

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

RAFAELA SCACIOTA SIMÕES DA SILVA

MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR BIT  
PARA SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE SEM FIO  
COM ABORDAGEM DE TEMPO DE PERMANÊNCIA

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2018

RAFAELA SCACIOTA SIMÕES DA SILVA

**MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR BIT  
PARA SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE SEM FIO  
COM ABORDAGEM DE TEMPO DE PERMANÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica E Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Telecomunicações E Redes.

Orientador: Prof. Glauber Gomes de Oliveira Brante

Coorientador: Prof. Guilherme Luiz Moritz

CURITIBA  
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

S586m  
2018

Silva, Rafaela Scaciota Simões da  
Minimização do consumo de energia por bit para sistemas de controle em rede sem fio com abordagem de tempo de permanência / Rafaela Scaciota Simões da Silva.-- 2018.  
45 f. : il. ; 30 cm

Texto em português com resumo em inglês  
Disponível também via World Wide Web

Texto em português com resumo em inglês  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2018

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Energia elétrica - Consumo. 3. Software de comunicação. 4. Sistemas de controle digital. 5. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Brante, Glauber Gomes de Oliveira. II. Moritz, Guilherme Luiz. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

---

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba  
Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº \_\_\_\_

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Minimização do consumo de energia por bit para sistemas de controle em rede sem fio com abordagem de tempo de espera**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Rafaela Scaciota Simões da Silva**, no dia 05 de setembro de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Telecomunicações e Redes, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Glauber Gomes de Oliveira Brante - Presidente (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Richard Demo Souza - (UFSC)

Prof(a). Dr(a). João Luiz Rebelatto - (UTFPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 05 de setembro de 2018.

Para aqueles que sempre me fizeram almejar grandes sonhos, e sempre me perguntaram: "Qual é o próximo objetivo da sua vida?", para vocês Pai e Mãe.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pela graça e misericórdia que se renovam todas as manhãs e pelo Seu amor incondicional.

"Mas Deus nos mostrou o quanto nos ama: Cristo morreu por nós quando ainda vivíamos no pecado" Romanos 5:8

Aos meus colegas do Laboratório de Sistemas de Comunicação Sem Fio - LABSC, pela convivência, pelas matérias cursadas em conjunto, pelos conhecimentos compartilhados, pelas dicas para certos *softwares*, pelos almoços em grupo e pelas discussões científicas ou não.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelos anos em que nos prédios do campus centro aprendi mais do que somente cálculos, gráficos e análises de problemas, ao Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica E Informática Industrial (CPGEI) pela oportunidade de participar do programa de Mestrado e ao CNPq pelo auxílio financeiro neste período.

Agradeço ao meu orientador, Professor Glauber Brante, pelo convite para o Mestrado e por me mostrar/ensinar como me tornar uma pesquisadora. Obrigada pelos esforços e pela ajuda para que este trabalho fosse realizado, pelas dicas, conversas e opiniões que me fizeram pensar sobre a pesquisa em momentos inoportunos.

Agradeço ao meu coorientador, Professor Guilherme Moritz, pelas longas correções bibliográficas, pela ajuda sempre quando acionado, pela mesa no LABSC e por todas as dicas ao longo deste período.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a minha família. A meus pais, César e Fernanda, que sempre servirão de inspiração e são fundamentais para meu crescimento. As meus irmãos (as crianças), por conviverem comigo todos os dias e me fazerem rir de doer a barriga. Obrigada crianças por tudo o que vocês fazem por mim.

Mera mudança não é crescimento. Crescimento é a síntese de mudança e continuidade, e onde não há continuidade não há crescimento. (C.S. Lewis)

## RESUMO

SCACIOTA SIMÕES DA SILVA, Rafaela. Minimização do consumo de energia por bit para sistemas de controle em rede sem fio com abordagem de tempo de permanência. 45 f. Dissertação – Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica E Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Os sistemas de controle em rede sem fio são uma classe de sistemas em que a comunicação entre sensores, atuadores e controladores ocorre por meio de uma banda compartilhada. Este tipo de sistema tem uma ampla área de aplicação, uma vez que pode ser incorporado em situações onde o espaço é limitado e quando a redução de custos de implementação é necessária. Além disso, os sistemas de controle sem fio têm ampla aplicação dentro das comunicações entre máquinas, parte fundamental dos sistemas 5G. Neste contexto, é de fundamental importância garantir a estabilidade do sistema controle, ao mesmo tempo que o processo de transmissão deve ocorrer no menor tempo possível. Ainda, devido às restrições de tamanho e custo desses sistemas, é comum que os sistemas de controle sem fio sejam alimentados por baterias. Portanto, a energia total consumida pelo sistema deve ser levada em conta. Sendo assim, este trabalho foca na minimização da energia consumida por bit transmitindo, com a restrição de que a estabilidade do sistema de controle deve ser garantida. Utilizando o método do tempo de permanência, que é condição suficiente para obter estabilidade no sistema, foi possível, através da otimização da probabilidade de *outage*, minimizar o consumo de energia por bit. Concluímos que a distância entre o transmissor e o receptor interfere diretamente no consumo de energia por bit do sistema, tendo em vista que a potência de transmissão depende da distância entre o transmissor e o receptor. Por fim, foi possível obter uma expressão fechada que relaciona a probabilidade de *outage* máxima que o sistema pode operar com a estabilidade do sistema de controle.

**Palavras-chave:** Sistema de controle em rede sem fio, método do tempo de permanência, comunicação entre máquinas.

## ABSTRACT

SCACIOTA SIMÕES DA SILVA, Rafaela. Minimization of Energy Consumption Per Bit Using an Average Dwell-Time Approach for Wireless Networked Control Systems. 45 f. Dissertação – Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica E Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Wireless networked control systems are a class of systems where communication between sensors, actuators and controllers occurs through a shared bandwidth. This type of system has a wide application area, since it can be incorporated in situations where space is limited and when implementation cost reduction is required. In addition, wireless control systems have wide application within machine-to-machine communications, a fundamental part of 5G systems. In this context, it is of fundamental importance to guarantee the stability of the control system, at the same time that the transmission process must occur within the shortest possible delay. Moreover, due to the size and cost restrictions of these systems, it is common for wireless control systems to be powered by batteries. So, the total energy consumed by the system must be taken into account. Therefore, this work focuses on the minimization of the energy consumed per transmitting bit, with the restriction that the stability of the control system must be guaranteed. Using the dwell time approach, which is a sufficient condition to obtain stability, it was possible, through the optimization of outage probability, to minimize energy consumption per bit. We conclude that the distance between the transmitter and the receiver directly interferes with the system's power consumption per bit, since the transmission power depends on the distance between the transmitter and the receiver. Finally, it was possible to obtain a closed-form expression that relates the maximum outage probability that the system can operate with the stability of the control system.

**Keywords:** Wireless networked control systems, dwell time method, machine-to-machine communications

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Arquitetura geral de um sistema de controle distribuído em uma rede de comunicação com perda de pacotes. ....	21
Figura 2	–	Limite exponencial para $x$ . ....	27
Figura 3	–	Energia consumida por bit em função da taxa de decaimento para diferentes distâncias entre transmissor e receptor, supondo $d_{sc} = d_{ca} = d$ . ....	35
Figura 4	–	Máxima energia consumida por bit em função da distância entre o receptor e o transmissor. ....	36
Figura 5	–	Pêndulo invertido rotativo. ....	38
Figura 6	–	Energia consumida por bit em função da taxa de decaimento para diferentes distâncias entre transmissor e receptor, supondo $d_{sc} = d_{ca} = d$ para o sistema presente no artigo (HATTORI et al., 2015). ....	39
Figura 7	–	Máxima energia consumida por bit em função da distância entre o receptor e o transmissor para o sistema presente no artigo (HATTORI et al., 2015). ....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Parâmetros do sistema de comunicação .....	34
Tabela 2	–	Potência de transmissão que minimiza a energia consumida por bit .....	37

## LISTA DE SIGLAS

ADS	do inglês, <i>asynchronous dynamical system</i>
AWGN	do inglês, <i>additive white gaussian noise</i>
cMTC	do inglês, <i>critical machine-type communications</i>
eMBB	do inglês, <i>enhanced Broadband</i>
HARQ	do inglês, <i>hybrid automatic repeat request</i>
IoT	do inglês, <i>internet of things</i>
LQR	do inglês, <i>linear-quadratic regulator</i>
M2M	do inglês, <i>machine to machine</i>
MAD	do inglês, <i>maximum allowable delay</i>
MATI	do inglês, <i>maximum allowed transfer interval</i>
mMTC	do inglês, <i>massive machine-type communications</i>
MTC	do inglês, <i>machine-type communications</i>
PSD	do inglês, <i>power spectral density</i>
QoS	do inglês, <i>quality of service</i>
RF	do inglês, <i>radio frequency</i>
SNR	do inglês, <i>signal-to-noise ratio</i>
WNCS	do inglês <i>wireless networked control systems</i>
ZOH	do inglês, <i>zero-order hold</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{T}_1$	estado 1 do chaveamento entre sensor e controlador
$\bar{T}_2$	estado 2 do chaveamento entre sensor e controlador
$T_1$	estado 1 do chaveamento entre controlador e atuador
$T_2$	estado 2 do chaveamento entre controlador e atuador
$k$	período de tempo
$\mathbf{x}$	sinal enviado do sensor ao controlador
$\mathcal{R}$	conjunto dos números reais
$n$	número de variáveis de estado do sistema
$\mathbf{y}_{sc}$	sinal enviado do sensor ao controlador
$P_{sc}$	potência de transmissão utilizada pelo sensor
$g_{sc}$	desvanecimento do canal quasi-statico
$\kappa$	perda de percurso
$\mathbf{n}_{sc}$	ruído aditivo gaussiano branco
$N_0$	densidade espectral de potência unilateral do ruído
$\bar{\gamma}_{sc}$	SNR média no controlador
$P_{sc}$	potência de transmissão utilizada pelo sensor
$B$	largura de banda do sistema
$G$	ganho das antenas
$c$	velocidade da luz no vácuo
$f$	frequência de transmissão
$d_{sc}$	distância entre sensor e controlador
$\alpha$	coeficiente de perda de percurso
$M$	margem de enlace
$\gamma_{sc}$	SNR instantânea no controlador
$I_{sc}$	informação mútua no controlador
$\mathcal{R}_{sc}$	taxa de transmissão sensor-controlador
$\mathcal{R}_b$	eficiência espectral
$\mathcal{O}_{sc}$	probabilidade de <i>outage</i> sensor-controlador
$\mathbf{w}$	sinal de entrada do controlador
$\mathbf{K}$	matriz de ganho de <i>feedback</i> do estado
$m$	número de saídas do sistema
$\mathbf{v}$	ação de controle
$\mathbf{y}_{ca}$	sinal transmitido do sensor para o controlador
$P_{ca}$	potência de transmissão utilizada pelo controlador
$g_{ca}$	desvanecimento do canal entre controlador e atuador
$\mathbf{n}_{ca}$	ruído entre controlador e atuador
$\bar{\gamma}_{ca}$	SNR média no controlador
$d_{ca}$	distância entre controlador e atuador
$\mathcal{O}_{ca}$	probabilidade de <i>outage</i> entre controlador e atuador
$\mathbf{A}$	matriz de estados
$\mathbf{B}$	matriz de controle

$\mathbf{z}$	matriz resultante ao concatenamento dos vetores de estado da planta e do controlador
$\mathbf{u}$	sinal de entrada no atuador
$\sigma$	sinal de chaveamento
$S_1$	primeiro subsistema
$\Phi_1$	matriz referente ao subsistema $S_1$
$\Phi_2$	matriz referente ao subsistema $S_2$
$S_2$	segundo subsistema
$S_3$	terceiro subsistema
$S_4$	quarto subsistema
$\Phi_3$	matriz referente ao subsistema $S_3$
$\Phi_4$	matriz referente ao subsistema $S_4$
$t_0$	instante de tempo inicial
$\delta$	constante arbitraria
$\lambda$	taxa de decaimento
$S_{\sigma(k)}$	subsistemas
$\lambda_1$	taxa de decaimento para sistemas estáveis
$\lambda_2$	máxima taxa de decaimento para sistemas instáveis
$h$	constante escalar arbitrável
$\tau_a$	tempo de permanência
$\mathcal{N}_\sigma$	número de chaveamentos
$\mathcal{N}_0$	limite de interações entre subsistemas
$n_i$	número de pacotes perdidos por subsistema
$r_i$	probabilidade de operar no subsistema
$r_1$	probabilidade de operar no subsistema $S_1$
$r_2$	probabilidade de operar no subsistema $S_2$
$r_3$	probabilidade de operar no subsistema $S_3$
$r_4$	probabilidade de operar no subsistema $S_4$
$n_3$	número de pacotes perdidos no subsistema $S_3$
$n_4$	número de pacotes perdidos no subsistema $S_4$
$n_4$	número de pacotes perdidos no subsistema $S_4$
$\mathcal{N}_s$	número máximo de chaveamento para subsistemas instáveis
$\bar{\tau}_a$	mínimo tempo médio de permanência
$\eta$	eficiência do amplificador de potência
$P_{TX}$	consumo de energia do circuito de radiofrequência no transmissor
$P_{RX}$	consumo de energia do circuito de radiofrequência no receptor
$E_b$	energia consumida por bit
$E_{sc}$	energia consumida por bit entre sensor e controlador
$E_{ca}$	energia consumida por bit entre controlador e atuador
$P_{\max}$	limite máximo de potência de transmissão
$\mathcal{O}$	probabilidade de <i>outage</i>
$\mathcal{O}^*$	probabilidade de <i>outage</i> que minimiza a energia consumida por bit
$N$	peso das medidas de desempenho causadas pelo vetor de estado
$R$	matriz de peso do controlador
$Q$	matriz de pesos dos estados

$I$  matriz identidade  
 $\phi$  ângulo do braço  
 $\theta$  ângulo do pêndulo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	20
<b>2</b>	<b>MODELO DO SISTEMA</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>ESTABILIDADE DO SISTEMA DE CONTROLE</b>	<b>24</b>
3.1	MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE	24
3.2	ESTABILIDADE EXPONENCIAL	26
3.3	TEMPO DE PERMANÊNCIA MÉDIO	28
<b>4</b>	<b>MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS NUMÉRICOS</b>	<b>34</b>
5.1	CENÁRIO 1	34
5.2	CENÁRIO 2	37
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>41</b>
	REFERÊNCIAS	43

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas de controle distribuídos em rede de comunicação sem fios (WNCS, do inglês *wireless networked control system*) são uma classe de sistemas onde a comunicação entre sensores, atuadores e controladores ocorre através um canal sem fio, geralmente compartilhado (HESPANHA et al., 2007). O WNCS tem uma ampla área de aplicação e pode ser usado em situações onde o espaço físico é limitado ou quando é necessário reduzir o custo de implementação. Exemplos de aplicação dos WNCS podem ser encontrados dentro dos sistemas 5G. Os sistemas 5G lidam com vários tipos de comunicação do tipo máquina, denominados de *machine-type communications* (MTC), que tem requisitos muito diversos de confiabilidade e latência (ERICSSON, 2016). Os sistemas 5G consistem em três classes de casos de uso, banda larga móvel aprimorada (eMBB, do inglês *enhanced Broadband*), MTC maciço (mMTC, do inglês *massive machine-type communications*) e MTC crítico (cMTC, do inglês *critical Machine-Type Communications*) (ERICSSON, 2015). Portanto, os sistemas 5G não só terão que superar as gerações anteriores nos requisitos relacionados à taxa de dados e capacidade (ANDREWS et al., 2014), mas também abordarão novos cenários de uso do MTC (TULLBERG et al., 2016). As aplicações de mMTC envolvem dispositivos de edifícios inteligentes, logísticas, rastreamento e gerenciamento de frota, medidores inteligentes, agricultura e muitos outros. Para cMTC as aplicações podem ser segurança de tráfego, aplicações industriais e controle, fabricação remota, treinamento, cirurgia, etc.

Como motivação para este trabalho sabe-se que no futuro a maioria dos dispositivos serão conectados através da internet. O conceito de internet das coisas (IoT, do inglês *internet of things*) proporciona que objetos, máquinas e utensílios do dia a dia se comuniquem por meio da internet. Dentro da indústria, esta revolução onde a conexão entre máquinas ocorrerá por meio da internet denomina-se de Indústria 4.0. Sendo assim, não apenas os usuários de *smatphones*, computadores ou *tablets* se beneficiarão da conexão sem fio, mas também dispositivos autônomos. Por exemplo, alguns estudos preveem que haverá cerca de 28 bilhões de dispositivos conectados até 2021, dos quais mais de 15 bilhões serão máquina a máquina (M2M, do inglês *machine to machine*) e dispositivos autônomos (ERICSSON, 2016).

Ainda, a eficiência energética tornou-se um dos principais interesses dos sistemas de comunicação 5G, uma vez que o uso consciente da energia pode ter um impacto muito positivo tanto na redução das emissões de dióxido de carbono na atmosfera quanto na

redução dos custos do sistema (LI et al., 2011). Além disso, estudos recentes apontam para um aumento de quase 1 milhão de vezes em termos de taxas de dados e 40 milhões de vezes em termos de capacidade computacional desde 1957, seguidos de modesto ganho anual de 3,5 % na capacidade nominal da bateria nas últimas duas décadas (PENTIKOUSIS, 2010). Em ambos os contextos, mMTC e cMTC, são observadas características delicadas em relação ao consumo de energia, uma vez que os dispositivos são normalmente alimentados por bateria.

Especificamente para os WNCS, o processo deve ser muito confiável e de baixa latência, visando garantir a estabilidade do sistema. Portanto, nesse caso, a eficiência energética é um desafio, pois existem especificações do sistema, como estabilidade, que oferecem pouca liberdade de otimização. Além disso, em ambientes industriais onde há muitos sensores e atuadores, o uso de um controle com fio torna o projeto mais difícil e dificulta a mobilidade do operador em toda a fábrica, portanto a implantação de um sistema sem fio reduz os custos e torna o sistema mais acessível. Ademais, devido às restrições de tamanho e custo desses sistemas, é comum os WNCS serem alimentados por baterias. Portanto, a energia total consumida pelo sistema não pode ser negligenciada, sendo computada como a soma de energia usada para transmissão de informação associada à energia gasta pelos circuitos eletrônicos de transmissão e recepção do sistema. Por exemplo, quando os nós estão distantes um do outro, a potência de transmissão é maior que o consumo dos circuitos de frequência de rádio (RF, do inglês *radio frequency*). No entanto, quando os nós estão próximos, o que é comum para WNCS industriais, o consumo de energia dos circuitos tem a mesma ordem de magnitude da energia necessária para a transmissão de dados (BRANTE et al., 2011).

Outro problema importante para WNCS é a perda de pacotes devido ao ambiente de comunicação sem fio. A perda de pacotes ocorre principalmente por dois efeitos conhecidos como desvanecimento e perda de caminho (GOLDSMITH, 2005). Um WNCS com perda de pacotes pode ser modelado como um sistema dinâmico assíncrono (ADS, do inglês *asynchronous dynamical system*) (LIBERZON, 2003). É possível afirmar que a perda de pacotes causa instabilidade no sistema de controle. Portanto, é necessário modelar a estabilidade do sistema junto com a perda de pacotes. Quando o sistema alterna entre estados estáveis e instáveis, isto é, transmissões bem sucedidas e mal sucedidas, respectivamente, é comum empregar uma abordagem de tempo de permanência, do inglês *dwell-time*. Tal abordagem implica que um intervalo de tempo mínimo entre dois instantes de comutação consecutivos deve ser respeitado para que o sistema permaneça estável (LIBERZON, 2003), (SOUZA et al., 2017). Se esse tempo de permanência mínimo for

respeitado, a magnitude das variáveis de estado do sistema pode ser limitada por uma expressão exponencial, de modo que, se o sistema for linear, a estabilidade exponencial se torna uma condição suficiente para a estabilidade (SHORTEN et al., 2007). Sendo assim, nota-se que a perda de pacotes do sistema de comunicação está associada à estabilidade do sistema de controle.

Como consequência, dois objetivos opostos devem ser atingidos: *i.*) Reduzir o consumo de energia visando minimizar os custos de manutenção devido à substituição ou recarga de baterias; e *ii.*) garantir confiabilidade, tendo em vista que a estabilidade da malha de controle não pode ser comprometida. Por essas razões, diversos trabalhos na literatura discutem a estabilidade em sistemas de controle de rede sem fio. Os autores de (HEEMELS et al., 2010), a fim de garantir a estabilidade de controle de WNCS usam uma caracterização baseada em Lyapunov, sendo esta uma teoria de controle não linear que investiga a estabilidade do sistema em torno de seus pontos de equilíbrio (NIKRAVESH, 2016), para obter limites sobre o intervalo máximo entre duas transmissões de estado bem sucedidas. Tais limites são descritos através do intervalo denotado como intervalo de transferência máximo permitido (MATI, do inglês *maximum allowed transfer interval*) e a latência máxima de cada transmissão (MAD, do inglês *maximum allowable delay*). No entanto, como cada pacote transmitido por meio de uma rede sem fio tem uma probabilidade de perda não-nula, nenhum valor de MATI/MAD pode ser garantido fazendo com que se modele sistemas com valores probabilísticos para o MATI e o MAD (NIKRAVESH, 2016).

Outra forma de analisar a relação entre perdas de pacotes e estabilidade do sistema é apresentada pelos autores de (SEILER; SENGUPTA, 2005), os quais utilizam uma abordagem por meio de um sistema linear em cadeias de Markov a fim de analisar o efeito de perdas de mensagens no sistema. Em (TATIKONDA; MITTER, 2004) verifica-se como está relacionada a velocidade da dinâmica da planta com a taxa mínima de transmissão permitida a fim de garantir a estabilidade do sistema. Entretanto, ambos estudos assumem que as perdas de pacotes seguem uma variável de Bernoulli, o que não é o caso comum de redes sem fio onde a probabilidade de *outage* é altamente correlacionada no tempo e no espaço. Uma abordagem mais adequada para modelar os WNCSs e avaliar sua estabilidade é o uso de sistemas comutados de tempo discreto. A abordagem é definir vários subsistemas e um sinal de comutação que determina qual subsistema está ativo em um determinado período de tempo. No caso de um WNCS com eventos de perdas de pacote, o sinal de comutação é uma função da probabilidade *outage* do enlace. Nesse contexto, os autores (SUN; QIN, 2011) apresentam as condições para a estabilidade

exponencial em função do *average dwell time*, que é definido como o tempo médio de chaveamentos entre um dos subsistemas disponíveis.

Uma vez determinadas as condições de estabilidade, várias otimizações de parâmetro podem ser propostas. Em (LIU; GOLDSMITH, 2004) uma estrutura de multi-camadas para o projeto conjunto de redes sem fio e controladores distribuídos é apresentada, onde o objetivo é otimizar o custo do controle. De maneira similar, (PARK et al., 2011) apresenta uma outra otimização de multi-camadas de um WNCS se comunicando através de uma rede IEEE 802.15.4. Neste trabalho, a função objetivo é o consumo de energia, enquanto as restrições são atrasos máximos permitidos e intervalos de transferência que são funções do custo de controle. Por fim, pode-se citar os trabalhos de (SADI et al., 2014; SADI; ERGEN, 2015, 2017), os quais buscam otimizar o sistema utilizando restrições relacionadas ao MAD e MATI. Todavia, umas das principais desvantagens das otimizações apresentadas é a alta complexidade computacional, devido ao elevado número de parâmetros de otimização e a relação não trivial entre eles.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta dissertação é minimizar o consumo de energia necessário para transmitir um bit com sucesso em sistemas de controle de rede sem fio, sem perder a estabilização do sistema de controle, através da abordagem do tempo de permanência.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar os sistemas de controle em rede sem fio;
- Modelar em conjunto sistemas de controle com a transmissão de pacotes no canal sem fio;
- Analisar a estabilidade do sistema e identificar qual abordagem utilizar para garantir que o mesmo será estável;
- Formular e equacionar o sistema de minimização da energia consumida por bit;
- Verificar o equacionamento da minimização com simulações computacionais;
- Analisar os resultados obtidos por meio das simulações computacionais.

## 1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O restante deste documento está organizado da maneira detalhada a seguir. No Capítulo 2 é apresentada a modelagem de um sistema de controle sem fio visando a arquitetura e os equacionamentos referentes ao sistema de comunicação, bem como a probabilidade de *outage* e a relação sinal ruído. O estudo da estabilidade do sistema de controle de rede sem fio será dividido em três partes no Capítulo 3, que trata da verificação da estabilidade do sistema conforme a abordagem de tempo de permanência. Primeiramente, é apresentado o conceito de sistemas chaveados, a partir dos quais é possível definir os sistemas de controle de rede sem fio. Na Seção 3.1 apresenta-se a modelagem da dinâmica de um WNCS relacionados a eventuais eventos de perdas de pacote. O conceito de estabilidade exponencial é apresentado na Seção 3.2, através do qual é possível avaliar a estabilidade para WNCS. Logo após, apresenta-se em 3.3 a teoria de tempo médio de permanência utilizada para verificar a estabilidade. A formulação do problema de minimização do consumo de energia por bit é dada no Capítulo 4, no qual obtêm-se a probabilidade de *outage* e a potência de transmissão que minimizam o consumo de energia por bit, visando conservar as condições de estabilidades definidas nos capítulos anteriores. O Capítulo 5 apresenta alguns resultados numéricos para validar as análises teóricas realizadas. Por fim, o Capítulo 6 conclui o documento com os devidos comentários, considerações finais e propostas para trabalhos futuros.



onde  $P_{\text{sc}}$  a potência de transmissão utilizada pelo sensor,  $g_{\text{sc}}$  é o desvanecimento do canal quase-estático, cuja envoltória segue uma distribuição de Rayleigh,  $\kappa$  é a perda de percurso e  $\mathbf{n}_{\text{sc}}$  é o ruído aditivo gaussiano branco (AWGN, do inglês *additive white gaussian noise*), que assume média igual a zero e variância  $\frac{N_0}{2}$  por dimensão, sendo  $N_0$  a densidade espectral de potência unilateral do ruído (PSD, do inglês *power spectral density*) (GOLDSMITH, 2005).

A relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*) média no controlador é dada por (GOLDSMITH, 2005)

$$\bar{\gamma}_{\text{sc}} = \frac{P_{\text{sc}} G \left(\frac{c}{f}\right)^2}{N_0 B (4\pi)^2 d_{\text{sc}}^\alpha M}, \quad (2)$$

sendo  $P_{\text{sc}}$  a potência de transmissão utilizada pelo sensor,  $B$  a largura de banda do sistema,  $G$  o ganho das antenas,  $c$  a velocidade da luz no vácuo,  $f$  a frequência de transmissão,  $d_{\text{sc}}$  distância entre sensor e controlador,  $\alpha$  é o coeficiente de perda de percurso e  $M$  é a margem de enlace (GOLDSMITH, 2005). Além disso, a SNR instantânea é determinada por

$$\gamma_{\text{sc}} = \bar{\gamma}_{\text{sc}} g_{\text{sc}}. \quad (3)$$

A informação mútua é a quantificação da informação em bits que uma variável aleatória contém acerca da outra variável aleatória (GOLDSMITH, 2005), sendo definida por

$$I_{\text{sc}} = B \log_2(1 + \gamma_{\text{sc}}). \quad (4)$$

Sendo assim, a probabilidade de *outage* é definida como a probabilidade de que a taxa de transmissão  $\mathcal{R}_{\text{sc}} = \mathcal{R}_{\text{b}}$  seja maior que a informação mútua instantânea, em que  $\mathcal{R}_{\text{b}}$  denota a eficiência espectral. Portanto,

$$\mathcal{O}_{\text{sc}} = \Pr\{I_{\text{sc}} < \mathcal{R}_{\text{b}}\} \quad (5)$$

$$= \Pr\{\gamma_{\text{sc}} < 2^{\mathcal{R}_{\text{b}}} - 1\}. \quad (6)$$

Assumindo os canais com distribuição Rayleigh, a probabilidade de *outage* entre o sensor e o controlador pode ser escrita como

$$\mathcal{O}_{\text{sc}} = 1 - e^{-\frac{2^{\mathcal{R}_{\text{b}}}-1}{\bar{\gamma}_{\text{sc}}}}. \quad (7)$$

Sendo assim, o estado do chaveamento  $\bar{T}_1$  e  $\bar{T}_2$  na Figura 1 é função da *outage* no enlace entre o sensor e o controlador. Quando o enlace não está em *outage*, a entrada

do controlador  $\mathbf{w}(k)$  será igual a  $\mathbf{x}(k)$ . De outra forma, no caso de *outage*, um segurador de ordem zero (ZOH, do inglês *zero-order hold*) é responsável por manter o valor recebido anterior, de modo que

$$\begin{aligned} \bar{T}_1 : \mathbf{w}(k) &= \mathbf{x}(k) \\ \bar{T}_2 : \mathbf{w}(k) &= \mathbf{w}(k-1). \end{aligned} \quad (8)$$

O controlador, por sua vez, determina a próxima ação de controle

$$\mathbf{v}(k) = \mathbf{K}\mathbf{w}(k), \quad (9)$$

onde  $\mathbf{K} \in \mathcal{R}^{m \times n}$  é a matriz de ganho de *feedback* do estado projetada adequadamente, sendo  $m$  o número de saídas do sistema. Então,  $\mathbf{v}(k)$  é transmitido para o atuador, que recebe

$$\mathbf{y}_{ca}(k) = \sqrt{(P_{ca}\kappa)}g_{ca}\mathbf{v}(k) + \mathbf{n}_{ca}, \quad (10)$$

onde  $P_{ca}$  a potência de transmissão utilizada pelo controlador e  $g_{ca}$  é o desvanecimento do canal entre controlador e atuador, enquanto  $\mathbf{n}_{ca}$  representa o ruído. Tem-se que a SNR média no controlador é dada por (GOLDSMITH, 2005)

$$\bar{\gamma}_{ca} = \frac{P_{ca}G\left(\frac{c}{f}\right)^2}{N_0B(4\pi)^2d_{ca}^\alpha M}, \quad (11)$$

sendo  $d_{ca}$  distância entre controlador e atuador. Assim, de modo similar à comunicação entre sensor e controlador, a probabilidade de *outage* entre controlador e atuador é dada por

$$\mathcal{O}_{ca} = 1 - e^{-\frac{2^{\mathcal{R}_b-1}}{\bar{\gamma}_{ca}}}. \quad (12)$$

Sendo assim, o estado de chaveamento  $T_1$  e  $T_2$  está relacionado com o evento de *outage* entre o controlador e o atuador, de modo que a saída do ZOH produza

$$T_1 : \mathbf{u}(k) = \mathbf{v}(k), \quad (13)$$

$$T_2 : \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1). \quad (14)$$

Sendo a planta um sistema linear e invariante no tempo o próximo estado é dado por

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \quad (15)$$

onde  $\mathbf{A}$  é a matriz de estado e  $\mathbf{B}$  a matriz de controle do espaço de estados que modela um sistema controlável (OGATA, 2010), cuja dinâmica será detalhada no Capítulo 3.

### 3 ESTABILIDADE DO SISTEMA DE CONTROLE

Os sistemas de controle de rede sem fio podem ser definidos como sistemas chaveados, do inglês *switched systems*. Um sistema chaveado pode apresentar diferentes comportamentos dependendo de seu estado atual. Além disso, algum evento pode fazer com que seu comportamento mude. Desta maneira, ele é descrito por várias matrizes de sistema, cada uma representando um diferente comportamento. Ademais, há um sinal de chaveamento de sistema que indica qual é a matriz que está ativa em um determinado momento. No âmbito desta dissertação, os sistemas chaveados são um conjunto de matrizes discretas que descrevem o sistema e chaveiam em função do sinal da *outage*.

#### 3.1 MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

A modelagem do sistema de controle se dá a partir do concatenamento dos vetores de estado da planta e do controlador,

$$\mathbf{z}(k) = [\mathbf{x}^T(k), \mathbf{w}^T(k-1), \mathbf{u}^T(k-1)]^T. \quad (16)$$

onde  $\mathbf{x}$  é o sinal enviado do sensor ao controlador,  $\mathbf{w}$  é o sinal de entrada do controlador depois de verificar se ocorre *outage* no chaveamento entre sensor e controlador e  $\mathbf{u}$  é o sinal de entrada no atuador após a verificação de ocorrência *outage* no chaveamento entre controlador e atuador.

Sendo assim, a dinâmica dos sistemas de controle sem fio de malha fechada pode ser representada como

$$S_{\sigma(k)} : \mathbf{z}(k+1) = \Phi_{\sigma(k)} \mathbf{z}(k), \quad (17)$$

onde  $\sigma(k)$  é o sinal de chaveamento, cujo comportamento é dependente dos eventos de *outage*. Como apresentado na Figura 1, o modelo de sistema considerado apresenta dois estados de chaveamento, nos enlaces sensor-controlador e controlador-atuador, de modo que esse sistema pode ser dividido em quatro subsistemas. O subsistema  $S_1$  é referente a quando não há perda de pacote ( $T_1$  e  $\bar{T}_1$ ). Tem-se a matriz do subsistema  $S_1$  como

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{BK} & 0 & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & 0 \\ \mathbf{K} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Sendo assim, multiplicando a matriz (18) com  $\mathbf{z}(k)$

$$\Phi_1 : \mathbf{x}(k+1) = (\mathbf{A} + \mathbf{BK})\mathbf{x}(k) \quad (19)$$

$$\Phi_1 : \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{x}(k) \quad (20)$$

$$\Phi_1 : \mathbf{u}(k) = \mathbf{K}\mathbf{x}(k) \quad (21)$$

As equações (19)-(21) representam os estados no sensor, no controlador e no atuador, respectivamente, para o caso em que o chaveamento comporta-se da maneira apresentada em (13). É possível afirmar que no meio da primeira linha da matriz tem-se o próximo estado do sistema, sendo este um sistema de malha fechada,  $(\mathbf{A} + \mathbf{BK})\mathbf{x}(k)$ . Na segunda linha da matriz (18) tem-se que a entrada do controlador no próximo estado será igual a  $\mathbf{x}(k)$  e o valor prévio para o ZOH no atuador será  $\mathbf{K}\mathbf{x}(k)$ .

Quando há perda de pacote nos dois chaveamentos sem fio ( $T_2$  e  $\bar{T}_2$ ) tem-se  $\Phi_2$  como a matriz referente ao subsistema  $S_2$ . Sendo assim, a matriz do subsistema  $S_2$  dá-se por

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{BK} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & \mathbf{K} & 0 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Então, multiplicando a matriz (22) com  $\mathbf{z}(k)$  tem-se

$$\Phi_2 : \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{BK}\mathbf{w}(k-1) \quad (23)$$

$$\Phi_2 : \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k-1) \quad (24)$$

$$\Phi_2 : \mathbf{u}(k) = \mathbf{K}\mathbf{w}(k-1) \quad (25)$$

Seguindo o mesmo raciocínio para a matriz (22) é possível determinar que o próximo estado do sistema será  $\mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{BK}\mathbf{w}(k-1)$ , a entrada do controlador para o próximo período será a mesma utilizada no período posterior,  $\mathbf{w}(k-1)$ , e o controlador atuará como  $\mathbf{K}\mathbf{w}(k-1)$ . Os subsistemas  $S_3$  e  $S_4$  representam estados intermediários onde apenas um chaveamento falhou. Quando a *outage* ocorre no chaveamento entre controlador-atuador ( $T_2$  e  $\bar{T}_1$ ) apresenta-se a matriz no subsistema  $S_3$  como

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 & \mathbf{B} \\ \mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

e multiplicando (26) com  $\mathbf{z}(k)$  ontem-se

$$\Phi_3 : \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{w}(k-1) \quad (27)$$

$$\Phi_3 : \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k-1) \quad (28)$$

$$\Phi_3 : \mathbf{u}(k) = \mathbf{K}\mathbf{w}(k-1) \quad (29)$$

A partir da matriz (26) tem-se que o próximo estado como  $\mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{u}(k-1)$ , a entrada do controlador é referente à  $\mathbf{x}(k)$  e o valor prévio no atuador será  $\mathbf{u}(k-1)$ .

Quando a *outage* ocorre em sensor-controlador ( $T_1$  e  $\bar{T}_2$ ) tem-se  $\Phi_4$  como

$$\Phi_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 & \mathbf{B} \\ 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

ao multiplicar (26) com  $\mathbf{z}(k)$  tem-se

$$\Phi_4 : \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{w}(k-1) \quad (31)$$

$$\Phi_4 : \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k-1) \quad (32)$$

$$\Phi_4 : \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1) \quad (33)$$

onde a única diferença entre a matriz de (26) e (30) ocorrerá na estrada do controlador que para este subsistema será igual a  $\mathbf{w}(k)$ .

Sendo que  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  modelam um sistema controlável,  $S_1$  é estável quando a matriz de controle do sistema,  $\mathbf{K}$ , está devidamente projetada. Por outro lado,  $S_{\sigma(k)}$ ,  $\sigma(k) \in \{2,3,4\}$  são instáveis se a planta é instável. É razoável supor que, se o sistema permanecer por um período de tempo suficientemente longo no estado  $S_1$  o sistema é estável. Em (SUN; QIN, 2011) uma condição para a estabilidade de tais sistemas comutados é desenvolvida e os resultados são apresentados a seguir.

### 3.2 ESTABILIDADE EXPONENCIAL

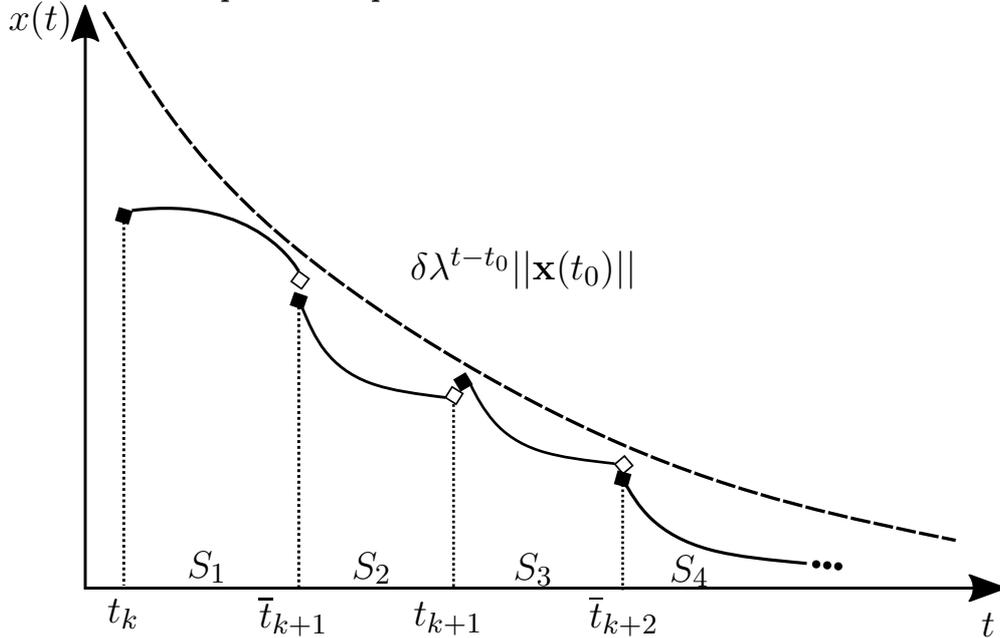
De acordo com (SUN; QIN, 2011; KHALIL, 2002), um WNCS submetido a perdas de pacotes pode ser avaliado através da estabilidade exponencial. A Figura 2 ilustra um sinal contínuo  $x(t)$  oscilando em função do estado atual do sistema. A permanência em estados estáveis que faz com que a magnitude das variáveis de estado decaiam com o tempo enquanto a permanência em estados instáveis tem o efeito contrário. (SOUZA

et al., 2017), de  $S_1$  até  $S_4$ . Sendo assim, é possível afirmar que se o tempo de comutação entre estados, denotado por tempo de permanência, é suficientemente lento então o sistema é exponencialmente estável. Tal comportamento é representado pela linha tracejada na Figura 2, a qual mostra o limite da magnitude do vetor de estados, ou seja, indicando que a estabilidade exponencial é um limite matemático para a estabilidade do sistema de controle. Além disso, seguindo (SUN; QIN, 2011), o sistema é globalmente exponencialmente estável se atender a

$$\|\mathbf{x}(t)\| \leq \delta \lambda^{t-t_0} \|\mathbf{x}(t_0)\|, \quad (34)$$

sendo  $t_0$  o instante de tempo inicial,  $\delta > 0$  é uma constante arbitraria e  $\lambda < 1$  é definida como taxa de decaimento do sistema. A taxa de decaimento do sistema determina o quão rápido o estado do sistema converge para o ponto de equilíbrio, ou diverge para o infinito quando o sistema é instável sendo então, o sistema não globalmente exponencialmente estável (KHALIL, 2002).

**Figura 2 – Limite exponencial para  $x$ .**



Fonte: Adaptado de (SOUZA et al., 2017)

Das matrizes do subsistema  $S_{\sigma(k)}$  definidas em (18), (22), (26) e (30) é possível obter a taxa de decaimento para cada subsistema. O subsistema estável é dado utilizando (18), sendo assim tem-se

$$\lambda_1 = \det \Phi_1, \quad (35)$$

com  $0 < \lambda_1 < 1$ . Por outro lado, a taxa máxima de decaimento para qualquer subsistema instável é obtida a partir das matrizes (22), (26) e (30) onde

$$\lambda_2 = \max(\det \Phi_i), \quad (36)$$

com  $\lambda_2 > 1$  e  $i \in \{2, 3, 4\}$ .

Assim, a partir de (SUN; QIN, 2011, Lemma 1) é possível afirmar que, se  $\Phi_1$  é uma matriz estável de Schur e  $\Phi_i$ ,  $i \in \{2, 3, 4\}$ , são matrizes instáveis, então existe uma constante escalar  $h_i \in [1, 4]$ , tal que as seguintes desigualdades são válidas para qualquer número inteiro

$$\|\Phi_1^k\| \leq h_1 \lambda_1^k, \quad (37)$$

$$\|\Phi_i^k\| \leq h_i \lambda_2^k, \quad i \in \{2, 3, 4\} \quad (38)$$

onde  $k$  é o instante de tempo atual. A constante escalar  $h_i$  tem valores arbitrários, mas neste trabalho é feita uma busca exaustiva a fim de obter os menores valores de  $h_i$  que atendam as equações (37) e (38).

### 3.3 TEMPO DE PERMANÊNCIA MÉDIO

O tempo médio de chaveamento entre os subsistemas disponíveis pe denominado tempo de permanência,  $\tau_a$ . A verificação da estabilidade de WNCS se dá por meio da abordagem de tempo de permanência. Como apresentam os autores em (HESPANHA; MORSE, 1999) a abordagem de tempo de permanência é uma condição suficiente para verificar a estabilidade do sistema. Sendo assim, faz-se que  $\mathcal{N}_\sigma[0, k)$  compute o número de chaveamentos de  $\sigma(k)$  no intervalo de tempo  $[0, k)$ . Então,  $\tau_a$  é definido como tempo de permanência se a seguinte condição for válida:

$$\mathcal{N}_\sigma[0, k) \leq \mathcal{N}_0 + \frac{k}{\tau_a}, \quad (39)$$

sendo  $\mathcal{N}_0 \geq 0$  definido como o limite de interações entre subsistemas (SUN; QIN, 2011) e  $\tau_a > 0$ . Conforme apresentado no Teorema 1 de (SUN; QIN, 2011), as duas condições suficientes para estabilidade exponencial com taxa de decaimento  $\lambda$  são dadas por

$$\tau_a = \frac{\ln h}{\ln \lambda - \ln \lambda^*}, \quad (40)$$

com  $\lambda \in (\lambda_1, 1)$ ,  $\lambda^* \in (\lambda_1, \lambda)$ ,  $h = \max(h_i)$ ,  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ , e

$$\inf_{k>0} \frac{K^-(k)}{K^+(k)} \geq \frac{\ln \lambda_2 - \ln \lambda^*}{\ln \lambda^* - \ln \lambda_1}, \quad (41)$$

sendo  $\frac{K^-(k)}{K^+(k)}$  a taxa entre o tempo total de ativação de subsistemas estáveis e instáveis. Ambas as condições serão relacionadas com a probabilidade de *outage* nos próximos parágrafos.

Durante o intervalo de tempo  $[0, k)$ , há um total de  $2k$  transmissões de dados, uma para cada enlace de transmissão como mostra a Figura 1. Sendo assim, tem-se que

$$n_i = r_i k, \quad (42)$$

sendo  $n_i$  o número de pacotes manipulados por cada subsistema  $S_i$ ,  $i \in [1, 4]$ , onde  $r_i$  é a probabilidade de operar no subsistema  $S_i$ . A probabilidade de operar em cada subsistema depende das probabilidades de *outage* dos enlaces sensor-controlador e controlador-atuador. A probabilidade de operar para o sistema em que não se tem falha em nenhum dos enlaces dá-se por

$$r_1 = (1 - \mathcal{O}_{sc})(1 - \mathcal{O}_{ca}). \quad (43)$$

Quando os enlaces entre sensor-controlador e controlador-atuador falham ao mesmo tempo tem-se a probabilidade de operar em  $S_2$  dada por

$$r_2 = \mathcal{O}_{sc} \mathcal{O}_{ca}. \quad (44)$$

A probabilidade de operar quando corre uma falha somente no enlace entre sensor-controlador ou quando a falha ocorre somente no enlace entre controlador-atuador pode ser equacionada, respectivamente, por

$$r_3 = \mathcal{O}_{sc}(1 - \mathcal{O}_{ca}), \quad (45)$$

$$r_4 = (1 - \mathcal{O}_{sc})\mathcal{O}_{ca}. \quad (46)$$

Em seguida, a taxa de perda de pacotes pode ser calculada a partir da soma do número de pacotes perdidos em cada subsistema, sendo que nenhum pacote é perdido em  $S_1$ , nos subsistemas  $S_3$  e  $S_4$  são perdidos respectivamente  $n_3$  e  $n_4$  pacotes. Já no estado  $S_2$ , se perde  $2 n_4$ . Portanto,

$$r = \frac{2n_2 + n_3 + n_4}{2k} = \frac{2r_2 + r_3 + r_4}{2}. \quad (47)$$

Então, aplicando (44)-(46) em (47) obtêm-se

$$r = \frac{2(\mathcal{O}_{sc}\mathcal{O}_{ca}) + (1 - \mathcal{O}_{sc})\mathcal{O}_{ca} + \mathcal{O}_{sc}(1 - \mathcal{O}_{ca})}{2} \quad (48)$$

$$= \frac{\mathcal{O}_{sc} + \mathcal{O}_{ca}}{2}. \quad (49)$$

Entretanto, neste trabalho considera-se que os enlaces sensor-controlador e controlador-atuador operam com a mesma taxa de transmissão, em distâncias similares, de modo que  $\mathcal{O}_{sc} = \mathcal{O}_{ca}$ , a qual denota-se de maneira simplificada por  $\mathcal{O}$ . Assim,

$$r = \mathcal{O}. \quad (50)$$

Tendo  $K^-(k) = k - K^+(k)$  e  $\frac{K^+(k)}{k} = r$  é possível aplicar (50) em (41) a fim de determinar a primeira condição de estabilidade como uma função da *outage* de chaveamento

$$\mathcal{O} \leq \frac{\ln \lambda^* - \ln \lambda_1}{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}. \quad (51)$$

Para a condição (40), o tempo médio de permanência deve ser calculado. O número máximo de chaveamento para subsistemas instáveis durante o intervalo  $[0, k)$  é dado por

$$\mathcal{N}_s = 2(n_2 + n_3 + n_4), \quad (52)$$

então, o mínimo tempo médio de permanência é dado por

$$\bar{\tau}_a = \frac{k}{\mathcal{N}_s}. \quad (53)$$

Substituindo (44)-(46) e (52) em (53) obtêm-se o mínimo tempo médio de permanência em função da probabilidade de *outage*:

$$\bar{\tau}_a = \frac{1}{2(2\mathcal{O} - \mathcal{O}^2)}. \quad (54)$$

## 4 MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

Neste capítulo o objetivo é minimizar a energia consumida por bit transmitido para o sistema de controle sem fio previamente proposto, garantindo a estabilidade exponencial global do sistema. A energia total consumida por bit em cada enlace sem fio  $ij \in \{\text{sc}, \text{ca}\}$  pode ser escrita como

$$E_{ij} = \frac{\frac{P_{ij}}{\eta} + P_{\text{TX}} + P_{\text{RX}}}{\mathcal{R}_{ij}}, \quad (55)$$

onde  $\eta$  é a eficiência do amplificador de potência,  $P_{\text{TX}}$  é o consumo de energia do circuito de radiofrequência RF no transmissor e  $P_{\text{RX}}$  é o equivalente no receptor.

Então, a energia total consumida por bit transmitido para o sistema é

$$E_b = \sum_{ij \in \{\text{sc}, \text{ca}\}} E_{ij}. \quad (56)$$

Portanto, visando minimizar  $E_b$  utiliza-se  $P_{\text{sc}} = P_{\text{ca}} = P$  e aloca-se a potência, usando como restrições do problema as condições de estabilidade definidas por (51) e (54). Desta maneira, o problema de otimização proposto pode ser escrito como

$$\min_{P_{\text{sc}}, P_{\text{ca}}} E_b = E_{\text{sc}} + E_{\text{ca}} \quad (57a)$$

$$\text{sujeito a } \tau_a \geq \bar{\tau}_a, \quad (57b)$$

$$\mathcal{O} \leq \frac{\ln \lambda^* - \ln \lambda_1}{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}, \quad (57c)$$

$$0 \leq P \leq P_{\text{max}}, \quad (57d)$$

$$\lambda_1 < \lambda < 1, \quad (57e)$$

$$\lambda_1 < \lambda^* < \lambda, \quad (57f)$$

em que  $P_{\text{max}}$  denota um limite máximo de potência de transmissão, considerado igual para sensor e controlador.

Primeiramente, aplica-se (40) e (54) na restrição de (57b) a fim de obter a máxima probabilidade de *outage* permitida que garanta o tempo médio máximo de permanência,

$$\tau_a \geq \frac{1}{2(2\mathcal{O} - \mathcal{O}^2)}. \quad (58)$$

Fazendo as devidas manipulações algébricas e substituindo (52) em (58) tem-se,

$$\frac{\ln h}{\ln \lambda - \ln \lambda^*} \geq \frac{1}{2(2\mathcal{O} - \mathcal{O}^2)}, \quad (59)$$

onde nota-se que  $\lambda^*$  é também uma função de  $\mathcal{O}$  devido a (57c). Então, é possível afirmar que a potência de transmissão aumenta quando a probabilidade de *outage* diminui. Assim, pode-se resolver (59) e (57c) como igualdades, a fim de encontrar a probabilidade máxima de *outage* permitida para minimizar o consumo de energia. Após algumas manipulações algébricas, obtêm-se

$$2\mathcal{O} - \mathcal{O}^2 = \frac{\ln \lambda - \ln \left( \lambda_1 \exp \left( \mathcal{O} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \right)}{2 \ln h}, \quad (60)$$

cuja solução leva a duas raízes em relação a  $\mathcal{O}$ ,

$$\mathcal{O}_+ = 1 - \frac{\ln(\lambda_1 \lambda_2)}{4 \ln h} + \sqrt{\left( \frac{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{4 \ln h} - 1 \right)^2 - \frac{\ln \frac{\lambda}{\lambda_1}}{2 \ln h}}, \quad (61)$$

$$\mathcal{O}_- = 1 - \frac{\ln(\lambda_1 \lambda_2)}{4 \ln h} - \sqrt{\left( \frac{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{4 \ln h} - 1 \right)^2 - \frac{\ln \frac{\lambda}{\lambda_1}}{2 \ln h}}. \quad (62)$$

Entretanto, apenas (62) apresenta um resultado no intervalo  $\mathcal{O} \in (0, 1)$ . Portanto, a probabilidade máxima de *outage* permitida,  $\mathcal{O}^*$ , que minimiza a energia consumida por bit pode ser escrita em forma fechada como

$$\mathcal{O}^* = 1 - \frac{\ln(\lambda_1 \lambda_2)}{4 \ln h} - \sqrt{\left( \frac{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{4 \ln h} - 1 \right)^2 - \frac{\ln \frac{\lambda}{\lambda_1}}{2 \ln h}}. \quad (63)$$

Em seguida, assumindo que o sensor e o controlador transmitem com a mesma potência e removendo a restrição máxima de potência de transmissão em (57d), é possível utilizar (2) e (63) a fim de escrever a potência mínima de transmissão necessária

$$\mathcal{P}_t^* = - \frac{(4\pi)^2 B d^\alpha M N_0 (2^{\mathcal{R}_b} - 1)}{\ln \left( \frac{\ln(\lambda_1 \lambda_2)}{4 \ln h} + \sqrt{\left( \frac{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{4 \ln h} - 1 \right)^2 - \frac{\ln \frac{\lambda}{\lambda_1}}{2 \ln h}} \right) G \left( \frac{c}{f} \right)^2}, \quad (64)$$

que depende de  $\lambda$ , escolhido durante o projeto do controlador, e também depende de  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $h$ , dados pela dinâmica específica do sistema de controle. Quando  $\lambda_1$  diminui, o sistema converge mais rápido para o ponto de equilíbrio quando opera no subsistema estável, de forma que  $\mathcal{O}^*$  aumenta. Por outro lado, quando  $\lambda_2$  aumenta, o sistema diverge mais rápido em direção ao infinito ao operar em um dos subsistemas instáveis, de forma

que  $\mathcal{O}^*$  diminui para garantir a estabilidade exponencial global .

## 5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo demonstra-se a validação da análise teórica apresentada no Capítulo 4 por meio de resultados numéricos. Para a validação dos resultados foram feitas as devidas análises para dois sistemas diferentes onde busca-se apresentar que a minimização pode ser utilizada em qualquer tipo de WNCS. Na Seção 5.1 emprega-se a minimização de energia consumida por bit no mesmo exemplo de sistema de controle de rede sem fio apresentado em (SUN; QIN, 2011). Verifica-se a relação entre a taxa de decaimento e a energia consumida por bit, e como a mesma é alterada conforme o acréscimo da distância entre receptor e transmissor. A análise apresentada na Seção 5.2 é referente a validação da análise para um sistema diferente do utilizado na seção anterior, sendo este sistema o apresentado em (HATTORI et al., 2015).

### 5.1 CENÁRIO 1

Empregou-se o mesmo sistema de tempo contínuo sem ruído apresentado em (SUN; QIN, 2011), que consiste em um sistema de controle de rede sem fio para diferentes distâncias entre transmissor e receptor, supondo  $d_{sc} = d_{ca} = d$ . Além disso, o sistema foi simulado para  $10^5$  períodos de amostragem e os parâmetros utilizados para modelar o sistema de comunicação estão resumidos na Tabela 1, de acordo com (CUI et al., 2005).

**Tabela 1 – Parâmetros do sistema de comunicação**

Parâmetros	Valores
Frequência da portadora	$f = 2,5$ GHz
Ganho da antena	$G = 5$ dB
Ruído PSD	$N_0 = -144$ dB
Largura de banda	$B = 10$ kHz
Margem de enlace	$M = 40$ dB
Eficiência spectral	$\mathcal{R}_b = 1$ bps/Hz
Eficiência do amplificador de potência	$\eta = 0,35$
Potência de circuitos no transmissor	$P_{TX} = 97,9$ mW
Potência de circuitos no receptor	$P_{RX} = 112$ mW

**Fonte: Autoria própria.**

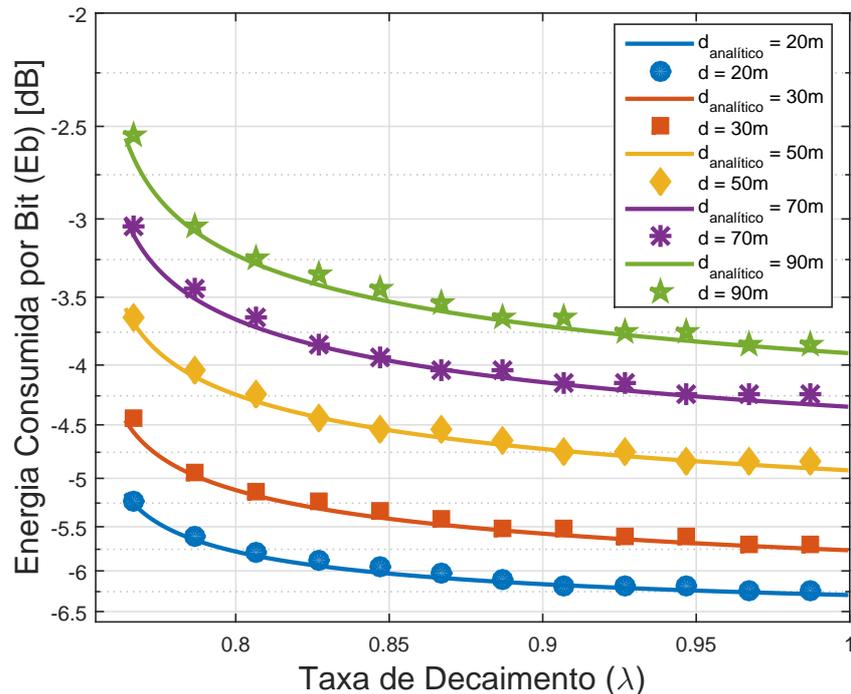
O sistema apresentado em (SUN; QIN, 2011) pode ser descrito pelas seguintes matrizes de espaço de estado contínuo

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -0,5 \\ 1 & -0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (65)$$

Então, assumindo um período de amostragem de  $T = 0,5s$ , a discretização do sistema (65) resulta em

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0,606 & 0 & -0,226 \\ 0,344 & 0,778 & -0,054 \\ 0 & 0 & 1,284 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -0,058 \\ -0,009 \\ 0,568 \end{bmatrix}. \quad (66)$$

**Figura 3** – Energia consumida por bit em função da taxa de decaimento para diferentes distâncias entre transmissor e receptor, supondo  $d_{sc} = d_{ca} = d$ .



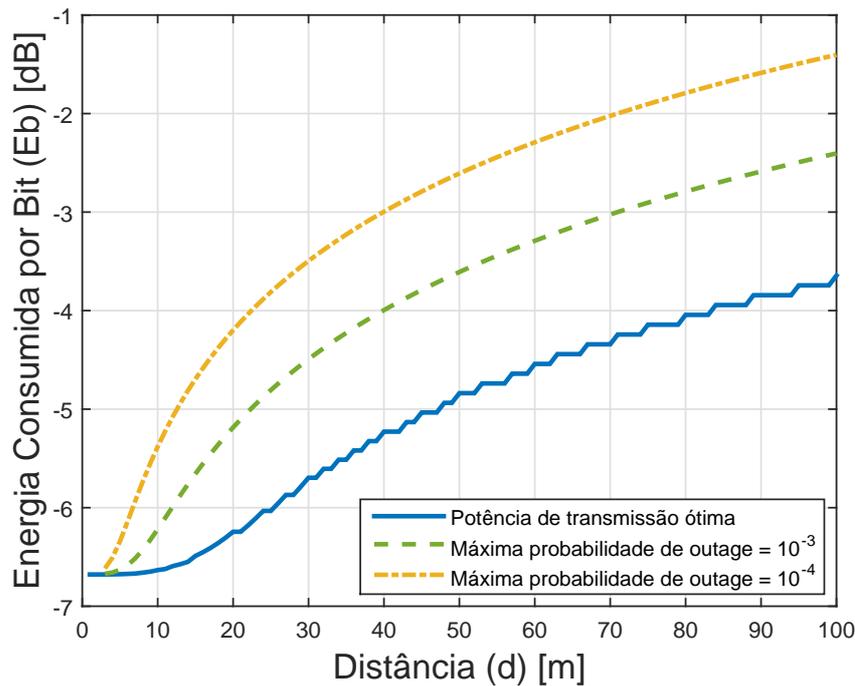
Fonte: Autoria própria

O sistema discreto apresentado em (66) é um sistema controlável instável (SUN; QIN, 2011). Neste trabalho, um regulador linear quadrático (LQR, do inglês *linear-quadratic regulator*) é usado para direcionar o sistema para a região de estabilidade (BELLMAN, 1971). Sendo assim, a matriz de ganho do controlador será obtida utilizando  $N = 0$ , que representa o peso das medidas de desempenho causadas pelo

vetor de estado,  $R=10$  como matriz de peso do controlador e  $Q=I_{m \times n}$  como matriz de pesos dos estados, no qual  $I_{m \times n}$  representa a matriz identidade. Assim, o controlador que obteve-se

$$K = \begin{bmatrix} 0.0349 & 0.0189 & -0.9828 \end{bmatrix}. \quad (67)$$

**Figura 4 – Máxima energia consumida por bit em função da distância entre o receptor e o transmissor.**



**Fonte: Autoria própria**

A Figura 3 mostra a relação entre a energia consumida por bit ( $E_b$ ) e a taxa de decaimento ( $\lambda$ ) para diferentes distâncias entre o controlador e o atuador. Além disso, tanto o sensor como o controlador empregam a potência de transmissão ideal dada por (64). Como pode-se observar, o consumo de energia diminui com  $\lambda$ , que ocorre uma vez que um menor  $\lambda$  implica em uma estabilidade maior ligada ao sistema. Em outras palavras, o sistema se torna mais sensível a eventos de *outage* quando operando nos estados instáveis. Como consequência,  $\mathcal{O}^*$  deve ser diminuído para evitar instabilidade, o que implica em alta potência de transmissão, aumentando  $E_b$ . Além disso, a Figura 3 indica que uma taxa de decaimento o mais próximo da unidade deve ser usada para minimizar o consumo de energia. Assim, emprega-se  $\lambda \rightarrow 1$  na sequência. No entanto, observa-se que  $\lambda$  depende da dinâmica do sistema de controle e do projeto proposto do controlador. Além disso, a partir da Figura 3 pode-se concluir que os resultados apresentados no Capítulo 4, em (64), correspondem ao desempenho da busca exaustiva.

**Tabela 2 – Potência de transmissão que minimiza a energia consumida por bit**

Distância (d) [m]	$\mathcal{P}^*$ Ótimo [dB]	$\mathcal{P}^*$ para <i>outage</i> = $10^{-3}$ [dB]	$\mathcal{P}^*$ para <i>outage</i> = $10^{-4}$ [dB]
10	-1,10	0,14	1,14
20	0,10	1,34	2,34
30	0,80	2,05	3,05
40	1,30	2,55	3,55
50	1,70	2,93	3,93
60	2,00	3,25	4,25
70	2,20	3,52	4,52
80	2,50	3,75	4,75
90	2,70	3,95	4,95
100	2,90	4,14	5,14

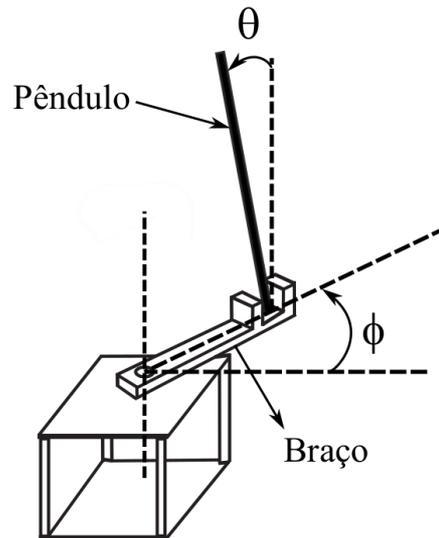
A Figura 4 compara a otimização proposta, minimizando  $E_b$  usando  $\mathcal{O}^*$  para garantir a estabilidade de acordo com o tempo médio de permanência, com a abordagem usual de minimizar o consumo de energia, dada uma qualidade de serviço (QoS), do inglês *quality of service*, mínima expressa em termos de uma probabilidade de *outage* máxima (BRANTE et al., 2011). Os casos da Figura 4 são apresentados para comparação, quando a probabilidade de *outage* alvo é de  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$ . Como pode ser observado a partir da Figura 4, a abordagem proposta consome significativamente menos energia se comparado aos outros casos apresentados na mesma figura.

A relação entre potência de transmissão que minimiza a energia consumida por bit,  $\mathcal{P}_t^*$ , e distância está apresentada na Tabela 2. É possível afirmar que conforme aumenta a distância entre o transmissor e o receptor será necessária uma potência de transmissão maior. Pela Tabela 2 também observa-se que os valores de potência transmitida alteram conforme a probabilidade de *outage* mínima fixada.

## 5.2 CENÁRIO 2

O sistema apresentado em (HATTORI et al., 2015) é referente a uma estrutura rotatória de um pêndulo invertido. Os parâmetros físicos deste pêndulo estão definidos em (REALTEC, 2011). Neste sistema é necessário estabilizar o ângulo do braço,  $\phi$ , em vista da estabilidade do ângulo do pêndulo,  $\theta$ , como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Pêndulo invertido rotativo.



Fonte: Adaptado de (REALTEC, 2011)

O sistema pode ser descrito pelas matrizes de espaço de estado contínuo apresentados em

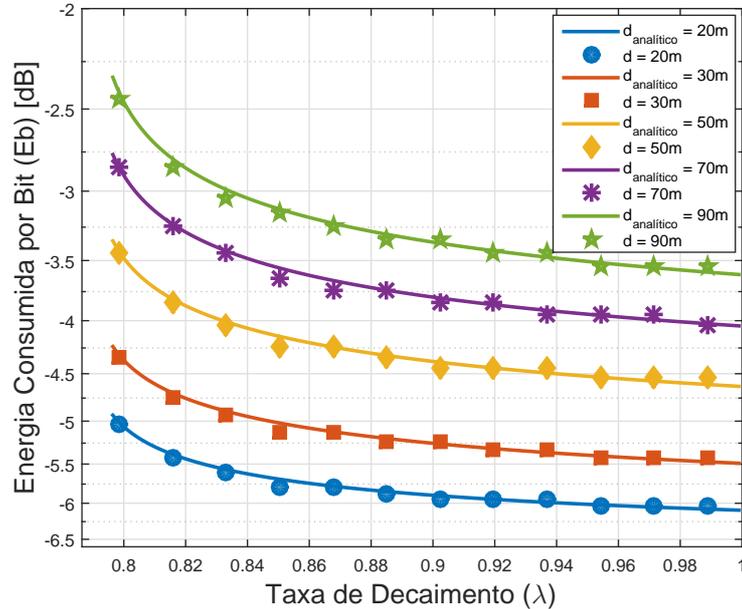
$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 111,18 & 0 & 0 & -1,4938 \\ -6,5400 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -8,6596 \\ 0,0001 \end{bmatrix}. \quad (68)$$

Assumindo o período de amostragem de  $T = 0,5s$ , tem-se então a discretização do sistema dada por

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 99,2 & 0 & 9,4 & -1,3 \\ -5,7 & 1 & -0,5 & 0,6 \\ 1049,8 & 0 & 99,2 & -14 \\ -61,2 & 0 & -5,7 & 1,8 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -7,5850 \\ 0,3799 \\ -81,1010 \\ 4,4826 \end{bmatrix}. \quad (69)$$

O sistema apresentado em (69) utilizará um regulador linear quadrático com  $N=0$

Figura 6 – Energia consumida por bit em função da taxa de decaimento para diferentes distâncias entre transmissor e receptor, supondo  $d_{sc} = d_{ca} = d$  para o sistema presente no artigo (HATTORI et al., 2015).



Fonte: Autoria própria

e  $R = 0.5$ , levando à seguinte matriz de ganho do controlador

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (70)$$

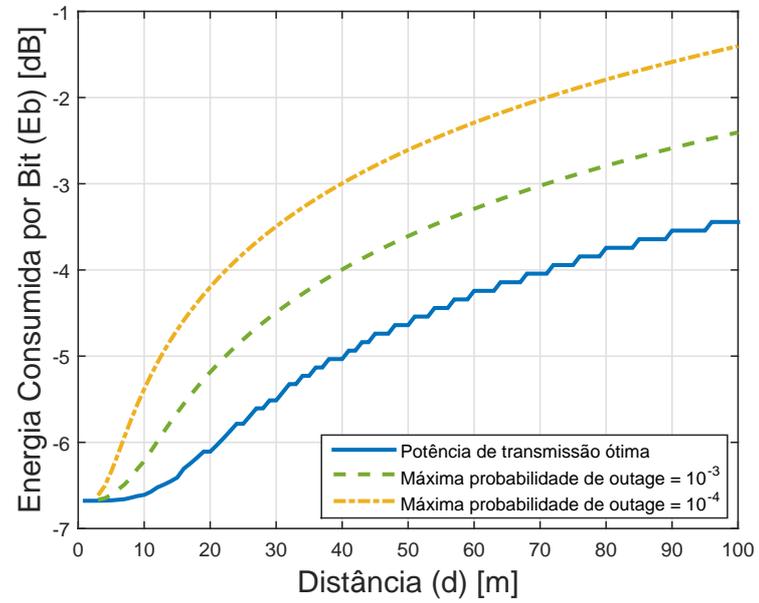
o que implica em

$$K = \begin{bmatrix} -13,0494 & 0,0093 & -1,2316 & 0,1900 \end{bmatrix}. \quad (71)$$

A Figura 6 apresenta a relação entre energia consumida por bit ( $E_b$ ) e taxa de decaimento do sistema ( $\lambda$ ) para o sistema de (HATTORI et al., 2015) com diferentes valores de distância entre o transmissor e o receptor. Como é possível observar, a mesma análise realizada no Capítulo 4 é válida para outros sistemas, mesmo com um maior número de variáveis a serem controladas. Ainda, os casos apresentados na Figura 7 comparam o método proposto, aplicado ao sistema de (HATTORI et al., 2015), com os casos em que a probabilidade máxima de *outage* é fixa em  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$ . A partir da figura é possível observar que a abordagem proposta neste trabalho consome significativamente

menos energia se comparado aos outros casos apresentados na mesma figura.

**Figura 7 – Máxima energia consumida por bit em função da distância entre o receptor e o transmissor para o sistema presente no artigo (HATTORI et al., 2015).**



Fonte: Autoria própria

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação foi proposta uma abordagem de minimização do consumo total de energia por bit em um sistema de controle de rede sem fio. O objetivo apresentado no início deste trabalho foi obter uma forma de minimização para o consumo de energia por bit aos casos de WNCS verificando a estabilidade de sistema utilizando a abordagem do tempo de permanência. Sendo assim, apresentou-se a modelagem do WNCS visando o sistema de comunicação. Foi apresentada a teoria de estabilidade a ser utilizada neste sistema por meio da modelagem do sistema de controle, da estabilidade exponencial e do tempo de permanência. Para escrever a relação entre a probabilidade de *outage* e estabilidade, recorre-se a uma abordagem de minimização das condições de estabilidade, de modo que obteve-se uma relação que a única variável presente na equação era a probabilidade de *outage*. Sendo assim, com as devidas manipulações algébricas obteve-se a probabilidade de *outage* que atende à restrição de estabilidade e minimiza a energia consumida por bit.

Os resultados apresentam que os parâmetros ótimos dependem da distância entre o transmissor e o receptor, bem como do projeto do controlador. A taxa de decaimento obtida pelo controlador implica em diferentes limiares de probabilidade de *outage*, afetando o consumo de energia. Por exemplo, quando uma convergência mais rápida é necessária, mais energia deve ser usada para o sistema de controle de rede sem fio. A solução proposta neste documento envolve apenas uma solução a qual é necessário obter as melhores probabilidades de *outage* e parâmetros referentes ao sistema de controle, visando minimizar consumo mantendo estabilidade. Dessa forma, muitas extensões são possíveis a partir desse trabalho.

Por exemplo, uma vantagem para o WNCS seria utilizar algoritmos distribuídos, que buscam minimizar a quantidade de *feedback* trocada entre os sensores a fim de obter uma solução ótima. Ou seja, cada sensor tenta fazer a sua alocação de potência baseada em medidas locais, com informação possivelmente desatualizadas. O resultado deste tipo de sistema será sub-ótimo, porém de menor complexidade. Em (BLETSAS et al., 2007) são apresentados *relays* oportunistas simples com estratégias *decode-and-forward* e *amplify-and-forward* sob uma restrição de potência total. Em particular, os autores consideram algoritmos de seleção de retransmissão distribuídos que exigem apenas conhecimento do canal local.

Os autores em (DURISI et al., 2016b) apresentam que pacotes curtos representam

a forma mais comum de tráfego gerada por sensores e outros dispositivos envolvidos em comunicações M2M. Além disso, há aplicações emergentes nas quais espera-se que pequenos pacotes carreguem informações críticas que devem ser recebidas com baixa latência e confiabilidade ultra-alta. Entretanto, os sistemas sem fio atuais não são otimizados para suportar transmissões de pacotes curtos. Quando os pacotes são curtos, as informações de cabeçalho podem ter o mesmo tamanho que a carga útil, e os métodos convencionais para transmiti-los podem ser sub-ótimos. Sendo assim, para fazer com que o exemplo proposto seja realista é necessário remodelar as equações de capacidade e de probabilidade de falha considerando blocos de tamanho finito. Os problemas envolvendo probabilidade de outage com blocos de tamanho finito podem ser solucionados por meio da teoria blocos finitos, diretrizes para o projeto de sistemas de comunicação de pacotes curtos (DURISI et al., 2016a). Dessa forma, a análise do sistema de controle sem fio utilizando pacotes de tamanho finito é de grande importância atual, tendo em vista que os WNCS são um dos principais exemplos de sistemas cMTC. Assim, toda a extensão do trabalho para o campo de blocos finitos é bastante interessante e traz grande complexidade aos problemas atuais, uma vez que a própria otimização do tamanho de pacotes torna-se essencial para o sistema.

Por fim, é possível buscar extensões em outras métricas de estabilidade, onde não necessitem do tempo mínimo de permanência e que sejam possíveis de modelar a estabilidade para outros tipos de sistemas cMTC. Por exemplo, em comunicações veiculares observam-se problemas similares, em que a comunicação entre nós deve ser feita com ultra-confiabilidade e baixa latência. Por exemplo, em (NADAS et al., 2017) avalia-se o uso de esquemas de requisição automática de repetição (HARQ, do inglês *hybrid automatic repeat request*) para melhorar a confiabilidade das comunicações. O sistema apresentado no artigo (NADAS et al., 2017) tem requisitos de latência com confiabilidade sendo um caso onde a métrica de estabilização é difícil de obter. Assim, o uso de retransmissão, aumenta a confiabilidade das transmissões e, quando projetada corretamente, pode trazer ganhos de desempenho sem sacrificar os requisitos de latência.

## REFERÊNCIAS

- ANDREWS, J. G.; BUZZI, S.; CHOI, W.; HANLY, S. V.; LOZANO, A.; SOONG, A. C. K.; ZHANG, J. C. What will 5G be? **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 32, n. 6, p. 1065–1082, Jun. 2014. ISSN 0733-8716.
- BELLMAN, R. E. **Introduction to the mathematical theory of control processes**. IMA, 1971.
- BLETSAS, A.; SHIN, H.; WIN, M. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 6, n. 9, p. 3450–3460, Sep. 2007. ISSN 1536-1276.
- BRANTE, G.; KAKITANI, M. T.; SOUZA, R. D. Energy efficiency analysis of some cooperative and non-cooperative transmission schemes in wireless sensor networks. **IEEE Trans. Commun.**, v. 59, n. 10, p. 2671–2677, Oct. 2011. ISSN 0090-6778.
- CUI, S.; GOLDSMITH, A. J.; BAHAI, A. Energy-constrained modulation optimization. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 4, n. 5, p. 2349–2360, Sept 2005.
- DURISI, G.; KOCH, T.; OSTMAN, J.; POLYANSKIY, Y.; YANG, W. Short-packet communications over multiple-antenna rayleigh-fading channels. **IEEE Trans. Commun.**, v. 64, n. 2, p. 618–629, Feb 2016. ISSN 0090-6778.
- DURISI, G.; KOCH, T.; POPOVSKI, P. Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with short packets. **Proceedings of the IEEE**, v. 104, n. 9, p. 1711–1726, Sept 2016. ISSN 0018-9219.
- ERICSSON. **Ericsson Mobility Report, November 2015**. 2015. Disponível em: <<http://www.ericsson.com/res/docs/2015/mobility-report/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf>>.
- ERICSSON. **Cellular Networks for Massive IoT**. 2016.
- GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. 1st. ed. Cambridge University Press, 2005.
- HATTORI, S.; KOBAYASHI, K.; OKADA, H.; KATAYAMA, M. On - off error control coding scheme for minimizing tracking error in wireless feedback control systems. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 11, n. 6, p. 1411–1421, Dec 2015. ISSN 1551-3203.
- HEEMELS, W. P. M. H.; TEEL, A. R.; WOUW, N. van de; NESIC, D. Networked control systems with communication constraints: Tradeoffs between transmission intervals, delays and performance. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 55, n. 8, p. 1781–1796, Aug 2010. ISSN 0018-9286.

HESPANHA, J. P.; MORSE, A. S. Stability of switched systems with average dwell-time. In: **Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.99CH36304)**. 1999. v. 3, p. 2655–2660 vol.3. ISSN 0191-2216.

HESPANHA, J. P.; NAGHSHTABRIZI, P.; XU, Y. A survey of recent results in networked control systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 1, p. 138–162, Jan 2007. ISSN 0018-9219.

KHALIL, H. K. **Nonlinear systems**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002. The book can be consulted by contacting: PH-AID: Wallet, Lionel.

LI, G.; XU, Z.; XIONG, C.; YANG, C.; ZHANG, S.; CHEN, Y.; XU, S. Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues. **IEEE Wireless Communications**, v. 18, n. 6, p. 28–35, december 2011. ISSN 1536-1284.

LIBERZON, D. **Switching in Systems and Control**. Birkhauser Boston, 2003. (Systems & Control: Foundations & Applications).

LIU, X.; GOLDSMITH, A. Wireless network design for distributed control. In: **2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (IEEE Cat. No.04CH37601)**. 2004. v. 3, p. 2823–2829 Vol.3. ISSN 0191-2216.

NADAS, J. P. B.; IMRAN, M. A.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D. Optimizing the energy efficiency of short term ultra reliable communications in vehicular networks. In: **15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)**. 2017. p. 1–6.

NIKRAVESH, S. **Nonlinear Systems Stability Analysis: Lyapunov-Based Approach**. CRC Press, 2016. ISBN 9781466569294. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=B8fMBQAAQBAJ>>.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PARK, P.; ARAÚJO, J.; JOHANSSON, K. H. Wireless networked control system co-design. In: **2011 International Conference on Networking, Sensing and Control**. 2011. p. 486–491.

PENTIKOUSIS, K. In search of energy-efficient mobile networking. **IEEE Commun. Mag.**, v. 48, n. 1, p. 95–103, Jan. 2010.

REALTEC. **Rotary Inverted Pendulum RTC05**. 2011. Disponível em: <<http://www011.upp.so-net.ne.jp/realtec/rtc05.pdf>>.

SADI, Y.; ERGEN, S. C. Energy and delay constrained maximum adaptive schedule for wireless networked control systems. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 14, n. 7, p. 3738–3751, Jul. 2015. ISSN 1536-1276.

SADI, Y.; ERGEN, S. C. Joint optimization of wireless network energy consumption and control system performance in wireless networked control systems. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 16, n. 4, p. 2235–2248, Apr. 2017. ISSN 1536-1276.

- SADI, Y.; ERGEN, S. C.; PARK, P. Minimum energy data transmission for wireless networked control systems. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 13, n. 4, p. 2163–2175, Apr. 2014. ISSN 1536-1276.
- SEILER, P.; SENGUPTA, R. An  $H_\infty$  approach to networked control. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 50, n. 3, p. 356–364, March 2005. ISSN 0018-9286.
- SHORTEN, R.; WIRTH, F.; MASON, O.; WULFF, K.; KING, C. Stability criteria for switched and hybrid systems. **SIAM Review**, v. 49, n. 4, p. 545–592, 2007.
- SOUZA, M.; FIORAVANTI, A. R.; CORLESS, M.; SHORTEN, R. N. Switching controller design with dwell-times and sampling. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 62, n. 11, p. 5837–5843, Nov 2017. ISSN 0018-9286.
- SUN, Y.; QIN, S. Stability of networked control systems with packet dropout: an average dwell time approach. **IET Control Theory Applications**, v. 5, n. 1, p. 47–53, Jan 2011. ISSN 1751-8644.
- TATIKONDA, S.; MITTER, S. Control under communication constraints. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 49, n. 7, p. 1056–1068, July 2004. ISSN 0018-9286.
- TULLBERG, H.; POPOVSKI, P.; LI, Z.; UUSITALO, M. A.; HOGLUND, A.; BULAKCI, O.; FALLGREN, M.; MONSERRAT, J. F. The METIS 5G system concept: Meeting the 5G requirements. **IEEE Communications Magazine**, v. 54, n. 12, p. 132–139, Dec. 2016. ISSN 0163-6804.