de perdas de pacotes . . . . .	43
5.5	Características do motor . . . . .	45
5.6	Período de amostragem (ms) utilizados nas simulações . . . . .	47
6.1	Comparativo entre os erros obtidos na simulação com caso real de perdas e modelos . . . . .	53

## LISTA DE SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgment</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
CAA	<i>Clear Chanel Assessment</i>
CH	<i>Channel</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DH	<i>Endereço high</i>
DL	<i>Endereço low</i>
DSSS	<i>Direct Sequency Spread Spectrum</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
ID	<i>Endereço da PAN</i>
LQI	<i>Link Quality Indicaion</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MM	<i>Modo MAC</i>
NCS	<i>Networked Control System</i>
O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PID	<i>Proporcional Integral Derivative</i>
PHY	<i>Physic</i>
PL	<i>Power Level</i>
PS	<i>Packet Sniffer</i>
RFD	<i>Reducced Function Devices</i>
RMSE	<i>Root Mean Squear Error</i>
RSSF	<i>Rede de Sensor Sem Fio</i>
RSSI	<i>Received Signal Stregth Indication</i>
WNCS	<i>Wireless Networked Control System</i>
ZDO	<i>ZigBee Device Object</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\tau^{SC}$	Atraso entre Sensor e Controlador
$\tau^{SE}$	Atraso entre controlador e Emissor
$\tau^{CA}$	Atraso entre controlador e Atuador
$\tau^{CE}$	Tempo de encapsulamento e envio do pacote
$\tau^{RS}$	Processamento do sinal de controle
$u(k)$	Índice de tempo do sinal de entrada
$y(k)$	Índice de tempo do sinal de saída
$(T)$	Período de amostragem
$r$	Razão de perdas
$\hat{r}$	Estimador da Razão de Perdas
$X_i$	Série de dados
$n$	Número de amostras da série temporal
$X_{i-1}$	valor prévio em uma série de dados
$p$	Probabilidade de ocorrência estado 1 - 0
$q$	Probabilidade de ocorrência estado 0 - 1
$\hat{p}$	Estimador de estado 1-0
$\hat{q}$	Estimador de estado 0-1

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
1.2 Justificativa	17
1.3 Estrutura da Dissertação	17
<b>2 SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE</b>	<b>19</b>
2.1 Configuração de um NCS	19
2.2 Fatores de degradação de um NCS	22
2.2.1 Atraso de Pacotes	22
2.2.2 Perda de Pacotes	24
2.2.3 Período de Amostragem	26
<b>3 RSSF E OS PADRÕES ZIGBEE E IEEE 802.15.4</b>	<b>28</b>
3.1 O padrão ZigBee	28
3.2 Camada Física (PHY)	29
3.3 Controle de Acesso ao Meio (MAC)	31
3.4 Sentido de Comunicação	31
<b>4 TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>33</b>
<b>5 METODOLOGIA</b>	<b>36</b>
5.1 Medição das perdas de pacotes	36
5.2 Modelo de Bernoulli e Gilbert-Elliott para perdas de pacotes	41
5.3 Simulação do WNCS com perdas	44
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>49</b>
<b>7 CONCLUSÃO</b>	<b>56</b>

<b>A PLANTA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO COM PERÍODO DE AMOSTRAGEM DE 10MS E 30MS</b>	<b>58</b>
<b>B PLANTA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO COM PERÍODO DE AMOSTRAGEM DE 50MS E 70MS</b>	<b>59</b>
<b>C PLANTA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO COM PERÍODO DE AMOSTRAGEM DE 90MS E 100MS</b>	<b>60</b>
<b>8 BIBLIOGRFIA</b>	<b>61</b>

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo o controle realimentado de sistemas dinâmicos apresentou uma evolução em muitas de suas características o que proporcionou o desenvolvimento de diversas estratégias a partir de suas leis clássicas. Esta mudança decorrente sobre os sistemas de controle proporcionaram a evolução de simples sistemas de controle em malha aberta até estratégias de controle mais sofisticadas, como o controle robusto, controle preditivo, controle adaptativo, controle inteligente e outros (AZAR; VAIDYANATHAN, 2015);(MIRINEJAD; WELCH; SPICER, 2012);(CHRISTOFIDES et al., 2013);(KUMAR et al., 2016).

Além dos desenvolvimentos decorrentes nas estratégias de controle, a composição física do sistema vem apresentando modificações em sua arquitetura, estas alterações são proporcionadas pela expansão e popularização das redes de comunicação, onde observa-se a algumas décadas um crescimento na utilização de protocolos de comunicação que utilizam de fios para disseminação de dados (MAHMOUD, 2014); (ZHANG; GAO; KAYNAK, 2013);(HASSLINGER; HOHLFELD, 2008). Como exemplo da utilização de sistemas de comunicação aplicados ao monitoramento e controle tem-se o protocolo CAN (*Controller Area Network*), que originalmente foi desenvolvido pela companhia alemã Robert Bosch para uso em indústrias automobilísticas e hoje é utilizado em muitas outras aplicações (TIPSUWAN; CHOW, 2003). Outro exemplo de rede industrial utilizada para controle de sistemas em rede é o protocolo Profibus, desenvolvido por seis empresas alemãs e cinco institutos alemães em 1967 (TIPSUWAN; CHOW, 2003). Neste mesmo período outros protocolos, tais como: Profinet e Foundation Fieldbus foram desenvolvidos com o propósito de monitoramento e controle em tempo real (SHI; YU, 2009).

A emergente utilização dos protocolos de comunicação impulsionaram a aplica-

ção da atuação remota em sistemas dinâmicos, o que levou ao desenvolvimento do ramo da teoria de controle que opera com sistemas que apresentam em sua arquitetura uma rede de comunicação compartilhada, a qual efetua o fechamento da malha de controle, este tipo de arquitetura é denominado como sistema de controle em rede (SILVA, 2008).

A propagação do controle via protocolos de comunicação decorre do potencial de aplicação e dos benefícios proporcionados pela inserção desta arquitetura nos sistemas automatizados de controle em tempo real. Alguns dos benefícios comumente associados a inserção da arquitetura de controle em rede são: redução de custo, redução da complexidade de cabamentos e facilidade na manutenção (MILLAN et al., 2011);(BOUGHANMI; SONG; RONDEAU, 2009).

Além dos sistemas de controle em rede que operam mediante protocolos que utilizam de cabeamento para a disseminação de dados de monitoramento, hoje em dia observa-se uma expansão na utilização de sistemas wireless em aplicações de monitoramento e controle, onde são utilizados protocolos, como: IEEE 802.11 / WLAN, 802.15.1/WPAN, IEEE 802.15.4/ZigBee e WirelessHART. O protocolo IEEE 802.15.4 que atua a baixo da camada ZigBee ainda não apresenta maturidade no mercado brasileiro, porém este fato não afeta a sua utilização em projetos de controle e monitoramento remoto (AGRAWAL; ZENG, 2015).

O emergente crescimento do protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee no que diz respeito ao âmbito de monitoramento e controle industrial se deve as suas características, a citar: a baixa complexidade na configuração dos nós, baixo custo de aquisição e implementação e baixo consumo do dispositivo, fatores impulsionam a aplicação desta tecnologia em redes de sensores sem fio (BURATTI; VERDONE, 2009);(IRWIN et al., 2010);(AFIFI et al., 2015).

Apesar dos benefícios intrínsecos sobre as redes sem fio, alguns fatores como as condições da transmissão devem ser analisadas, pois a interferência eletromagnética presente no enlace de comunicação consiste em um dos principais fatores de degradação do desempenho de um NCS/WNCS (*Networked Control System / Wireless Networked*

*Control System*). Contudo, à medida que as redes de sensores sem fio e os sistemas de controle em rede se difundem, crescem os desafios relativos à obtenção de sistemas de controle mais confiáveis e eficientes. Entretanto para o desenvolvimento de sistemas confiáveis, os NCS/WNCS necessitam de uma abordagem multidisciplinar, como: tecnologias de redes de comunicação, processamento de sinais e teoria de controle de sistemas dinâmicos, para que assim se possa controlar remotamente e com confiabilidade um sistema dinâmico (GODOY; PORTO, 2013);(GUPTA; CHOW, 2010). Devido a esta abordagem multidisciplinar, a simulação de sistemas de controle em rede desempenham um importante papel nos estágios de desenvolvimento e análise do desempenho dos controladores, pois existem fatores que proporcionam a instabilidade do sistema, como exemplo: atrasos, amostragem do sinal, parâmetros de configuração, *jitter*, largura de banda e perda de informação (*packet loss*) (SONG; ZHOU, 2013); (GUPTA; CHOW, 2010); (GODOY; PORTO, 2013).

Contudo, é de fundamental importância e um pré-requisito a utilização de modelos acurados dos canais de transmissão para uma correta simulação e análise de protocolos wireless. No entanto, é comum que os sistemas de RSSF (Redes de Sensores Sem Fio) e sistemas NCS/WNCS sejam simulados por modelos que não apresentem as características reais dos canais de comunicação, pois normalmente os modelos utilizados na simulação ignoram o comportamento das real das perdas (*frame-loss*) em determinados ambientes (IQBAL; KHAYAM, 2012);(TIAN; TIAN; FIDGE, 2010);(WU; CHUNG, 2007). Este fato impacta diretamente na qualidade da simulação do sistema (IQBAL; KHAYAM, 2012). No entanto, para se modelar o comportamento de um NCS/WNCS há necessidade de se conhecer a dinâmica das perdas de dados e dos atrasos provenientes do protocolo utilizado (YAJNIK et al., 1999). Esta análise proporciona a construção de modelos acurados para o desenvolvimento da simulação, possibilitando assim uma melhor avaliação do desempenho das técnicas de controle sobre o NCS/WNCS.

Neste sentido o presente trabalho buscou a análise de modelos de perdas de dados do protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee sobre um NCS/WNCS de arquitetura direta.

Os modelos foram implementados em uma ferramenta de simulação desenvolvida em ambiente computacional da Mathworks. Este ambiente foi utilizado para avaliar mediante as perdas de pacotes o modelo de maior acurácia com o comportamento real do WNCS. O comportamento das perdas neste trabalho foi modelado como um estado de tempo discreto da Cadeia de Markov (SABUROV; YUSOF, 2016)  $2^k$ , onde  $k = 0$  corresponde ao modelo de Bernoulli, e  $k = 1$  corresponde a uma cadeia de Markov de dois estados denominado modelo de perdas de Gilbert-Elliot.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho consiste na análise comparativa entre dois modelos de perdas de pacotes, sendo estes o modelo de Bernoulli normalmente utilizado na geração de perdas de pacotes em simulações e o modelo de Gilbert-Elliot. A análise dos modelos é efetuada mediante a comparação da saída de uma planta de controle sob diferentes condições de perdas de pacotes indicadas pelos modelos com o a saída obtida em condições reais de perdas de pacotes em transmissão pelo protocolo IEEE 802.15.4.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Submeter uma RSSF a índices estressantes de RSSI/LQI em função da relação métrica posicional dos módulos;
- Registrar a comportamento real das perdas entre os nós;
- Desenvolver um ambiente de simulação de WNCS e avaliar o seu comportamento perante o perda real e simulada de dados;
- Apresentar os resultados comparativos entre os modelos de perdas de dados;

## 1.2 Justificativa

Os sistemas de controle em rede (NCS) vem apresentando um crescente interesse industrial. No entanto, este tipo de sistema apresenta limitações de mobilidade e flexibilidade por causa dos cabos de rede (SCHENATO et al., 2007). Como medida de solução as redes de sensores sem fio e o WNCS são uma alternativa para superar este problema, já que oferecem mais fácil configuração e manutenção e baixo custo de implementação.

Apesar dos benefícios associados ao WNCS estes sistemas apresentam também fatores de degradação, como as perdas de informação e atrasos que implicam diretamente no seu desempenho. Com isso, cada vez mais pesquisadores analisam e desenvolvem formas de controle que minimizem a interferências destes fatores sobre desempenho do WNCS. No entanto para se ter acurácia nos resultados de simulação de um WNCS há a necessidade de se obter modelos de perdas de dados que reflitam um comportamento semelhante ao comportamento real apresentado pelo protocolo utilizado. Desse modo a utilização e avaliação de modelos de perdas de pacotes é capaz de auxiliar em análises condizentes com comportamento real de perdas, principalmente em enlaces onde sinal de rádio sofre com interferências.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

A estrutura desta dissertação se distribui ao longo de sete capítulos, onde no capítulo 1 mostrou os conceitos, bem como a problemática envolvida na área de inserção do trabalho em questão. O Capítulo 2 descreve as questões relacionadas aos sistemas de controle em rede NCS, onde são analisados os aspectos estruturais do sistema e as características que o compõe. O Capítulo 3 apresenta uma abordagem sobre a características das redes de sensores sem fio, sobre o protocolo de comunicação IEEE 802.15.4 e padrão ZigBee. O Capítulo 4 mostra os estados da arte sobre o tema em estudo. O Capítulo 5 relaciona os materiais e métodos utilizados para a implementação dos modelos de perdas de pacotes em um WNCS, onde é

abordado os dispositivos e procedimentos utilizados durante as análises. O Capítulo 6 aborda as discussões acerca dos tópicos envolvidos nos capítulos anteriores e principalmente quanto aos resultados obtidos na comparação entre os sistemas analisados. O capítulo 7 traz a conclusão deste trabalho bem como trabalhos futuros associados ao estudo em questão.

## CAPÍTULO 2

### SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE

O sistema de controle em rede, NCS (*Networked Control System*), consiste em uma classe de controle em que a malha é fechada por uma rede de comunicação (GUPTA; CHOW, 2010);(ULUSOY; GURBUZ; ONAT, 2011); (CHUNG et al., 2015a); (MOYNE; TILBURY, 2007). A FIGURA 2.1 mostra uma representação genérica de um NCS com seus respectivos elementos conectados por uma malha de rede.

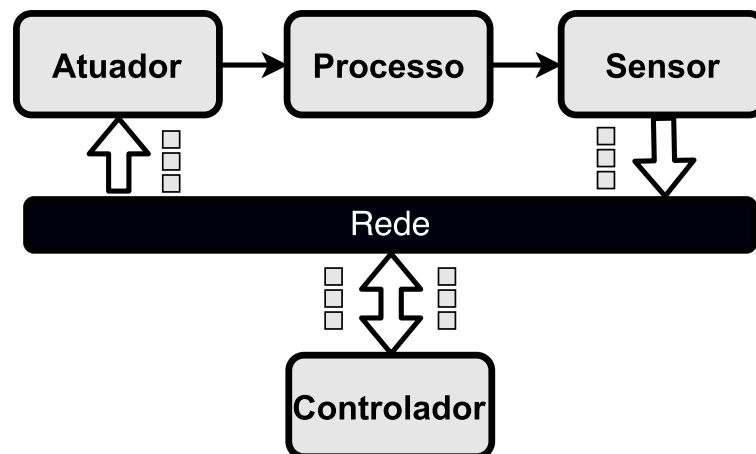


Figura 2.1: Representação de um NCS.

#### 2.1 Configurações de um NCS

A configuração de um NCS apresenta em geral dois tipos de arquitetura, as quais são: estrutura direta e estrutura hierárquica. A configuração em estrutura direta é composta por um controlador e uma planta com sensores e atuadores. Nesta configuração a planta e o controlador estão fisicamente separados em diferentes localidades, mas conectados por uma rede de comunicação, a qual efetua o fechamento da malha de controle. A FIGURA 2.2 mostra a configuração em estrutura direta de um sistema de controle em rede. O sinal de controle nestes sistemas é encapsulado em um frame ou um pacote de um dado protocolo e enviado a planta via rede de

comunicação. Esta planta por sua vez retorna um sinal de saída pela rede de dados através de seus sensores, formando assim uma malha de controle (SCHENATO et al., 2007).

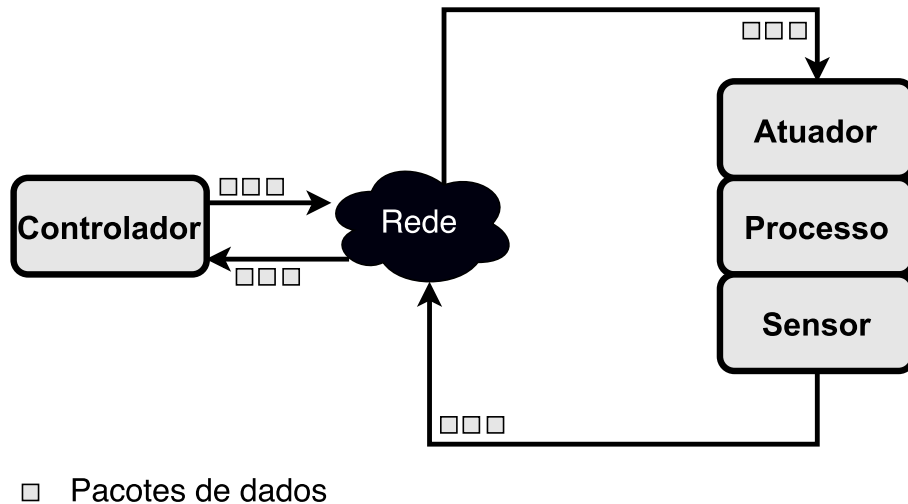


Figura 2.2: Representação de um NCS em estrutura direta. Fonte: Adaptado de TIPSUWAN(2003)

Em aplicações práticas esta arquitetura de NCS com múltiplos controladores pode ser implementada em uma simples unidade de hardware com objetivo de gerenciar múltiplos NCS com fechamento da malha em estrutura direta. Alguns exemplos desta arquitetura são encontrados em laboratórios de aprendizado a distância e sistemas de controle de motores (TIPSUWAN; CHOW, 2003). Como mencionado anteriormente, além da estrutura de um NCS de controle direto tem-se a estrutura hierárquica. Esta arquitetura apresenta um controlador principal e um sistema remoto em malha fechada, conforme apresentado na FIGURA 2.3. Normalmente neste tipo de sistema o controlador principal analisa os dados enviados em um *frame* ou em pacotes pela rede de comunicação (TIPSUWAN; CHOW, 2003). Este sistema apresenta a malha de controle principal (remoto) separada de um controlador junto ao processo. O controlador local processa o sinal e através de um sensor e envia sinais para o controlador principal para que seja processado e avaliado o novo sinal de referência.

Um das características deste sistema consiste no período de amostragem, que em uma arquitetura de controle hierárquico o controlador principal (remoto) apre-

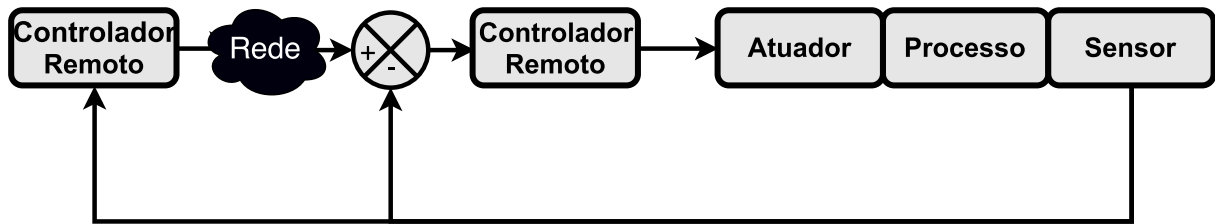


Figura 2.3: Representação da estrutura hierárquica de um NCS. Fonte: Adaptado de TIPSUWAN (2008)

senta um período maior de amostragem que o controlador local. Esta característica permite a manutenibilidade do sistema antes do processamento de um novo referencial, geralmente esta estrutura de controle é aplicada a sistemas robóticos ou sistemas operados remotamente (SHI; YU, 2009).

A escolha de uma das arquiteturas (direta ou hierárquica) é baseada nos requerimentos do projeto. Como exemplo, um manipulador robótico requer a aplicação de inúmeros motores para controlar as juntas que o compõe de maneira suave e simultânea. Neste caso a aplicação de NCS com arquitetura hierárquica é mais indicado. Por outro lado, um NCS aplicado a um sistema de controle do posicionamento de um motor requer velocidade na resposta da rede, neste caso a arquitetura de controle direto é a mais indicada. Contudo a característica física de um NCS não se resume ao apresentado anteriormente. Existem outras possibilidades na arquitetura de um sistema de controle em rede, como mostra a FIGURA 2.4.

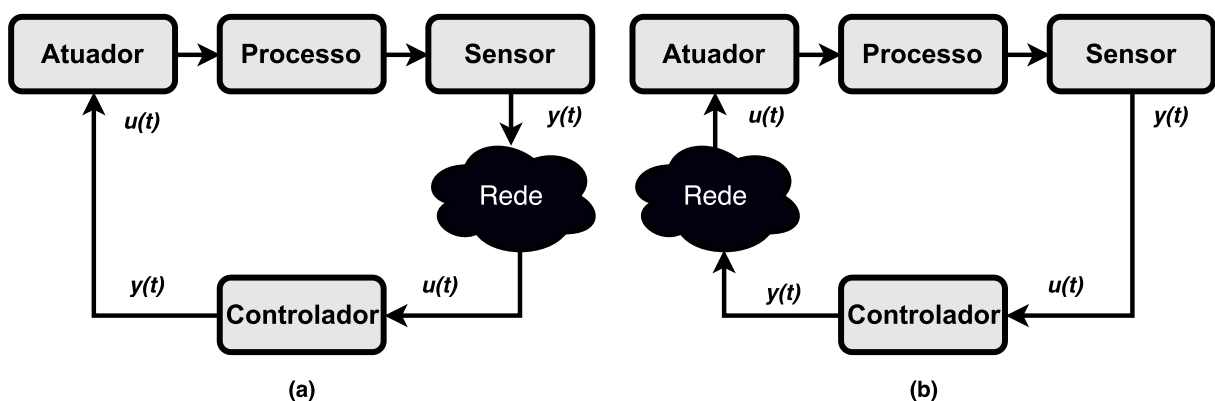


Figura 2.4: Representação de um NCS de sentido único. Fonte: Adaptado de HESPANHANA(2007)

As FIGURAS 2.4 (a) e (b) mostram uma configuração de sentido único contido

em sistema de controle em rede, estas configurações consistem em representações mais simplificadas entre os elementos do sistema (HESPANHA; NAGHSHTABRIZI; XU, 2007). Existem inúmeras outras configurações NCS que podem ser analisadas por meio da representação tradicional de sistema de controle em rede ou por meio de um NCS de sentido único (SILVA, 2008)

## 2.2 Fatores de degradação de um NCS

A análise de instabilidade consiste em um fator que concentra a atenção nos campos de estudos de NCS, pois através de simulações e modelagem é possível determinar ou estimar o comportamento do sistema perante fatores que degradam a sua qualidade. Alguns destes fatores são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Exemplo de fatores de degradação de um NCS/WNCS

Atraso dos pacotes	Parâmetros de configuração
Amostragem do sinal	Perda de pacotes rede
<i>jitter</i>	ou <i>frames</i> pelo protocolo

### 2.2.1 Atraso dos Pacotes

Os atrasos dos pacotes em um NCS/WNCS podem proporcionar uma degradação significativa no desempenho do sistema (MAHMOUD, 2014). A ocorrência dos ADPs (atrasos de pacotes) é resultado do tempo necessário para a codificação e computação dos dados da planta pelo sistema. A característica dos atrasos em NCS/WNCS depende do protocolo e dos ajustes dos parâmetros dos nós utilizados na arquitetura do sistema, como exemplo de parâmetros que proporcionam ADPs no sistema de controle em rede são: velocidade de transmissão, dimensão e a quantidade de pacotes enviados. Em conjunto com os atrasos dos pacotes outro fator de degradação consiste no *jitter*, fator relacionado a variabilidade dos atrasos na rede.

Um outro fator de desestabilização do NCS/WNCS consiste no cumprimento das restrições de tempo do sistema. Caso este fator não seja respeitado no projeto

do controlador, o NCS/WNCS pode ser conduzido a instabilidade. A FIGURA 2.5 apresenta dois gráficos que mostram a influência do atraso dos pacotes ( $t$ ) sobre o desempenho e a estabilidade do controlador do NCS/WNCS. Através destas análises é possível afirmar que os atrasos dos pacotes proporcionam a degradação do desempenho do controle.

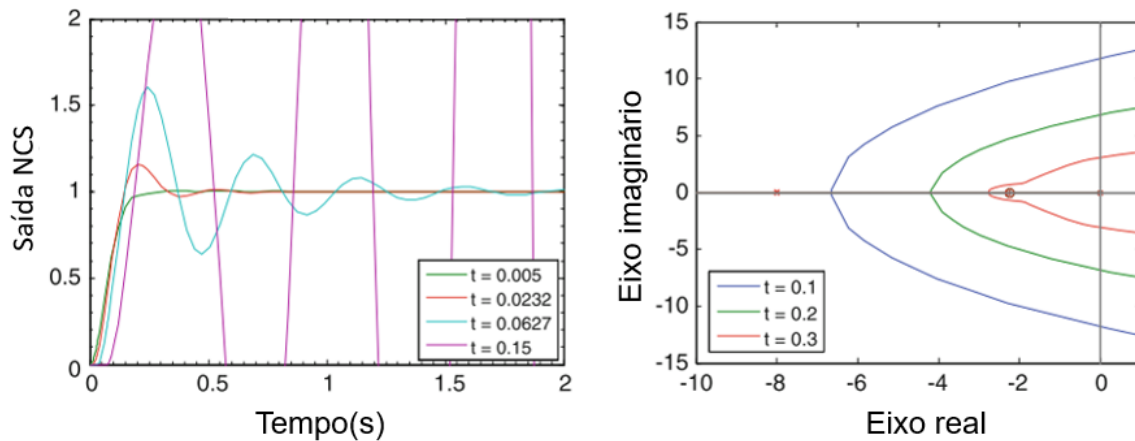


Figura 2.5: Efeitos dos atrasos sobre um NCS. Fonte: Adaptado de TIPSUWAN(2003)

Os ADPs em um sistema de controle em rede podem ser caracterizados pela direção dos dados na malha de controle, ou seja, se o dado enviado possui a direção sensor-controlador representado por  $\tau^{SC}$  ou controlador-atuador representado por  $\tau^{CA}$ . Estes atrasos são processados conforme as equações:

$$\tau^{SC} = \tau^{CS} - \tau^{SE} \quad (2.1)$$

$$\tau^{CA} = \tau^{RS} - \tau^{CE} \quad (2.2)$$

onde  $\tau^{SE}$  consiste no tempo em que o sistema remoto efetua o encapsulamento do sinal da planta no pacote do protocolo para ser enviado,  $\tau^{CS}$  consiste no instante de tempo do processamento de entrega do pacote,  $\tau^{CE}$  consiste no instante de tempo que o controlador encapsula o sinal de controle em um pacote para ser enviado e  $\tau^{RS}$  este representa o instante de tempo que o controlador inicia o processamento do sinal de controle. A FIGURA 2.6 mostra os atrasos na malha de controle de um NCS/WNCS.

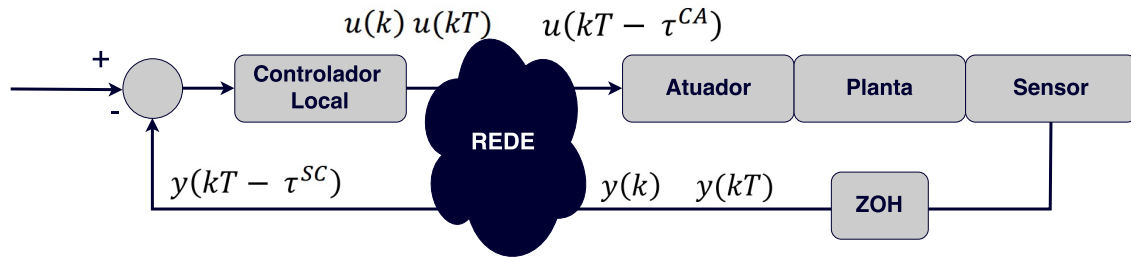


Figura 2.6: Equacionamento dos atrasos. Fonte: Adaptado de TIPSUWAN(2003)

## 2.2.2 Perdas de Pacotes

As perdas de pacotes (PDPs) em um NCS/WNCS geralmente ocorrem devido aos erros na transmissão de informações no canal de comunicação da rede, estes erros são ocasionados pelo estouro de mensagens durante a transmissão e recepção dos dados pelo *buffer*. A PDP também pode ocorrer devido a erros relacionados ao MAC (Medium Access Control) da rede (HESPANHA; NAGHSHTABRIZI; XU, 2007). Como resultado das perdas de pacote em um NCS/WNCS ocorre a degradação do desempenho do sistema, em casos como este ocorre o aumento da instabilidade devido as perdas impactarem diretamente na atualização de dados do nó controlador da planta, caso o controlador não esteja preparado para suportar as perdas em rajadas no sistema (GODOY; PORTO, 2013).

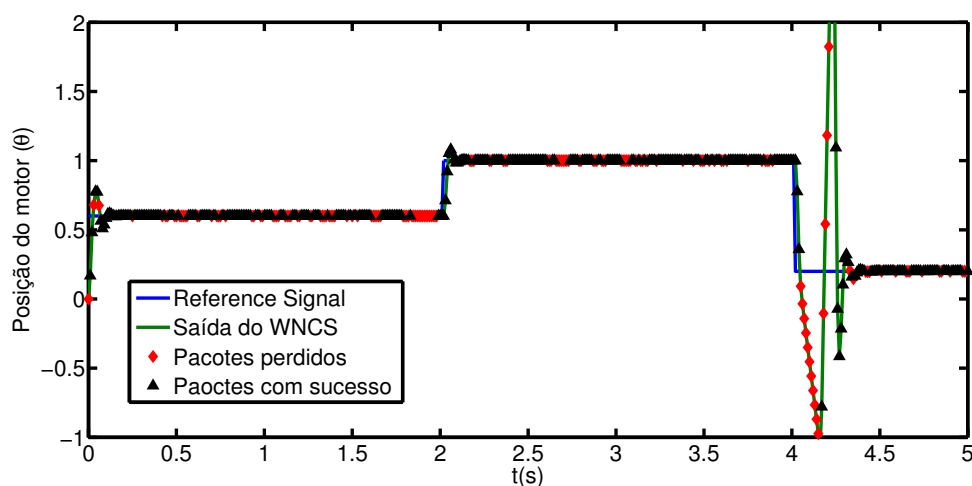


Figura 2.7: Efeitos das perdas de pacote na saída do WNCS.

A FIGURA 2.7 mostra o comportamento de um WNCS/NCS de um motor CC

que opera com um controle PID (Proporcional Integral e Derivativo)

$$K_p e + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d de/dt \quad (2.3)$$

onde o erro ( $e$ ) proporcionado entra a diferença da entrada  $u_t$  e a referência do sistema, é multiplicado por um ganho proporcional  $k_p$  e somado à integral do erro e a derivada do erro que possuem seus respectivos ganhos ( $K_i$  e  $K_d$ ). O período de amostragem do sistema é de 10ms, esta análise mostra o WNCS submetido a um enlace com perdas de pacotes de 30%. A FIGURA 2.8 mostra o comportamento do sistema perante as perdas de pacotes.

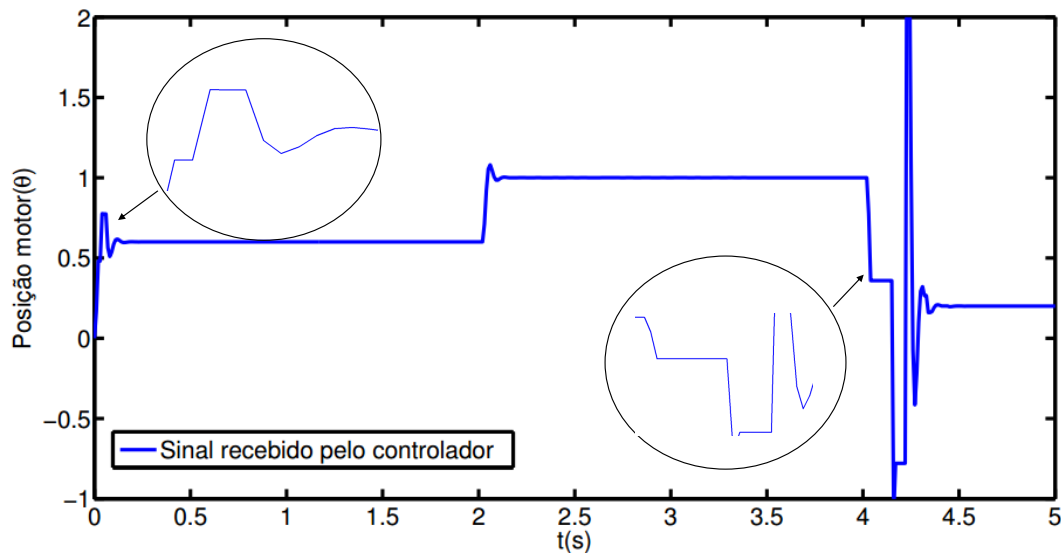


Figura 2.8: Efeitos das perdas de pacote para o controlador do WNCS.

A análise em questão mostra o comportamento do sinal recebido pelo controlador PID durante as perdas de pacotes pelo WNCS. Nesta análise observa-se a retenção de pacotes durante a simulação, estas retenções foram utilizadas no momento de perda de pacote pelo sistema de modo que não houvesse a desestabilização processo.

### 2.2.3 Período de Amostragem

A arquitetura de um sistema de controle em rede possui um limite na velocidade de transmissão, o que acarreta em uma capacidade de transmissão finita de pacotes pelo sistema. Este fator representa um importante problema que deve ser levado em consideração em um NCS/WNCS, pois existe um compromisso entre o período de amostragem dos dispositivos conectados a rede e o desempenho do NCS/WNCS (GODOY; PORTO, 2013). O diagrama apresentado na FIGURA 2.9 apresenta a relação entre o período de amostragem dos pacotes com o desempenho do sistema de controle em rede.

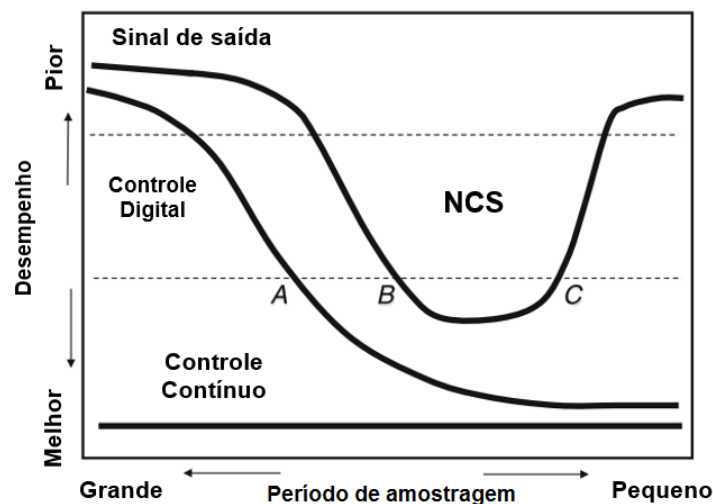


Figura 2.9: Taxa de amostragem sobre o desempenho de um NCS/WNCS. Fonte: Adaptado de MOYNE(2007)

A FIGURA 2.9 mostra que em um sistema de controle contínuo o período de amostragem não proporciona influência sobre o desempenho do sistema. Entretanto, o controle digital como pode ser visualizado na FIGURA 2.9 apresenta uma aproximação do controle contínuo à medida que se reduz o período de amostragem.

O desempenho do controlador NCS/WNCS demonstra-se pior que os demais sistemas quando se utiliza de um período de amostragem lento (ponto A). Este comportamento ocorre devido aos atrasos presentes na malha e também devido as perdas de pacotes pelo sistema. O ponto (B) na imagem consiste em um estado do sistema onde pacotes são enviados com rápido período de transmissão que aumentam os

atrasos. O ponto (C) representa o sistema sobrecarregado pela inserção da alta taxa de amostragem, a qual induz uma alta taxa de atrasos no sistema. Como resultado o sistema começa a apresentar perda de pacotes e atrasos que impactam diretamente na estabilidade do NCS/WNCS. Um exemplo do efeito da taxa de amostragem pode ser visualizado nas FIGURAS 2.10 e 2.11.

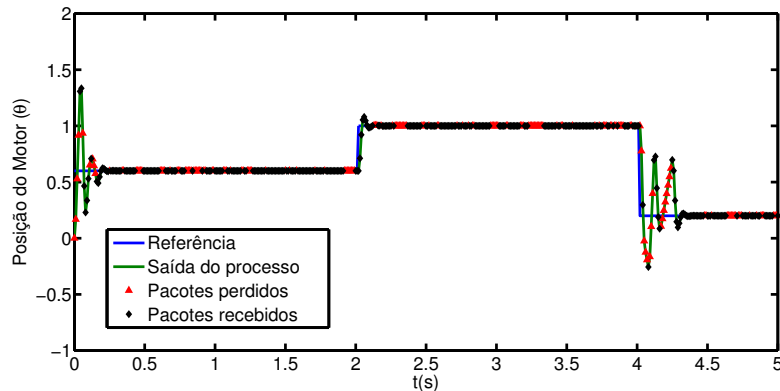


Figura 2.10: WNCS com período de amostragem de 10ms.

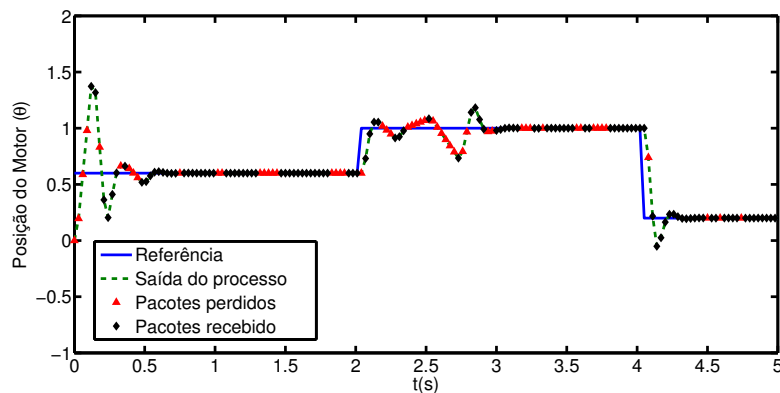


Figura 2.11: WNCS com período de amostragem de 30ms.

Neste exemplo é mostrado o comportamento de um WNCS com 10% de perda de pacote e desprezando os atrasos. No primeiro caso tem-se um período de amostragem de 10ms e observa-se o sistema mais estável. Para o caso 2 o mesmo WNCS opera com período de amostragem de 30ms sobre um enlace de 10% de perdas. Neste caso o período de amostragem utilizado faz com que o sistema fique mais suscetível as perdas, mostrando assim o quão importante é o período de amostragem utilizado pelo WNCS/NCS.

## CAPÍTULO 3

### RSSF E OS PADRÕES ZIGBEE E IEEE 802.15.4

Uma rede de sensor sem fio (RSSF) consiste em uma arquitetura que possibilita a conexão de dispositivos alocados em diversos ambientes. A estrutura deste sistema é formada por uma quantidade de dispositivos, denominados nós sensores, os quais possuem processamento limitado, dimensões reduzidas e custos reduzidos quando comparados aos tradicionais sensores (SILVA, 2008). As aplicações de uma RSSF podem ser classificadas em duas categorias: monitoramento e rastreamento, conforme apresenta-se na FIGURA 3.1.

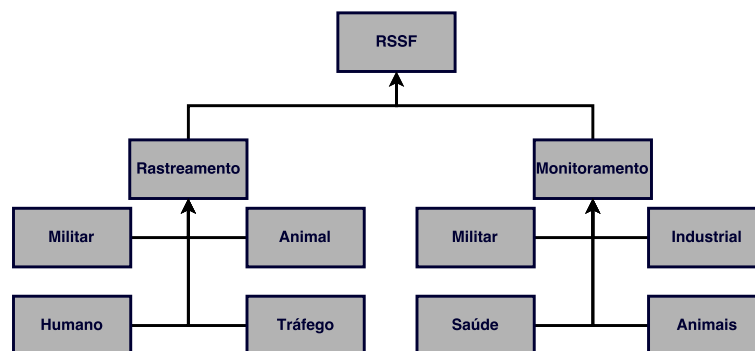


Figura 3.1: Classificação das RSSF. Fonte: Adaptado de YACK (2008)

Conforme FIGURA 3.1, as aplicações de monitoramento incluem análises de características indoor/outdoor sobre sistemas automatizados industriais, análises estruturais e monitoramento humano-estrutural. Em contrapartida as aplicações de rastreamento delimitam-se a: rastreamento humano, animal ou de veículos (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008).

### 3.1 O padrão ZigBee

A ZigBee Alliance consiste em uma associação de companhias como: Motorola, Philips, Samsung, Siemens, Analog Devices e Texas Instruments que desenvol-

veram juntas um padrão de uma tecnologia de comunicação wireless de baixo custo e baixo consumo (BARONTI et al., 2007). O padrão ZigBee é desenvolvido sobre o protocolo IEEE 802.15.4 que é utilizado como um padrão para as camadas inferiores de diversos protocolos utilizados em RSSF. Este protocolo define a camada física (PHY) e a camada MAC utilizadas no ZigBee, FIGURA 3.2.

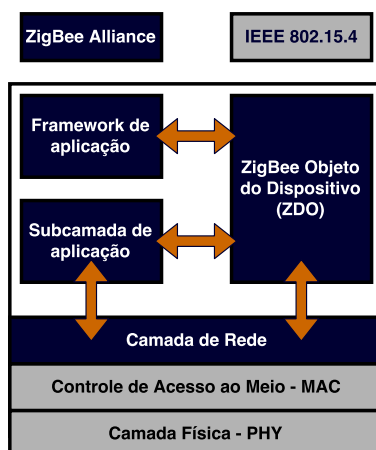


Figura 3.2: Análise dos padrões IEEE 802.15.4 e ZigBee.

Conforme FIGURA 3.2 o padrão ZigBEE opera sobre as camadas MAC e PHY do protocolo IEEE 802.15.4.

### 3.2 Camada Física (PHY)

A camada física (PHY) realiza a interface entre a subcamada MAC e o canal do rádio, e oferece inúmeras séries de serviços e mecanismos de controle essenciais para as camadas superiores da arquitetura. Esta camada designa também as bandas de frequência utilizadas pelo protocolo, que são dispostas em: 2.4 GHz com 16 canais, esta bem difundida pelo Brasil, 915 MHz que apresenta mais aplicações em países como os EUA, com faixa de frequência dividida em 10 canais e 868 MHz com 1 canal (padrão europeu e japonês)(GOMEZ et al., 2006).

A característica organizacional dos canais no protocolo FIGURA 3.3 permite a coexistência do padrão IEEE 802.15.4 com outros protocolos em um mesmo ambiente, como exemplo o protocolo IEEE 802.11b.

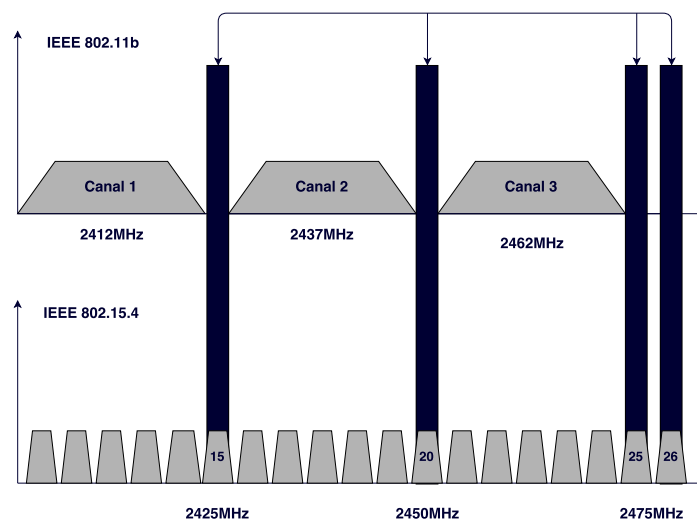


Figura 3.3: Utilização dos protocolos IEEE 802.11 e 802.15.4. Fonte: Adaptado de IEEE(2006).

Na FIGURA 3.3 observa-se as possibilidades de utilização de canais disponíveis em uma situação onde ocorre a coexistência de dois protocolos de transmissão de dados. Neste caso de utilização dos protocolos 802.15.4 e 802.11b os canais 15, 20, 25 e 26 são canais com possibilidades de uso nesta situação. As frequências utilizadas pelo padrão IEEE 802.15.4 suportam o espalhamento espectral com sequência direta (DSSS - *Direct Sequence Spread Spectrum*). A banda de 2.4 GHz utiliza para sua modulação um Offset Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK), no entanto faixas inferiores de frequência da banda utilizam Binary Phase Shift Keying (BPSK). A tabela à seguir apresenta as principais características das 3 bandas.

Tabela 3.1: Características da camada física do padrão IEEE 802.15.4

	2.4GHz	915MHz	868MHz
Taxa bruta de transmissão	250 kbps	40kbps	20kbps
Número de Canais	16	10	1
Modulação	O-QPSK	BPSK	BPSK
Símbolo por bit	4	1	1

Como outras características pertinentes à camada física tem-se: a detecção dos níveis de energia, medição da qualidade do enlace (LQI) para os pacotes recebidos, verificação da ocupação do canal (CAA), evitar colisões (CSMA-CA) e a seleção da frequência de operação.

### 3.3 Controle de Acesso ao Meio (MAC)

A subcamada MAC provê controle coordenado de acesso ao canal físico para a realização das transferências de todos os tipos. Esta camada executa ainda a caracterização dos nós da rede em dois tipos, os quais são: Dispositivos de função reduzida RFDs (*Reduced Function Devices*) e dispositivos de função completa FFDs (*Full Function Device*). Os FFDs são dispositivos equipados com um conjunto completo de funcionalidades da camada MAC, proporcionando assim a estes dispositivos a capacidade de atuação como coordenadores, dispositivos finais, ou roteadores da rede. Neste caso o dispositivo ao agir como coordenador de rede pode enviar *beacons* que proporcionam a sincronização de dispositivos na rede. Em contrapartida os dispositivos RFDs atuam somente como dispositivos finais, implicando diretamente na utilização destes em sensores ou atuadores. Outras características associadas aos tipos de nós em uma RSSF é mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 3.2: Camada MAC do padrão IEEE 802.15.4

Controlador de Rede - FFD	Nó da rede - RFD
Ajuste de parâmetros da rede	Função passiva na rede
Transmite informações pela rede	Efetua buscas por redes disponíveis
Gerenciamento dos nós da rede	Transferência de dados de aplicação
Armazena informações dos nós da rede	Determina o status dos dados
Distribui mensagens entre os nós da rede	Solicita dados ao coordenador de rede
Opera tipicamente no estado ativo	Pode permanecer no estado sleep

### 3.4 Sentido de Comunicação

O protocolo IEEE 802.15.4 apresenta três sentidos de comunicação para RSSF nos modos de operação com ou sem estrutura do superframe. Em um dos sentidos a comunicação ocorre de um dispositivo na rede para o coordenador. No segundo sentido a comunicação é executada de forma inversa, ou seja, a comunicação ocorre do coordenador para os dispositivos finais. O terceiro sentido de comunicação é executado em qualquer sentido e com qualquer dispositivo (MEDEIROS, 2008). O primeiro caso de comunicação apresenta como característica o recebimento de um beacon de

sincronização com o superframe. A FIGURA 2.8 mostra as formas de comunicação com o protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee.

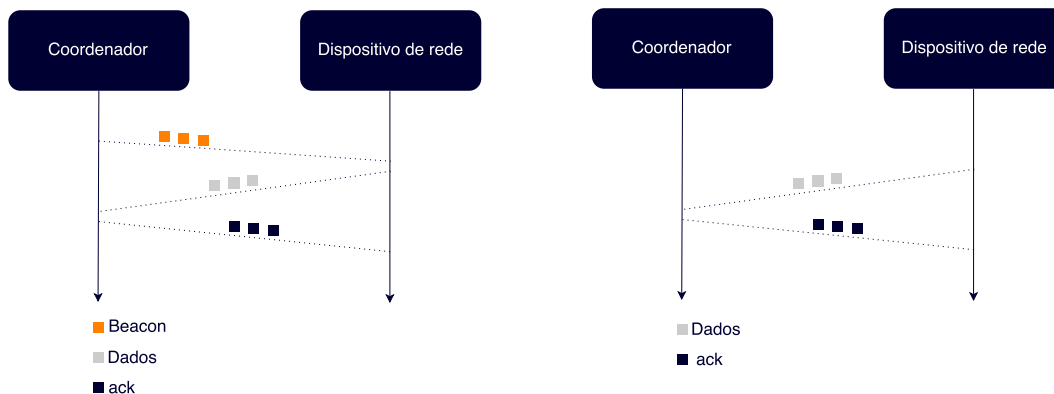


Figura 3.4: Comunicação baseada em *SUPERFRAME* e comunicação sem *SUPERFRAME*. Fonte: Adaptado de MEDEIROS(2008)

Durante a comunicação o protocolo IEEE 802.15.4 apresenta dois mecanismos de acesso ao canal. Se a rede for inicializada no modo intervalo do CSMA/CA do IEEE 802.15.4 e um dispositivo desejar efetuar a comunicação, a subcamada MAC efetuará a reposição dos parâmetros: *number of backoffs*( $NB=0$ ), *Contentation window*( $CW=2$ ), *Backoff exponent* e *retransmission times*( $RT = 0$ ) (MAHMOOD et al., 2014). Após definição da rede é executado o *backoff* da rede que consiste na avaliação do canal, se um nó encontrar o canal ocioso após avaliação este tentará efetuar a transmissão do dado. Se após a avaliação do canal este for identificado como ocupado os valores de *backoff* e *backoff exponent* são incrementados, caso estes cheguem ao seu valor máximo o nó abandonará a tentativa de transmissão de pacotes. Para o canal de comunicação livre, o nó transmite os pacotes no momento de reconhecimento de canal livre e transmissão de dados, dois procedimentos são acionados pelo padrão, sendo estes: *Acknowledge based*, utilizado no trabalho em questão para obtenção dos pacotes perdidos e *no-Acknowledge based*. No modo *Acknowledge based* o nó irá aguardar pela transmissão de um pacote ACK. O recebimento deste pacote caracteriza sucesso na transmissão. No entanto caso o nó falhe *RT* é incrementada, caso essa variável chega ao valor máximo pacote é descartado.

## CAPÍTULO 4

### TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção descreve as investigações anteriores relacionadas à perda de pacotes no NCS, onde verificou-se que muitos trabalhos utilizam o modelo Bernoulli para simulações. Ulusoy (2011) apresenta um sistema de controle preditivo implementado e simulado em um protocolo IEEE 802.15.4. A ferramenta de simulação utilizada no estudo foi TrueTime que utiliza uma distribuição aleatória de perdas sobre uma série  $(X_i)_{i=1}^n$ . Este fato acarreta em uma simulação para casos genéricos, ou seja, casos onde o enlace de comunicação do WNCS/NCS não apresenta interferências para transmissão, mas sim aleatoriedade nas perdas de pacote em um WNCS que pode levar a um erro que não representa um caso real com perdas em rajadas.

Estudos prévios de transmissão de dado com e sem fio referem-se aos modelos de Markov. Yajnik (1999) faz uma análise comparativa de modelos de perdas, onde os modelos de Bernoulli, Gilbert-Elliot e um modelo da cadeia de Markov de ordem  $n$  são analisados sobre uma topologia do tipo end-to-end unicast e multicast com diferentes tempos de envio de dados. No entanto, o trabalho em questão não avalia o comportamento destes modelos para o protocolo IEEE 802.15.4 aplicado em WNCS/NCS. Os autores reportam que ambos os modelos representaram a série de dados (trace real) na modelagem das perdas, sendo que cada modelo demonstrou-se mais acurado para determinadas características de transmissão de dados.

Em Iqbal (2012) são executadas análises de dependências temporais de perdas de pacotes através da cadeia de Markov de 2ª ordem. Nesta análise é apresentada uma precisão significativa da cadeia de Markov na avaliação de comportamentos reais de perdas de dados pelos protocolos. O estudo realizado levou em consideração BERs (*Bit Error Rate*) e FERs (*Frame Error Rate*) e sobre estas características foi efetuada a comparação entre comportamento real e modelos sintéticos de perdas de

pacotes.

Shu (2007) efetua uma análise de cadeia de Markov para modelagem de perdas, que é realizada sobre o protocolo IEEE 802.15.4 submetido a rede de sensor sem fio. Nesta análise os comportamentos das perdas são modelados em um cenário com vários nós competindo.

Hasslinger (2008) analisa modelos realísticos que representem as falhas e as deficiências inerentes durante a transmissão de dados via rede. Neste caso a cadeia de Markov é aplicada sobre o sistema TCP (*Transmission Control Protocol*) com tráfego controlado para averiguar a verossimilhança deste modelo com casos reais. Nesta análise os traces foram obtidos a partir de um enlace de comunicação com velocidade de 2,5 Gb/s.

Em outros estudos de NCS/WNCS, Chung (2015) efetua análises dos modelos da cadeia de Markov sobre um processo operado via protocolo wirelessHart. Nesta análise são avaliados os modelos de Bernoulli e modelos da cadeia de Markov de ordem superior (CHUNG et al., 2015b). Em Wu (2007) é efetuada uma análise da estabilidade de um sistema de controle em rede utilizando de cadeias de Markov para descrever o comportamento das perdas. A cadeia de Markov é utilizada para descrever a quantidade de perdas de pacotes em um tempo atual  $k$ . Em contraste com as análises anteriores, Shi (2009) utiliza de duas cadeias de Markov de estado finito para modelar e avaliar a estabilidade de um sistema retroalimentado submetido a atrasos variantes no tempo (SHI; YU, 2009).

Outras análises de sistemas que buscam a representação e modelagem de sistemas de controle em rede têm sido propostas levando em consideração a relação entre atrasos e perdas de pacotes enviados. Como exemplo, em Tian (2010) uma análise de controle em tempo real é desenvolvida para avaliar o desempenho do protocolo IEEE 802.11. Neste trabalho são realizadas várias análises de desempenho de um WNCS, dentre as quais um estado crítico de tráfego de dados é modelado mediante cadeia de Markov (TIAN; TIAN; FIDGE, 2010).

Segundo Gupta (2010) a utilização de protocolos wireless consiste em um

desafiador problema para análise e desenvolvimento de sistemas de controle em rede (WNCS). Neste sentido inúmeras metodologias vêm sendo desenvolvidas visando a melhoria do desempenho dos WNCS.

Seguindo o conceito da aplicação de modelagem de sistemas de controle em rede, o presente trabalho tem por objetivo avaliar qual modelo da cadeia de Markov apresenta maior acurácia para representar o comportamento de um WNCS operando com IEEE 802.15.4 perante diferentes percentuais de perdas de pacotes pelo sistema em malha fechada.

## CAPÍTULO 5

### METODOLOGIA

O presente capítulo mostra o procedimento utilizado para as análises de perdas de pacotes utilizando o protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee. Esta análise consiste inicialmente na obtenção da sequencia real de perda de pacotes em transmissão com transceptores IEEE802.15.4. Em seguida, os modelos são ajustados para reproduzir essas sequencias de perdas. Posteriormente é realizada a comparação da saída da planta dos casos simulados com modelos de Bernoulli e Gilbert-Elliot com a saída da planta que considera as perdas reais de pacotes.

#### 5.1 Medição das perdas de pacotes

A medição da perdas foi executada mediante topologia do tipo *end-to-end* entre dois nós xbees (XBEE-PRO; MODULES, 2013). O Nó 1 foi parametrizado como nó controlador e o nó 2 foi parametrizado como nó sensor. Sobre esta topologia foi inserido um nó de captação de dados (*Packet Sniffer*) com dispositivo SmartRF da Texas Instruments (INSTRUMENTS, 2010). Este dispositivo foi utilizado para analisar a quantidade de pacotes perdidos durante a transmissão e também para analisar o número de retransmissões efetuada pelo nó sensor. A FIGURA 5.1 expõe o cenário utilizado para coletar as informações comportamentais de transmissão do protocolo.

Na FIGURA 5.1 observa-se que o dispositivo *Smart RF* utilizado para analisar o tráfego de pacotes localiza-se próximo do nó controlador. O motivo deste posicionamento consiste em analisar se os dados do nó sensor eram enviados e recebidos pelo nó controlador. Este posicionamento foi utilizado para garantir que os dados enviados e os ACKs fossem percebidos pelo o *packet sniffer*. A comunicação entre os nós da malha foi desenvolvida mediante a configuração de alguns parâmetros dos módulos (nó sensor e nó coordenador) que são apresentados na Tabela 5.1.

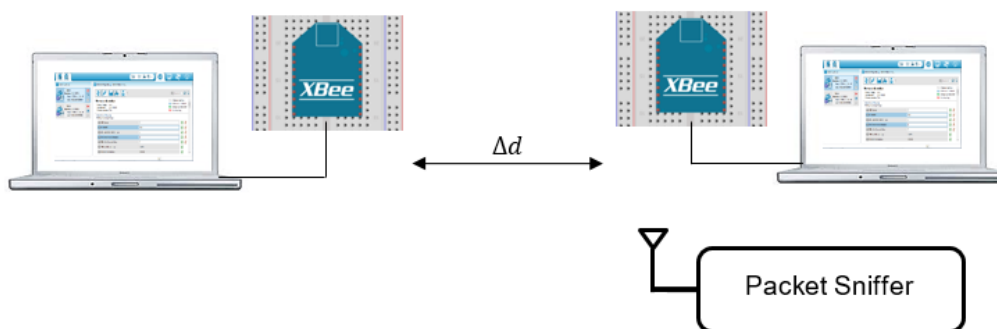


Figura 5.1: Cenário para realização dos ensaios.

Tabela 5.1: Configuração dos Nós na rede

Módulo controlador		Módulo Sensor	
CH	C	CH	C
ID	3332	ID	3332
DH	01	DH	02
DL	02	DL	01
MM	0	MM	0
RR	0	RR	0

Os parâmetros referenciados na tabela consistem respectivamente ao: Canal, endereço de destino *high*, endereço de destino *low*, modo MAC, número de retransmissões que neste caso foram restritas ao *default* de repetições do protocolo, no caso 3. Outro parâmetro modificado para análise foi PL (*power Level*), este parâmetro configura a potência do sinal de transmissão que para a análise e questão foi utilizado da configuração em *lowerst* (baixa potência) com intuito de provocar um estresse no comportamento da transmissão de dados. Para esta etapa foi utilizado o software XCTU (CONFIGURATION, 2008). Este *software* possibilita a configuração dos módulos Xbees e conexão para testes de transmissão.

Mediante configuração e cenário montado, os nós foram submetidos a variações métricas em ambiente *indoor* para a avaliação do número de pacotes perdidos. Tais variações consistiram em distâncias, que apresentavam uma distribuições aproximadas de perdas de pacotes conforme Tabela 5.2.

Nesta análise os dispositivos eram alocados em distâncias que apresentassem perdas percentuais conforme a tabela mostrada anteriormente, após esta alocação

Tabela 5.2: Perda de pacote aproximada para cada distância

Distância(m)	Razão de Perdas (%)
1	10
3	20
7	30
9	40
13	50

e montagem da rede entre os nós foi realizada a comunicação. Na análise em questão os pacotes foram enviados sobre intervalos constantes de 100ms para cada transmissão de pacote.

A partir das transmissões era avaliado o comportamento dos dados via software *XCTU* e *Packet Sniffer*. O total de pacotes enviados para cada perda percentual foi de 200.000 pacotes que se dividem em: 20 repetições de 10.000 pacotes para cada percentual de perda analisado. A Tabela 5.3 mostra o padrão dos dados utilizados para a análise.

Tabela 5.3: Configuração da transmissão de pacotes

Razão de Perdas(%)	Dimensão do pacote (bytes)	Intervalo de transmissão(ms)	Pacotes enviados
10	22	100	10.000
20	22	100	10.000
30	22	100	10.000
40	22	100	10.000
50	22	100	10.000

Com base nos dados transmitidos foi desenvolvido via plataforma Matlab um algoritmo para efetuar a leitura dos dados. O algoritmo em questão foi utilizado sobre as informações obtidas pelo *packet sniffer*, conforme mostra a Figura 5.2.

A FIGURA 5.2 mostra o formato dos dados para o padrão IEEE 802.15.4, onde o primeiro campo mostra um número de controle do *packet sniffer* representado pelos 8 primeiros bytes. O segundo campo consiste no tempo que o pacote foi recebido (*time*  $\mu$ s), o qual é representado por 8 bytes. O terceiro campo mostra a dimensão do pacote onde nota-se a diferença de tamanho entre os pacotes de dados e pacotes ACK. O quarto campo consiste no quadro de controle com *flags*. O quinto campo mostra o número de sequência dos pacotes.

P.nbr.	RX	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload
1	RX	+0	22	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x66	0x3332	0x0000	0x0000	74 65 73 74 65 20 64 65 6C 61 79
2	RX	+1083	5	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr ACK 0 0 0 0	0x66				LQI 118 FCS OK
3	RX	+501450	22	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x67	0x3332	0x0000	0x0000	74 65 73 74 65 20 64 65 6C 61 79
4	RX	+1094	5	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr ACK 0 0 0 0	0x67				LQI 118 FCS OK
5	RX	+500093	22	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x68	0x3332	0x0000	0x0000	74 65 73 74 65 20 64 65 6C 61 79
6	RX	+1094	5	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr ACK 0 0 0 0	0x68				LQI 118 FCS OK
7	RX	+499808	22	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x69	0x3332	0x0000	0x0000	74 65 73 74 65 20 64 65 6C 61 79

Figura 5.2: Análise dos dados pelo *PACKET SNIFFER*.

O número de sequência dos pacotes consiste em um valor que é repetido em casos de retransmissão de dados ou incrementado em casos de transmissão. Desse modo este campo foi utilizado para analisar os pacotes perdidos durante a transmissão entre os nós. Na sequência observa-se a PAN (*Personal Area Network*), endereço de destino, *payload*, LQI (*Link Quality Indicator*) e o FCS (*Frame Control Status*). O *trace* real obtido mediante transmissões foi processado em um *script* desenvolvido no Matlab, que calculava o número de pacotes perdidos durante a transmissão.

A seguir a FIGURA 5.3 mostra um exemplo da transmissão analisada mediante *packet sniffer*, onde o primeiro pacote contém os dados enviados pelo nó sensor. Nestes dados nota-se que o FCF (*Frame Control Field*) possui a requisição de um ACK e o *Sequence Number* do pacote possui o valor de 0x65(hexadecimal). O segundo pacote consiste em um ACK do pacote anterior, pois este pacote possui o mesmo *Sequence Number* e um valor zero no FCF. A análise em questão mostra que o pacote 0x65 foi recebido com sucesso pelo nó controlador. A terceira e quarta linha da análise mostram o pacote 0x66(hexadecimal) e na quinta linha o seu ACK, este fato significa que houve uma retransmissão no envio, mas o pacote foi entregue com sucesso.

A FIGURA 5.4 mostra uma análise de transmissão com perdas de pacotes,

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX 1	+0 =0	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x65	0x3332	0x0000	0x0000	65 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	42	OK
P.nbr. RX 2	+1120 =1120	5	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr ACK 0 0 0 0	0x65					233	OK
RX 3	+105664 =106784	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x66	0x3332	0x0000	0x0000	66 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	42	OK
RX 4	+2497 =109281	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x66	0x3332	0x0000	0x0000	66 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	42	OK
P.nbr. RX 5	+1120 =110401	5	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr ACK 0 0 0 0	0x66					233	OK
RX 6	+100592 =210993	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x67	0x3332	0x0000	0x0000	67 00 6E 6F 76 65 F0 74 65 73 74 65	42	ERR
RX 7	+4996 =215989	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x67	0x3332	0x0000	0x0000	67 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	42	ERR

Figura 5.3: Análise de pacotes sem perdas e com retransmissão.

nesta transmissão o nó sensor tenta enviar o pacote quatro vezes. A partir da quarta tentativa como não houve ACK recebido, o pacote foi considerado perdido e um novo pacote foi enviado ao nó controlador. Na FIGURA 5.4 este fato ocorre com o pacote 0x68(hexadecimal) que é retransmitido por quatro vezes sem sucesso. Após as quatro tentativas o pacote 0x69(hexadecimal) é enviado ao nó controlador.

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field	Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX 9	+101633 =320114	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x68	0x3332	0x0000	0x0000	68 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	0	OK
RX 10	+2496 =322610	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x68	0x3332	0x0000	0x0000	68 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	0	OK
RX 11	+2496 =325106	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x68	0x3332	0x0000	0x0000	68 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	0	OK
RX 12	+2496 =327602	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x68	0x3332	0x0000	0x0000	68 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	0	OK
RX 13	+101665 =429267	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x69	0x3332	0x0000	0x0000	69 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	0	OK
P.nbr. RX 14	+1121 =430388	5	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr ACK 0 0 0 0	0x69					160	OK
RX 15	+108048 =538436	23	Type Sec Pnd Ack.req PAN_compr DATA 0 0 1 1	0x6A	0x3332	0x0000	0x0000	6A 00 6E 6F 76 6F 20 74 65 73 74 65	0	OK

Figura 5.4: Análise ds pacotes com retransmissão e perdas.

A verificação da variabilidade das perdas dos 10.000 pacotes enviados foi efetuada mediante a repetição destas transmissões para cada distância, onde foram realizadas 20 repetições das transmissões. A Figura 5.5 mostra um *boxplot*, o qual exhibe o comportamento das perdas durante as transmissões. Desta análise pode-se observar a razão média das perda de pacotes (Centro da caixa), o valor da mediana (linha

central), o quartil inferior e superior e o *Whisker* que representa os valores mínimos e máximos. Pode ser visto através da análise que o traçado de dados da análise prática foi consistente e mostrou pouca variação para cada uma das distâncias analisadas.

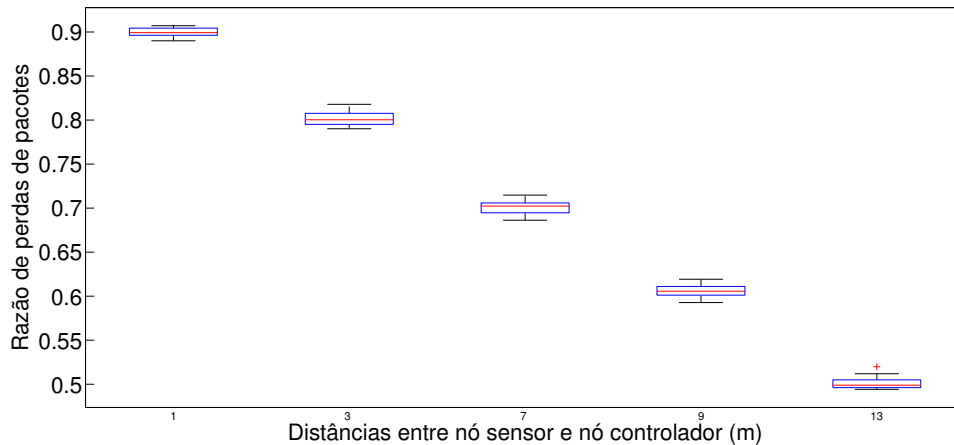


Figura 5.5: Resultado do comportamento das perdas sobre o cenário real utilizado.

## 5.2 Modelo de Bernoulli e Gilbert-Elliot para perdas de pacotes

O modelo de Bernoulli para perda de dados apresenta uma sequência aleatória das perdas do tipo IID (Independente e Identicamente Distribuída). Isto é, a probabilidade de série dos dados  $X_i$  ser 0 ou 1 independe de outros valores da série temporal e a probabilidade é independente de  $i$ . Este modelo caracteriza-se por um simples parâmetro,  $r$ . A estimativa deste parâmetro,  $(\hat{r})$  é fornecida por:

$$\hat{r} = n_1/n \quad (5.1)$$

onde  $n_1$  consiste na quantidade do número de vezes que 1 (pacote enviado) ocorre na série  $(x_i)_{i=0}^n$  e  $n$  consiste no número de amostras da série de dados. Desse modo o parâmetro  $r$  consiste na taxa de perda média (YAJNIK et al., 1999).

O modelo de Gilbert-Elliot para perdas de dados consiste em uma classe especial de modelos da cadeia de Markov, onde sua representação é efetuada por uma cadeia de dois estados que utiliza de uma sequência binária, a qual é dividida de

acordo com a ordem das transições da série (IQBAL; KHAYAM, 2012). Nesta série o estado atual  $X_i$  de um processo estocástico depende apenas do valor prévio,  $X_{i-1}$ .

Assim como o modelo de Bernoulli, o modelo de Gilbert-Elliot avalia a dependência das perdas. No entanto este modelo possui parâmetros adicionais denominados  $(p)$  e  $(q)$ . Estes parâmetros são responsáveis pela determinação da probabilidade de transição entre os estados da série temporal  $X_i$ .

No modelo de Gilbert-Elliot os estados descrevem o comportamento dos dados no enlace de comunicação do NCS, como exemplo: o estado 1 pode ser representado como sucesso no envio do dado e o estado 0 pode representar perdas da informação. A caracterização dos parâmetros  $(p)$  e  $(q)$  é fornecida conforme equação:

$$p = P[X_i = 1 | X_{i-1} = 0] \quad (5.2)$$

$$q = P[X_i = 0 | X_i = 1] \quad (5.3)$$

onde os parâmetros  $\hat{p}$  e  $\hat{q}$  consistem em estimadores de máximo verossimilhança para um conjunto de dados.

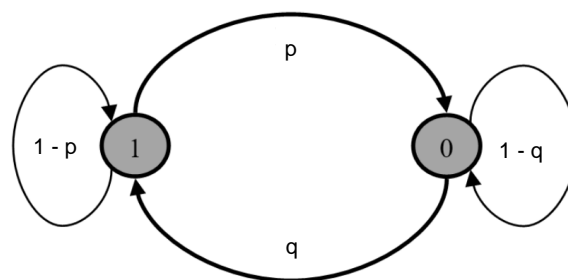


Figura 5.6: Modelo de Gilbert-Elliot para análise de perda de pacote

$$\hat{p} = n_{01}/n_0 \quad (5.4)$$

$$\hat{q} = n_{10}/n_1 \quad (5.5)$$

A determinação dos estimadores é representada pelo número de vezes que ocorre a transição de 0 para 1,  $n_{01}$  e pela análise de quantidade de vezes que a série vai de 1 para 0,  $n_{10}$ . Os parâmetros  $n_0$  e  $n_1$  referem-se respectivamente ao número de 0s e o número de 1s na série de dados. Após o processamento do *trace* real para obtenção da razão de perdas de pacotes de cada cenário, (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) os modelos de Bernoulli e Gilbert foram ajustados mediante estimadores de máximo verossimilhança baseado na série de dados construída perante análise real de transmissão. Neste caso foram analisadas as ocorrências de perdas de pacotes (0s) na série e não perdas de pacotes (1s) na série. Os parâmetros obtidos são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Parâmetros estimados para cada razão de perdas de pacotes

razão de de perdas %		$r$	$p$	$q$
<b>10</b>	<b>média</b>	<b>0,89</b>	<b>0,78</b>	<b>0,09</b>
10	$\sigma$	0,01	0,01	0,03
10	min	0,89	0,77	0,08
10	max	0,90	0,79	0,09
<b>20</b>	<b>média</b>	<b>0,80</b>	<b>0,55</b>	<b>0,13</b>
20	$\sigma$	0,01	0,01	0,01
20	min	0,79	0,52	0,12
20	max	0,80	0,57	0,13
<b>30</b>	<b>média</b>	<b>0,70</b>	<b>0,40</b>	<b>0,17</b>
30	$\sigma$	0,01	0,00	0,01
30	min	0,69	0,39	0,16
30	max	0,70	0,43	0,18
<b>40</b>	<b>média</b>	<b>0,60</b>	<b>0,35</b>	<b>0,23</b>
40	$\sigma$	0,01	0,01	0,00
40	min	0,58	0,34	0,22
40	max	0,61	0,36	0,24
<b>50</b>	<b>média</b>	<b>0,49</b>	<b>0,36</b>	<b>0,38</b>
50	$\sigma$	0,01	0,01	0,01
50	min	0,49	0,34	0,37
50	max	0,50	0,37	0,39

Na Tabela 5.4 observa-se que o parâmetro  $r$  que condiz com o modelo de Bernoulli apresentou distribuição média das perdas próximo a 11% no caso de 10% de perdas, no entanto para o modelo de Gilbert observa-se a separação da transmissão em seus dois estados,  $p$  e  $q$  onde foram analisadas as probabilidade de transição de

estados durante as transmissões. Após os ajustes dos modelos de Gilbert e Bernoulli foi efetuada a geração de pacotes por estes modelos, a figura 5.7 mostra o comportamento dos pacotes para a análise real, e para os modelos de perdas. Nesta análise observa-se que o caso real apresenta perdas de pacotes em rajada, o mesmo ocorre com o modelo de Gilbert. No entanto o modelo de Bernoulli não apresenta perdas em rajadas, isto se deve a característica do modelo em gerar perdas uniformemente distribuídas ao longo da série.

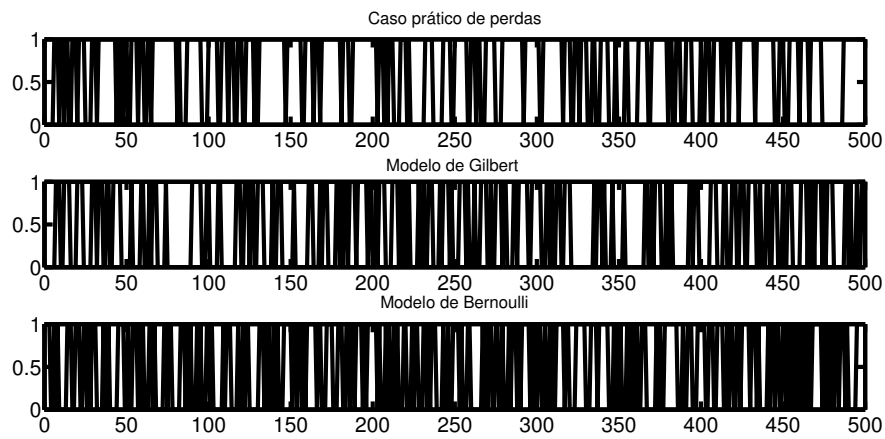


Figura 5.7: Análise do comportamento dos *traces*.

### 5.3 Simulação do WNCS com perdas

Para comparar a qualidade da representação dos modelos de Bernoulli e Gilbert perante as perdas de pacotes reais, foi utilizado um processo de segunda ordem com controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) cujos valores foram de 0,0386 para o ganho proporcional, 0,0125 para o integral e 0,0115 para o ganho derivativo. O processo desenvolvido via Simulink pode ser observado nos Apêndices A, B e C. A análise foi realizada em um WNCS cujo objetivo é efetuar o controle de posicionamento de um motor, cuja a equação no espaço de estados é dado por

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -b/J & Kt/J \\ 0 & -Kv/L & -R/L \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix}$$

O motor utilizado na simulação consiste em um motor CC (Corrente contínua) de 90W (Watts), os parâmetros do motor são mostrados na Tabela 5.5

Parâmetros	Valores	
$J$	$6,28 \times 10^{-6}$	$Kgm^2$
$b$	$2.1 \times 10^{-6}$	Nms/rad
$Kv$	0,118	Vs/rad
$Kt$	0,119	Nm/A
$R$	11,8	$\Omega$
$L$	$6,16 \times 10^{-3}$	H

Onde  $J$  consiste no momento de inércia do motor,  $b$  coeficiente de amortecimento viscoso,  $K_v$  consiste na constante de indução do rotor e  $k_t$  refere-se a constante de torque do motor. Outras variáveis do sistema são:  $\theta$  que consiste no ângulo de posicionamento,  $\dot{\theta}$  que representa a velocidade angular,  $L$  a indutância do núcleo e  $R$  a resistência deste (NISE, 2012). Os valores utilizados para a simulação são descritos em ULUSOY(2011).

Para a realização das simulações o sistema de controle contínuo foi convertido para um sistema discreto utilizando de diferentes períodos de amostragem para

avaliação do WNCS digital. Uma das plantas discretizadas (período de amostragem de 10ms) utilizadas nas análises é mostrada na Figura 5.8. A função de transferência  $H(z)$  do motor foi recalculada para cada período de amostragem através do método Zero Order Hold (ZOH).

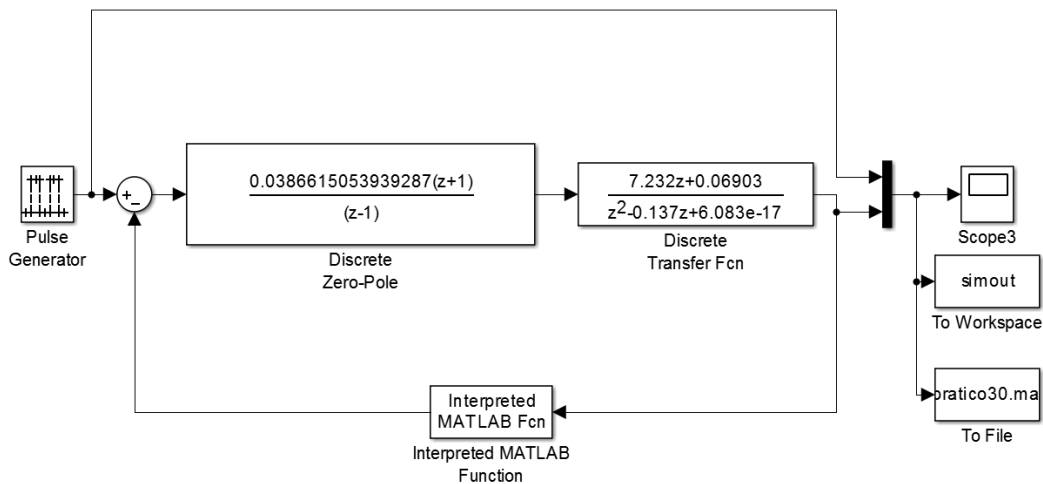


Figura 5.8: Planta utilizada na simulação do WNCS com período de amostragem de 10 ms.

O PID do sistema foi desenvolvido mediante LGR (Lugar Geométrico das Raízes), que foi desenvolvido para melhorar a resposta transitória e efetuar a correção do erro do sistema. O controlador foi projetado mediante ferramenta *SISOTOOL* (Matlab) e como parâmetros foram utilizados um *overshoot* de 20% e tempo de estabilização de 0.2s. Para a execução das análises o controlador PID foi modificado para cada função de transferência  $H(z)$  desenvolvida, os valores dos controladores desenvolvidos são observados nos Apêndices: A, B e C.

Após desenvolvimento do ambiente de simulação foram realizadas as análises dos modelos, onde cada valor de saída da planta em cada período de amostragem era considerado um dado enviado do nó sensor para o nó controlador da rede. Durante a análise o pacote foi considerado perdido se o trace correspondente da medição real, Bernoulli ou modelo Gilbert, indicasse a perda (zero padrão). Nesse caso, para não desestabilizar a planta o pacote anterior era enviado ao controlador. A Figura 5.9 mostra a metodologia utilizada para implementar a perda de dados na simulação baseada no trace de pacotes.

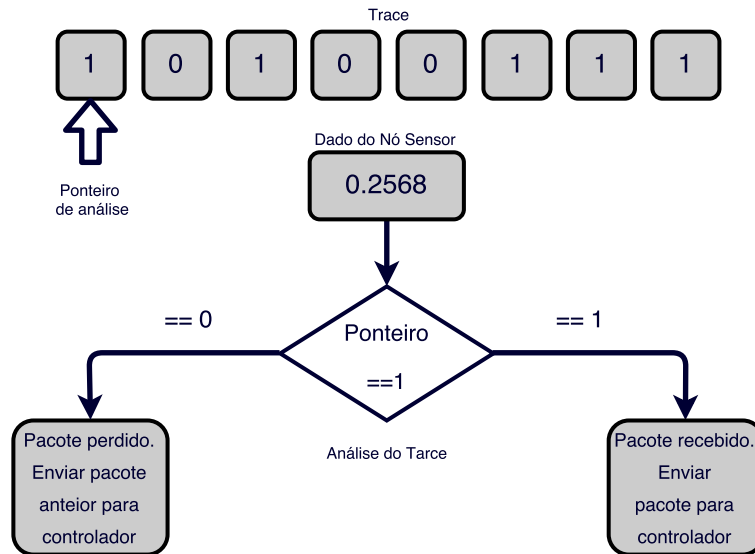


Figura 5.9: Algoritmo utilizado na simulação do WNCs.

Os períodos de amostragem utilizados na análise são mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Período de amostragem (ms) utilizados nas simulações

Análises	Períodos de amostragem (ms)
1	10
2	30
3	50
4	70
5	90
6	100

A diferença entre a resposta do sistema  $y$  e a entrada de referência  $u$ , o erro do sistema  $e$ , foram armazenadas várias vezes para cada análise. O desempenho do sistema foi avaliado pelo coeficiente de determinação  $R^2$  dado por

$$R^2 = 1 - \frac{(n-1)(SSE)}{(n-p)(SST)} \quad (5.6)$$

onde  $n$  consiste no número de observações da série,  $p$  representa o coeficiente de regressão,  $SSE$  consiste no somatório do erro quadrático,  $SST$  consiste no somatório quadrático total. A análise através do  $R^2$  permite uma análise variando entre 0 e 1 indicando o quanto os modelos de Bernoulli e Gilbert-Elliott conseguem aproximar-se do caso de real de perdas. Outra métrica utilizada na análise de desempenho dos

modelos foi o RMSE (*Root Mean Square Error*) dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_i - r_i)^2} \quad (5.7)$$

Onde, N é o número de amostras, y(i) consiste no valor observado e r(i) representa os valores modelados. Os valores RMSE obtidos também podem ser interpretados como percentuais pois os erros são relativos à diferença entre a saída e os degraus de valor unitário aplicados como entrada no sistema. Estas análises foram utilizadas para determinar se o modelo de Bernoulli ou modelo de Gilbert de perdas possuíam maior relação com o comportamento apresentado pela planta com caso real de perdas.

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são mostrados os resultados das análises do WNCS de um motor CC com período de amostragem de 10ms. A FIGURA 6.1 mostra o WNCS quando não há perdas de pacotes. Nesta análise nota-se a característica subamortecida do sistema de segunda ordem e também o sobre elevação de 20%. O RMSE nesta simulação foi de 0,1851. A FIGURA 6.2 mostra o mesmo tipo de análise, no entanto a taxa de perdas de pacotes foi de 30%, a qual foi mensurada mediante protocolo IEEE 802.15.4. Nesta análise o RMSE do sistema foi de 0,3078.

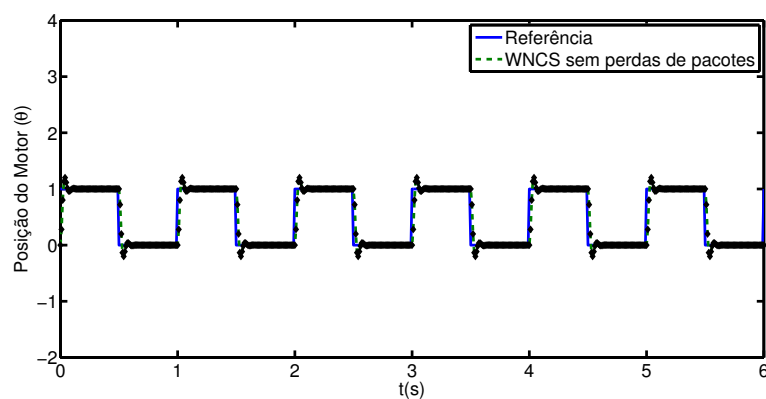


Figura 6.1: WNCS sem perdas de pacotes.

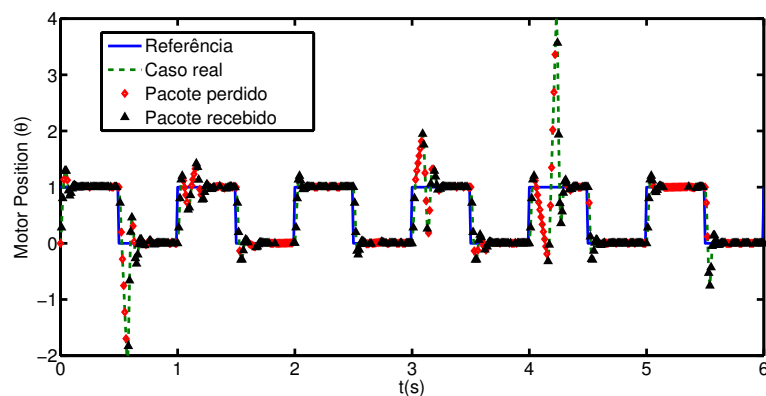


Figura 6.2: WNCS com caso prático de perdas.

A FIGURA 6.3 mostra a resposta do sistema para uma taxa de 30% de perdas de pacotes mediante modelo de Bernoulli. A FIGURA 6.4 mostra a resposta do sistema para perdas de pacotes de 30% mediante modelo de Gilbert. O RMSE para este caso foi de 0,3587.

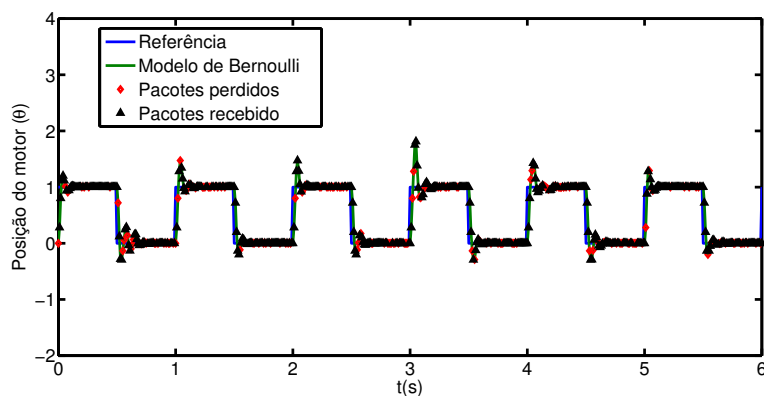


Figura 6.3: WNCs com modelo de Bernoulli.

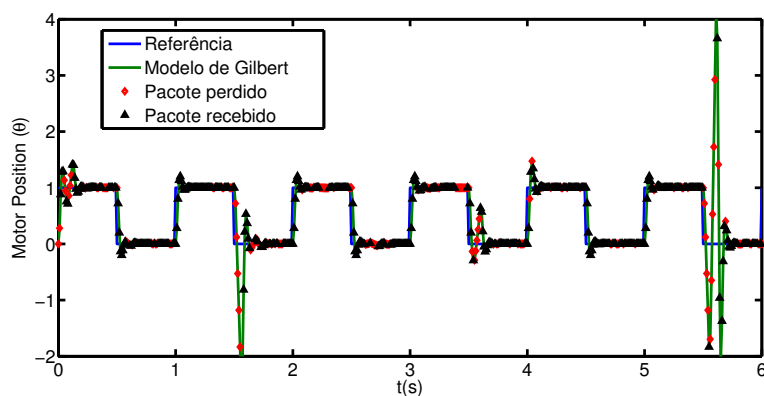


Figura 6.4: WNCs com modelo de Gilbert.

Mediante análises observa-se que o modelo de Bernoulli apresentou um erro menor ( $RMSE = 0,2002$ ) que o erro observado na simulação com o caso real de perdas de pacotes. Este fato ocorreu, pois, o modelo distribuiu as perdas ao longo da série, o que minimiza a influência destas sobre a simulação do WNCs. Por outro lado, a comparação entre modelo de Gilbert-Elliot (FIGURA 6.4) e caso real de perdas (FIGURA 6.2) mostra similaridade no comportamento de saída dos modelos sobre o WNCs. Esta similaridade ocorreu devido a análise de estados proporcionada pelo modelo de Gilbert-Elliot, que acarretou na atribuição de perdas em rajadas na simulação

do WNCS, resultando em um  $RMSE = 0,3587$ , que se aproximou do erro provido pelo WNCS com as perdas reais ( $RMSE = 0,3078$ ). Este fato mostra que o modelo de Gilbert-Elliot acarretou em uma boa representação das perdas de pacotes. No entanto o modelo de Bernoulli falha na representação das perdas pelo protocolo IEEE 802.15.4 para altas taxas de perdas de pacotes (maiores que 20%).

As FIGURAS 6.5 e 6.6 mostram o RMSE e análise mediante  $R^2$  para o caso real de perdas (R), e para os modelos de Gilbert-Elliot(G) e Bernoulli (B). A análise da FIGURA 6.5 foi obtida mediante execução de 20 medições com 10mil pacotes, onde foi calculado o desvio padrão para cada medição e plotado o RMSE médio com intervalo de confiança de 95%. Para razões de perdas menores que 20% ambos os modelos de Gilbert-Elliot e Bernoulli proporcionam uma boa simulação de perdas de pacotes. No entanto para altas taxas de perdas de pacotes apenas o modelo de Gilbert-Elliot apresentou um RMSE próximo do caso real de perdas, mostrando uma precisão maior na modelagem de pacotes perdidos que o modelo de Bernoulli.

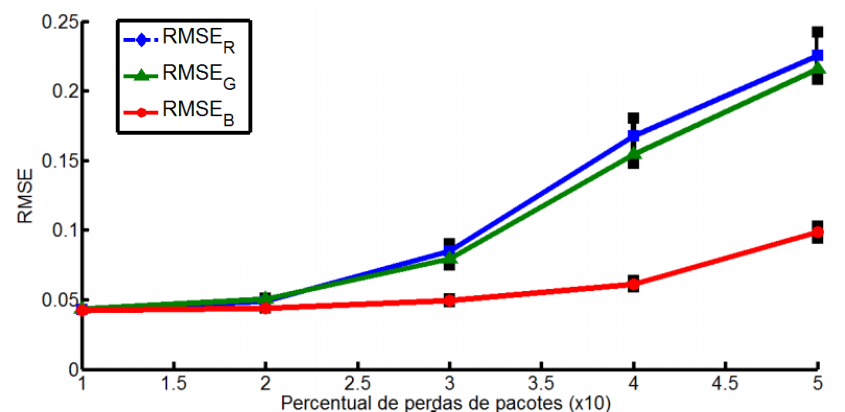


Figura 6.5: RMSE em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10ms.

Esta divergência entre os modelos de perdas de pacotes é também observada quando altera-se o período de amostragem do controlador do WNCS. As análises das FIGURAS 6.7 e 6.8 mostram que o modelo de Gilbert-Elliot acarretou em um RMSE e  $R^2$  similar ao caso real de perdas mesmo para outros períodos de amostragem, no

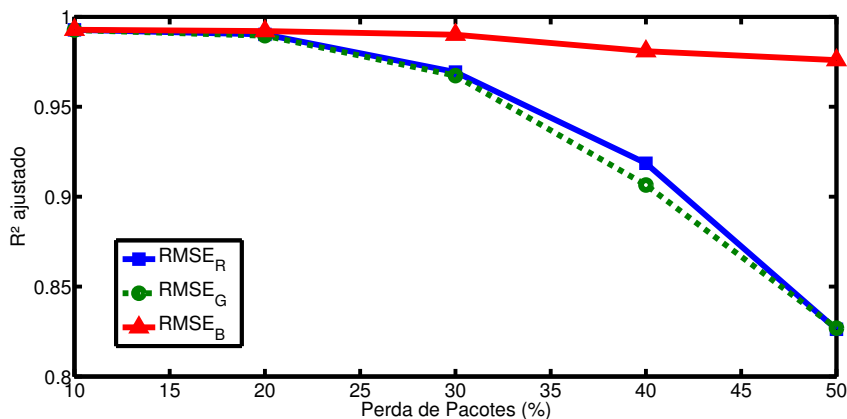


Figura 6.6:  $R^2$  em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10ms.

caso: 10ms, 50ms e 100ms.

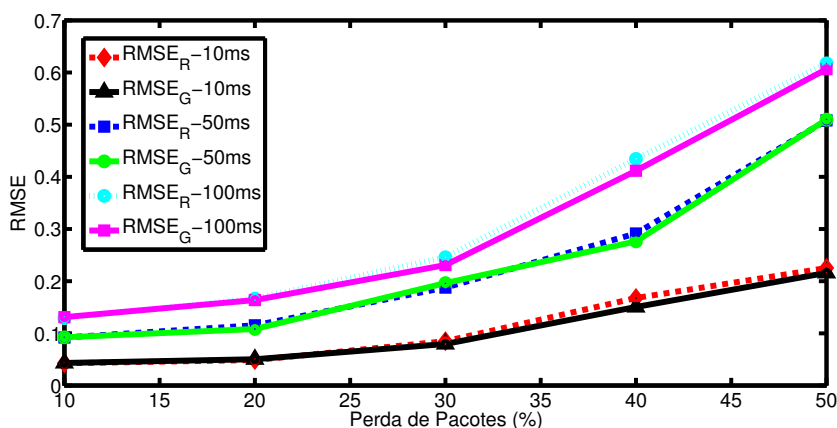


Figura 6.7: RMSE em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10,50 e 100ms.

A relativa acurácia do modelo de Gilbert-Elliot para perdas de pacotes pode ser verificada na Tabela 6.1 que mostra o RMSE percentual de cada modelo. Esta análise avalia a percentagem de erro dos modelos de Gilbert-Elliot e Bernoulli na representação do caso real de perda de pacote mediante a variação da período de amostragem. Nesta análise o modelo de Gilbert-Elliot mostrou-se próximo do erro ocorrido no caso real de perdas para várias taxas de perdas. Observa-se na análise que os erros percentuais para o modelo de Gilbert-Elliot foram menores que 6%. No entanto o modelo de Bernoulli apresentou erros percentuais entorno de 40 e 50% para casos com alta taxa de perda sobre o WNCS.

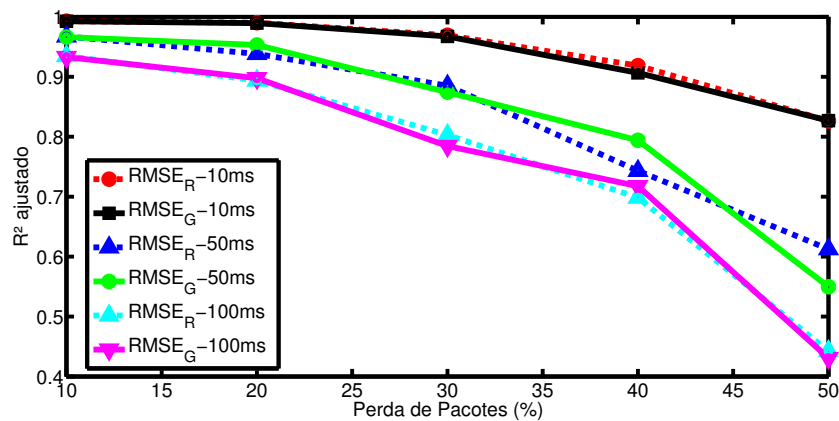


Figura 6.8:  $R^2$  em função da razão de perdas de pacotes para um período de amostragem de 10,50 e 100ms.

Tabela 6.1: Comparativo entre os erros obtidos na simulação com caso real de perdas e modelos

Parâmetros	Período de amostragem 10ms			Período de amostragem 30ms			Período de amostragem 50ms		
	10%	30%	50%	10%	30%	50%	10%	30%	50%
$RMSE_R$	0,0426	0,0849	0,2252	0,0689	0,1371	0,3771	0,0920	0,1876	0,5082
$RMSE_G$	0,0432	0,0796	0,2159	0,0697	0,1404	0,3743	0,0924	0,1963	0,5096
$RMSE_B$	0,0425	0,0494	0,0985	0,0685	0,0769	0,1615	0,0919	0,1093	0,2573
Erro(%) - G	1,21	6,22	4,13	1,09	2,43	0,75	0,41	4,62	0,25
Erro(%) B	0,3590	41,76	56,25	0,66-	43,92	57,18	0,18	41,76	49,38

Outro aspecto analisado para verificar a qualidade do modelo de simulação, foi a observação do desempenho da planta em função da taxa de amostragem dos dados. Esta análise é relevante, pois existe um compromisso entre período de transmissão dos dados com o desempenho do controle. Neste caso quanto mais acurado o modelo de simulação melhor será a determinação do ponto ótimo de operação da rede, conforme exposto em MOYNE (2007). A FIGURA 6.9 mostra o desempenho do sistema em função da taxa de amostragem.

No caso analisado com perda de 10% dos dados observa-se os modelos próximos um do outro, demonstrando assim que para este caso, o modo como as perdas ocorreram não interferiram na verossimilhança dos modelos. Desse modo para simulação do WNCS com 10% pode ser utilizado tanto o modelo de Bernoulli quanto o modelo de Gilbert-Elliot. No entanto quando as análises são executadas com o sistema apresentando uma maior perda percentual dos pacote, FIGURA 6.10 o modelo

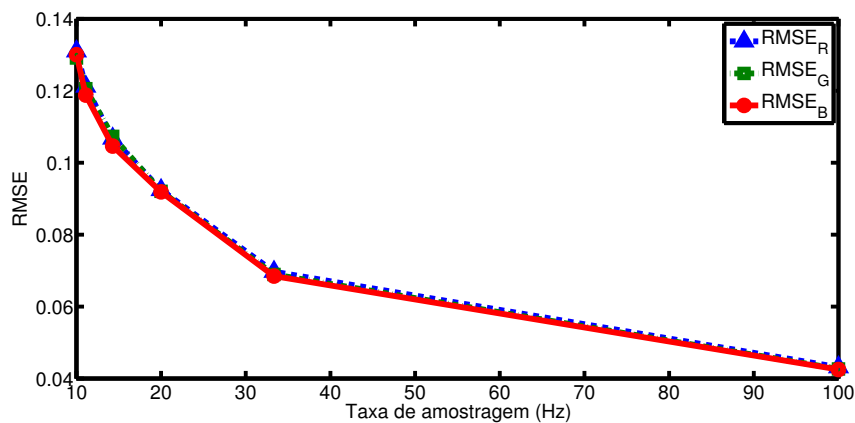


Figura 6.9: RMSE em função da taxa de amostragem de 10%

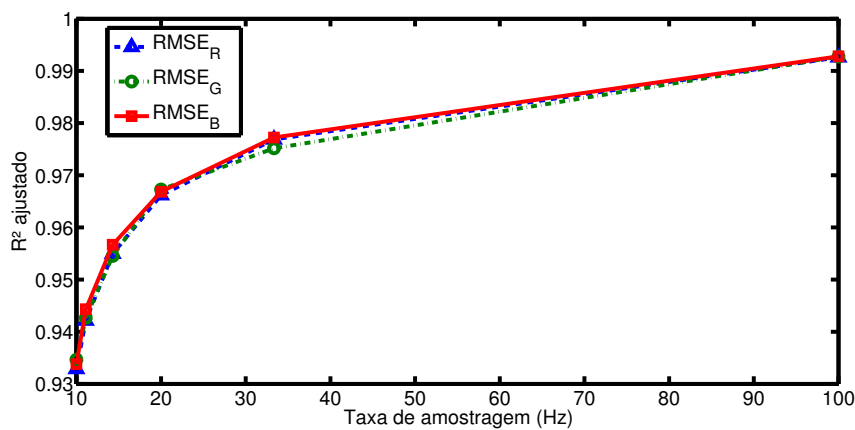


Figura 6.10:  $R^2$  em função da taxa de amostragem de 10%.

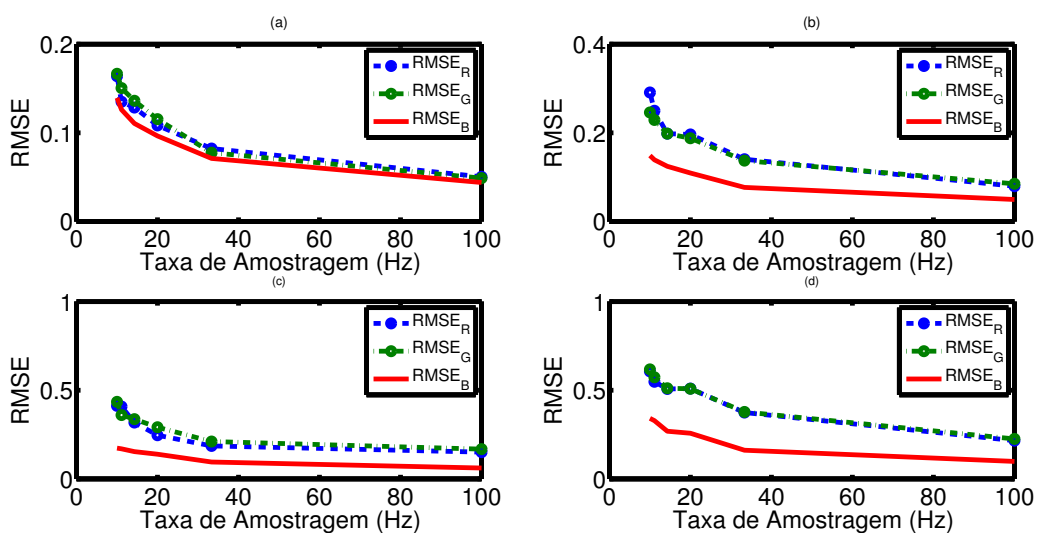


Figura 6.11: RMSE em função da taxa de amostragem de 20% a 50%.

de Gilbert-Elliot apresentou-se mais acurado para realizar a simulação do ambiente em questão, mostrando assim que o comportamento da perda em rajada começa a influenciar no desempenho do sistema e também na precisão dos modelos.

A FIGURA 6.11 mostra os erros em função do período de amostragem para taxas de 20% (a), 30% (b), 40% (c) e 50% (d). Nesta análise observa-se que para altas taxas de perdas de pacotes o modelo de Gilbert-Elliot mostrou-se mais acurado na representação da simulação. Isto mostra que o comportamento das rajadas dos pacotes perdidos influencia no desempenho do sistema e evidencia a acurácia do modelo de Gilbert-Elliot na representação do caso real de perdas de pacotes sobre o WNCS.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise de modelos de perdas sobre um WNCS (Wireless Networked Control System) operando com o protocolo IEEE 802.15.4/ZigBee. O estudo em questão decorre da necessidade de modelos de perdas de pacotes que auxiliem na simulação de arquiteturas de controle, como a de um WNCS. Para esta análise foi avaliado o comportamento das perdas pelo protocolo IEEE 802.15.4, mediante estresse de seu LQI/RSSI. Através do registro das perdas em transmissões reais foram avaliados 2 modelos de perdas (Modelo de Bernoulli e Modelo de Gilbert-Elliot) para representar o comportamento de um sistema realimentado.

Para o levantamento do trace real foram utilizados dois dispositivos Xbee modelo s1. Os dispositivos foram submetidos a comunicação ponto-a-ponto com variação na distância as quais apresentaram taxas de perdas de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. A captura das características da comunicação foi executada mediante *packet sniffer* e sobre este foi analisado o comportamento das perdas de pacotes. A sequência de pacotes recebidos/perdidos foi considerada na simulação do WNCS responsável pelo controle de posicionamento de um motor.

Uma das análises efetuadas sobre os traces de dados mostrou uma diferença significativa quando comparado o modelo de Bernoulli com o modelo Gilbert-Elliot e o comportamento real das perdas (R). Nesta diferença observou-se que o modelo de Bernoulli não apresentou perdas em rajadas, mas sim perdas distribuídas. Como resultado desta característica do modelo houve uma discrepância de seus resultados quando comparado ao caso real de perdas na simulação do WNCS.

O modelo de Bernoulli utilizado para simular o ambiente em questão apresentou-se menos acurado para taxas de perdas mais elevadas apresentando um erro percen-

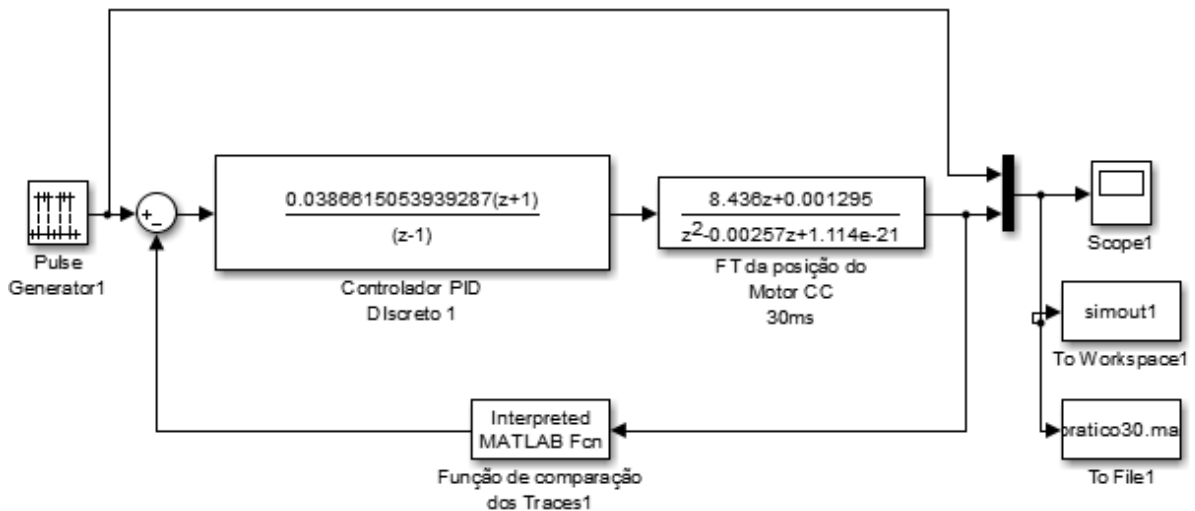
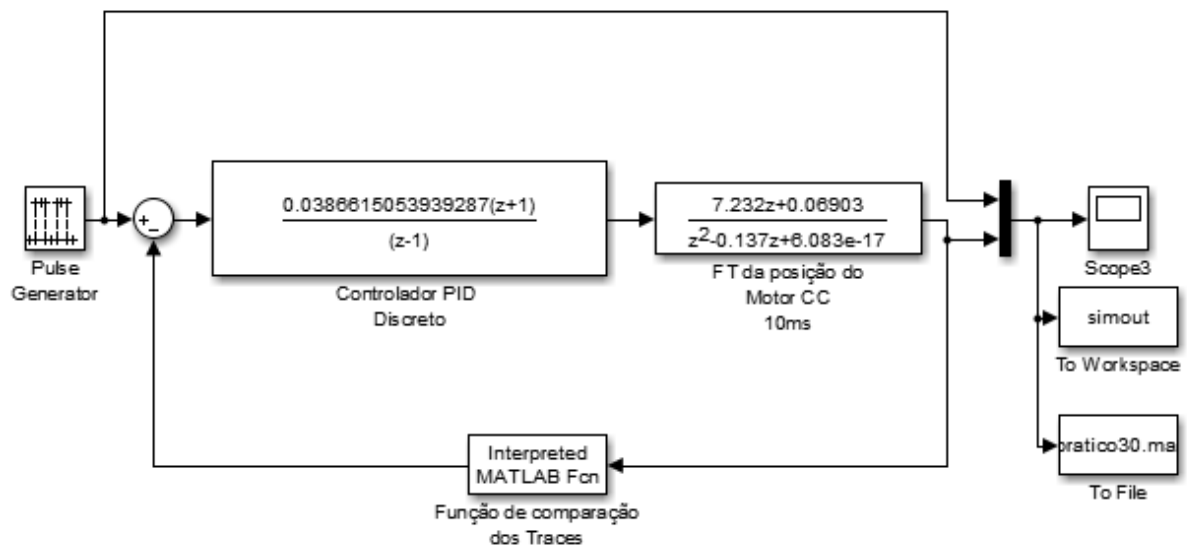
tual alto para casos onde o sistema foi submetido a razões de perdas de 20%, 30%, 40% e 50%. Entretanto para o caso onde as perdas foram menores, em torno de 10%, o modelo de Bernoulli apresentou-se acurado para representar o WNCS.

O outro modelo utilizado, modelo de Gilbert-Elliot, apresentou-se mais acurado que o modelo de Bernoulli. Em casos onde ocorre uma taxa de perda entorno de 10% que apresentou erro percentual mínimo 1,12%, e valores de RMSE próximo ao encontrado no caso Real de perdas de dados, sendo  $RMSE_R = 0,0426$  e  $RMSE_G = 0,0435$ . As outras análises efetuadas mostraram que o modelo de Gilbert-Elliot se apresenta bem acurado também para casos onde as taxas de perdas de pacotes são altas (20%, 30%, 40% e 50%). O modelo mostrou ainda uma capacidade em estimar os momentos que ocorreram perdas em rajadas no caso prático de perdas, levando assim a sua verossimilhança representativa. Por isso, é muito importante para simulações de WNCS considerar o modelo de Gilbert-Elliot e não o modelo de Bernoulli para uma perda de pacote, especialmente para taxas elevadas de perdas (acima de 20%). Os parâmetros do modelo Gilbert-Elliot ( $p$  e  $q$ ) precisam ser ajustados para a situação específica a ser analisada, mas os valores obtidos no experimento (Tabela 5.4) devem proporcionar uma boa aproximação para algumas simulações iniciais.

Como sugestão de trabalhos futuros, a primeira poderia ser analisar o desempenho de diferentes estratégias de controle, a luz do modelo de Gilbert-Elliot, que é mais próximo para perdas reais. Inclusive, para plantas não-lineares, e outras plantas e controladores mais complexos. Como segunda sugestão pode ser efetuado um estudo mediante a aplicação desta metodologia em um ambiente industrial com objetivo analisar exaustivamente as transmissões pelo protocolo imerso em ambiente onde se deseja a utilização do WNCS, de modo a obter os estimadores  $p$  e  $q$  do modelo de Gilbert-Elliot. Outro objeto de estudo que visa o complemento do trabalho apresentado aqui pode concentrar-se sobre a análise real dos atrasos, buscando a acurácia de modelos distintos na representação desta característica sobre o protocolo IEEE 802.15.4 em um WNCS.

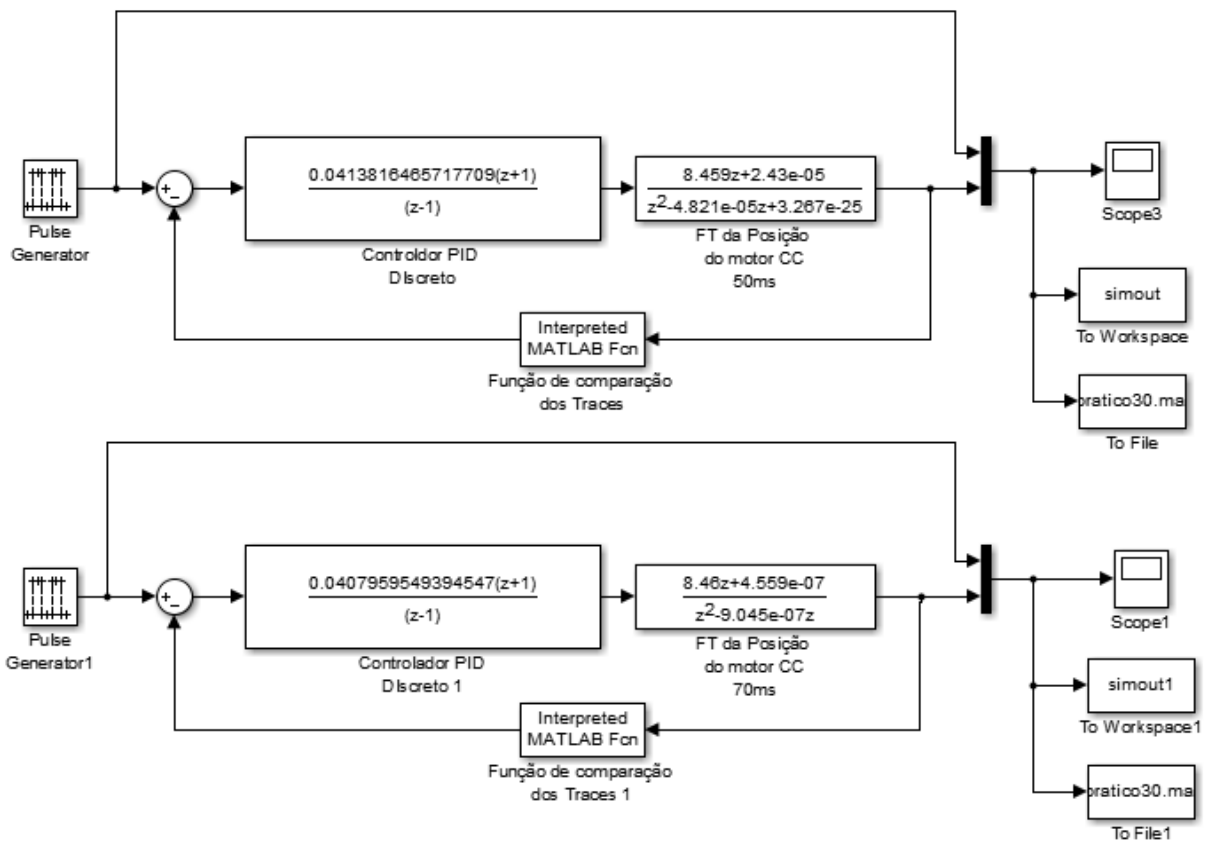
## APÊNDICE A

### PLANTA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO COM PERÍODO DE AMOSTRAGEM DE 10MS E 30MS.



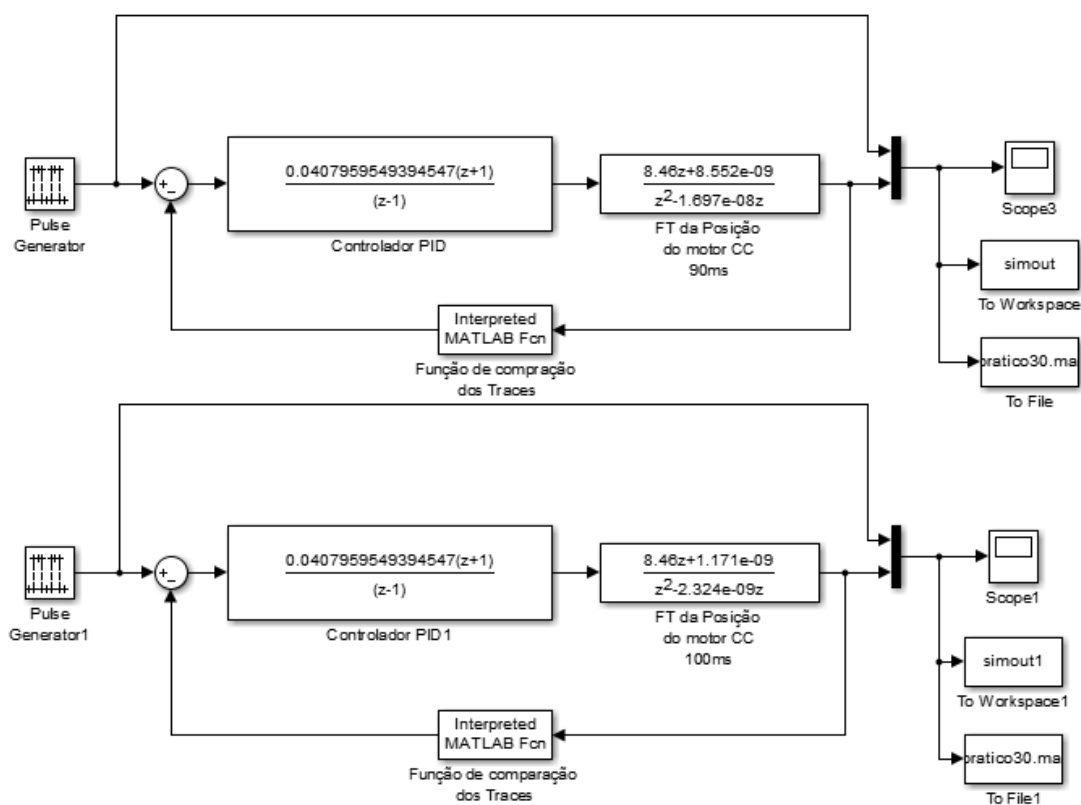
## APÊNDICE B

### PLANTA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO COM PERÍODO DE AMOSTRAGEM DE 50MS E 70MS.



## APÊNDICE C

### PLANTA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO COM PERÍODO DE AMOSTRAGEM DE 90MS E 100MS.



## BIBLIOGRAFIA

AFIFI, G. et al. A zigbee-based industrial wlan. In: **2015 Tenth International Conference on Computer Engineering Systems (ICCES)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 55–59.

AGRAWAL, D.; ZENG, Q.-A. **Introduction to wireless and mobile systems**. [S.l.]: Cengage Learning, 2015.

AZAR, A. T.; VAIDYANATHAN, S. **Chaos Modeling and Control Systems Design**. [S.l.]: Springer, 2015.

BARONTI, P. et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and zigbee standards. **Computer communications**, Elsevier, v. 30, n. 7, p. 1655–1695, 2007.

BOUGHANMI, N.; SONG, Y.-Q.; RONDEAU, E. Wireless networked control system using zigbee/ieee 802.15. 4. In: **13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'2009**. [S.l.: s.n.], 2009. p. CDROM.

BURATTI, C.; VERDONE, R. Performance analysis of ieee 802.15. 4 non beacon-enabled mode. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 58, n. 7, p. 3480–3493, 2009.

CHRISTOFIDES, P. D. et al. Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions. **Computers & Chemical Engineering**, v. 51, p. 21 – 41, 2013. ISSN 0098-1354. {CPC} {VIII}. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135412001573>.

CHUNG, T. D. et al. Simulation of wireless networked control system with packet dropout. In: **Control Conference (ASCC), 2015 10th Asian**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.

\_\_\_\_\_. Simulation of wireless networked control system with packet dropout. In: IEEE. **Control Conference (ASCC), 2015 10th Asian**. [S.l.], 2015. p. 1–6.

CONFIGURATION, X. Test utility software: User guide. **Digi International Inc**, 2008.

GODOY, E. P.; PORTO, A. J. Co-simulation tools for networked control systems: Revision and utilization. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Springer, v. 24, n. 6, p. 816–830, 2013.

GOMEZ, C. et al. Adapting aodv for ieee 802.15. 4 mesh sensor networks: theoretical discussion and performance evaluation in a real environment. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. **Proceedings of the 2006 International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks**. [S.l.], 2006. p. 159–170.

GUPTA, R.; CHOW, M.-Y. Networked control system: Overview and research trends. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 7, p. 2527–2535, July 2010. ISSN 0278-0046.

HASSLINGER, G.; HOHLFELD, O. The gilbert-elliott model for packet loss in real time services on the internet. In: VDE. **Measuring, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB), 2008 14th GI/ITG Conference-** [S.l.], 2008. p. 1–15.

HESPANHA, J. P.; NAGHSHTABRIZI, P.; XU, Y. A survey of recent results in networked control systems. **PROCEEDINGS-IEEE**, IEEE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS, v. 95, n. 1, p. 138, 2007.

INSTRUMENTS, T. Smarttrf packet sniffer-user manual. **Texas Instruments**, 2010.

IQBAL, A.; KHAYAM, S. A. Accurate residual wireless channel simulation using a two-tier markov model. **Simulation**, Sage Publications, v. 88, n. 8, p. 1011–1019, 2012.

IRWIN, G. W. et al. Co-design of predictive controllers for wireless network control. **Control Theory & Applications, IET**, IET, v. 4, n. 2, p. 186–196, 2010.

KUMAR, U. et al. Adaptive pid control system-a review. **International Journal of Engineering Science**, v. 2978, 2016.

MAHMOOD, D. et al. Investigating impact of ack in non-beacon enabled slotted ieee 802.15.4. In: **2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 429–434. ISSN 1550-445X.

MAHMOUD, M. S. Wireless networked control system design: An overview. In: IEEE. **Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on**. [S.l.], 2014. p. 2335–2340.

MILLAN, Y. A. et al. A wireless networked control systems review. In: IEEE. **Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)**. [S.l.], 2011. p. 1–6.

MIRINEJAD, H.; WELCH, K. C.; SPICER, L. A review of intelligent control techniques in hvac systems. In: IEEE. **Energytech, 2012 IEEE**. [S.l.], 2012. p. 1–5.

MOYNE, J. R.; TILBURY, D. M. The emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 95, n. 1, p. 29–47, 2007.

NISE, N. S. **CONTROL SYSTEMS ENGINEERING, (With CD)**. [S.l.]: LTC, 2012.

SABUROV, M.; YUSOF, N. A. Counterexamples to the conjecture on stationary probability vectors of the second-order markov chains. **Linear Algebra and its Applications**, Elsevier, v. 507, p. 153–157, 2016.

SCHENATO, L. et al. Foundations of control and estimation over lossy networks. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 95, n. 1, p. 163–187, 2007.

SHI, Y.; YU, B. Output feedback stabilization of networked control systems with random delays modeled by markov chains. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 54, n. 7, p. 1668–1674, 2009.

SILVA, I. M. D. da. **Análise de desempenho de sistemas de comunicação sem-fio para monitoramento de unidade de produção de poços petrolíferos terrestres.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

SONG, Z.; ZHOU, X. Research and simulation of wireless sensor and actuator networked control system. In: IEEE. **Control and Decision Conference (CCDC), 2013 25th Chinese.** [S.l.], 2013. p. 3995–3998.

TIAN, G.; TIAN, Y.-C.; FIDGE, C. Performance analysis of iee 802.11 dcf based wncs networks. In: IEEE. **Local Computer Networks (LCN), 2010 IEEE 35th Conference on.** [S.l.], 2010. p. 496–503.

TIPSUWAN, Y.; CHOW, M.-Y. Control methodologies in networked control systems. **Control engineering practice**, Elsevier, v. 11, n. 10, p. 1099–1111, 2003.

ULUSOY, A.; GURBUZ, O.; ONAT, A. Wireless model-based predictive networked control system over cooperative wireless network. **Industrial Informatics, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 7, n. 1, p. 41–51, 2011.

WU, J.; CHUNG, A. A segmentation model using compound markov random fields based on a boundary model. **Image Processing, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 16, n. 1, p. 241–252, 2007.

XBEE-PRO, O.; MODULES, R. **Product Manual v1. 06, 2005, consulta en linea.** 2013.

YAJNIK, M. et al. Measurement and modelling of the temporal dependence in packet loss. In: IEEE. **INFOCOM'99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE.** [S.l.], 1999. v. 1, p. 345–352.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. **Computer networks**, Elsevier, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008.

ZHANG, L.; GAO, H.; KAYNAK, O. Network-induced constraints in networked control systems:a survey. **Industrial Informatics, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 9, n. 1, p. 403–416, 2013.