

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**RAFAELA SCACIOTA SIMÕES DA SILVA**

**MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE  
CONTROLE EM REDE SEM FIO**

**TESE**

**CURITIBA**

**2022**

**RAFAELA SCACIOTA SIMÕES DA SILVA**

**MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS  
DE CONTROLE EM REDE SEM FIO**

**Minimization of Energy Consumption in Wireless Network Control  
Systems**

Tese apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz

**CURITIBA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba**



RAFAELA SCACIOTA SIMOES DA SILVA

### **MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE CONTROLE EM REDE SEM FIO**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Área de concentração: Telecomunicações E Redes.

Data de aprovação: 22 de Abril de 2022

Dr. Glauber Gomes De Oliveira Brante, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Andre Augusto Mariano, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Joao Luiz Rebelatto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Onel Luis Alcaraz Lopez, Doutorado - University Of Oulu

Dr. Richard Demo Souza, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (Ufsc)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 22/04/2022.

Para aqueles que sonham comigo, que desejam  
de todo o coração a minha felicidade e sempre  
questionaram: "Qual é o seu próximo passo?",  
para vocês Mãe, Pai, Ju e João.

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço ao único que merece toda honra, glória e louvor, Deus. Obrigada pelas misericórdias que se renovam a cada manhã, pelo folego da vida que nunca cessou, pela graça infinita e acima de tudo obrigada pelo amor Incondicional.

"Eu te darei graças, Senhor, no meio dos povos;  
cantarei louvores a ti entre as nações.  
Pois o teu amor se eleva até os céus;  
a tua fidelidade alcança as nuvens." Salmos 57: 9-10

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) que desde 2010 me acolheu e esteve comigo durante 12 anos de estudo. Bem como agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI) pela oportunidade de participar do programa de Mestrado e Doutorado Acadêmico. Além disso, agradeço a CAPES pelo auxílio financeiro neste período.

Agradeço ao meu orientador, Professor Glauber Brante, que se tornou um grande amigo e me proporcionou grande conhecimento técnico, social e cultural ao longo de todo o período de Mestrado e Doutorado. Obrigada por estar sempre presente para me ajudar, obrigar por me motivar e incentivar. Muito obrigada por acreditar no meu potencial.

Agradeço aos demais professores que estiveram comigo ao longo desta jornada e que compartilharam conhecimento e vida neste período. Bem como aos professores que revisaram meus artigos e opinaram sobre os caminhos da pesquisa. Agradeço aos amigos e colegas que estiveram presentes em diversos momentos e me auxiliaram conforme podiam.

Por fim, obrigada a minha família. Aqueles que nunca desistiram e sempre estiveram comigo em todos os momentos. Aqueles que conviveram comigo e ainda me amam depois de terem visto tanto meu lado bom quanto o ruim. Pai e Mãe, vocês são os melhores pais que qualquer pessoa poderia ter. Vocês também são as pessoas mais inteligentes que eu conheço. Muito obrigada por terem investido tanto na minha vida. Ju e João, vocês são uma parte de mim fora de mim. Muito obrigada por me ouvirem, crescerem comigo e compartilharem os bons e maus momentos. Obrigada por serem quem vocês são.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

É melhor conseguir sabedoria do que ouro; é  
melhor ter conhecimento do que prata.

Provérbios 16:16

## RESUMO

SILVA, Rafaela Scaciota Simões da. **Minimização do Consumo de Energia em Sistemas de Controle em Rede sem Fio**. 2022. 72 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

Um dos principais casos para o uso da tecnologia de sexta geração (6G) é conhecida como URLLC (do inglês, *Ultra-Reliable Low-Latency Communications*), que tem como requisitos a baixa latência, a confiabilidade e a disponibilidade altas que garantem a resiliência do sistema contra possíveis cenários de indisponibilidade. Ainda, por causa de restrições de custo e tamanho, no momento da implementação desses sistemas, é comum que os sistemas de controle sem fio sejam alimentados por baterias. Logo, a energia consumida pelo sistema precisa ser levada em consideração. Sendo assim, três cenários foram analisados para solucionar os requisitos de sistemas de controle sem fio. Nos dois primeiros cenários este trabalho foca na minimização da energia consumida por bit transmitido com sucesso, com a restrição de que a estabilidade do sistema de controle deve ser garantida. O primeiro cenário utilizou uma condição que é suficiente para obter a estabilidade do sistema conhecida como método do tempo de permanência. Assim, foi possível, por meio da otimização da probabilidade de *outage*, minimizar o consumo de energia por bit a partir de uma expressão fechada que relaciona a probabilidade de *outage* máxima do sistema com a estabilidade do sistema de controle. Foi concluído que o projeto conjunto de comunicações e controle tem menor consumo de energia que o método tradicional da literatura, de minimizar energia dada uma *outage* alvo fixa. O segundo cenário apresentou a minimização da energia consumida por bit a partir da otimização da probabilidade de *outage* modelada de acordo com a distribuição Nakagami- $m$  correlacionada no tempo. Os resultados mostram que os parâmetros ideais de probabilidade de *outage* e potência de transmissão dependem do fator de correlação temporal presente no canal de comunicação. Por fim, no terceiro cenário temos como foco minimizar a quantidade de energia utilizada por uma fonte de energia de múltiplas antenas que alimenta um sistema com controle preditivo. Neste cenário foi possível determinar a estatística de energia incidente para os casos de termos a informação instantânea ou média de estado do canal. Para os respectivos cenários modelou-se a probabilidade de *outage* levando em consideração que a confiabilidade do sistema é afetada por ambos os enlaces, de transferência de energia e de informação. Os resultados apresentam que a energia mínima dependerá da quantidade de antenas na fonte de energia e da quantidade de comandos de controle preditivo. Foi concluído que a utilização da informação média do estado do canal é capaz de se aproximar do cenário com informação instantânea do estado do canal, especialmente quando o número de antenas aumenta.

**Palavras-chave:** sistemas de controle de rede sem fio. tempo médio de permanência. correlação no tempo. consumo de energia. transferência de energia sem fio.

## ABSTRACT

SILVA, Rafaela Scaciota Simões da. **Minimization of Energy Consumption in Wireless Network Control Systems**. 2022. 72 p. Thesis (PhD in Electrical and Computer Engineering) – Federal University of Technology-Paraná. Curitiba, 2022.

One of the main 6G use cases is known as URLLC, which has as necessary requirements the latency, reliability and availability that guarantees the resilience of the system against possible scenarios of unavailability. Also, because of cost and size restrictions at the time of implementation of these systems, it is common for wireless control systems to be powered by batteries. Then, the energy consumed by the system needs to be taken into consideration. Therefore, three scenarios were analyzed to solve the necessary requirements in wireless control systems. The first two scenarios this work focuses on minimizing the energy consumed per successfully transmitted bit, with the constraint that the stability of the control system must be guaranteed. The first scenario used a condition that is sufficient to obtain the stability of the system known as the residence time method. Where it was possible through the optimization of the outage probability, to minimize the power consumption per bit from a closed expression that relates the maximum outage probability that the system can operate with the stability of the control system. With the analysis made from the scenario of the dwell time method, it was concluded that the joint design of communications and control has lower energy consumption than the traditional method in the literature, of minimizing energy given a fixed target outage. The second scenario presented a wireless networked control system (WNCS) with time correlation. The minimization of the energy consumed per bit was given from the optimization of the probability of outage of distributed channels according to a Nakagami- $m$  distribution correlated in time. Therefore, a closed form expression was obtained for the transmission power that minimizes the amount of energy consumed per bit in this WNCS scenario. The results show that the optimal parameters of outage probability and transmission power depend on the temporal correlation factor present in the communication channel in a wireless network control system. Finally, in the third scenario, we minimize the amount of energy used by a power source with multiple antennas that feed a system with predictive control. In this scenario, it was possible to determine the model of the wireless channel of energy and information transfer and the incident energy statistics for cases of instantaneous or average channel state information. For the respective scenarios, we modeled the probability of outage, taking into account that both links affect the system's reliability. The results show that the minimum energy will depend on the amount of energy before in the energy source and the number of predictive control commands. And we concluded that the use of a channel with instant information has less energy is used by the source than a channel with average information.

**Keywords:** wireless networked control systems. average dwell-time. time correlation. energy consumption. wireless energy transfer.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Arquitetura geral de um sistema de controle distribuído em uma rede de comunicação sem fio com dois enlaces de comunicação. . . . .	26
Figura 2 – Estabilidade exponencial vinculada a $x(t)$ . . . . .	29
Figura 3 – Estrutura rotacional de um pêndulo invertido, onde $\phi$ é o ângulo do braço e $\theta$ é ângulo de pêndulo. . . . .	36
Figura 4 – Resposta ao degrau do ângulo do braço do pêndulo sujeito a diferentes valores de probabilidade de <i>outage</i> . O controlador tenta mover o braço de $\phi = \frac{17\pi}{36}$ rad para $\phi = 0$ rad, enquanto o braço do pêndulo não pode exceder um ângulo máximo de $ \phi  \leq \frac{\pi}{2}$ . . . . .	37
Figura 5 – Energia consumida por bit em função da taxa de decaimento para diferentes distâncias entre o transmissor e o receptor, assumindo $d_{sc} = d_{ca} = d$ . . . . .	39
Figura 6 – Energia consumida por bit em função da eficiência espectral ( $\mathcal{R}_b$ ), para diferentes $d$ . . . . .	40
Figura 7 – Energia consumida por bit em função da distância entre o receptor e o transmissor. . . . .	41
Figura 8 – Energia consumida por bit em função da constante que multiplica a distância entre o receptor do controlador e o transmissor. . . . .	41
Figura 9 – Arquitetura geral de um sistema de controle distribuído em uma rede de comunicação sem fio com um enlace de comunicação sem fio entre o controlador e o atuador. . . . .	43
Figura 10 – Energia consumida por bit em função da correlação de tempo para diferentes ordens de desvanecimento. . . . .	47
Figura 11 – Energia consumida por bit em função da distância entre o receptor e o transceptor para diferentes ordens de desvanecimento e correlação de tempo. . . . .	48
Figura 12 – Arquitetura geral de um sistema de controle distribuído em uma rede de comunicação sem fio com um enlace de comunicação sem fio entre o controlador e o atuador. . . . .	52
Figura 13 – Função não-linear da energia coletada. . . . .	58
Figura 14 – Eficiência em função da energia incidente. . . . .	59
Figura 15 – Energia mínima utilizada pelo PB ( $\mathcal{E}$ ) como uma função do tempo de carregamento ( $T_{wet}$ ), para F-CSI e A-CSI, com $M = 8$ e $K \in \{2, 3, 4\}$ . . . . .	60
Figura 16 – Energia mínima utilizada pelo PB ( $\mathcal{E}$ ) como uma função do tempo de carregamento ( $T_{wet}$ ), para F-CSI e A-CSI, com $K = 2$ e $M \in \{8, 16\}$ antenas. . . . .	61
Figura 17 – Valor ótimo de $T_{wet}$ como uma função da confiabilidade do sistema de controle ( $p_c$ ), com $K = 3$ e $M \in \{8, 16\}$ antenas. . . . .	62
Figura 18 – $\mathcal{E}$ mínima versus $p_c$ com $K = 3$ e $M \in \{8, 16, 32\}$ . . . . .	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do sistema de comunicação . . . . .	35
Tabela 2 – Potência de transmissão ideal e eficiência espectral em função da distância do enlace. . . . .	39
Tabela 3 – Energia consumida por bit em função do número de <i>outage</i> consecutivas para diferentes distâncias no enlace sem fio. . . . .	48
Tabela 4 – Parâmetros de simulação . . . . .	60

## LISTA DE SIGLAS

6G	<i>Sixth Generation</i>
A-CSI	<i>Average-CSI</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
EH	<i>Energy Harvesting</i>
F-CSI	<i>Full-CSI</i>
FL	<i>Federated Learning</i>
ID	<i>Interface Diversity</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
LQR	<i>Linear-Quadratic Regulator</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAD	<i>Maximum Allowable Delay</i>
MATI	<i>Maximum Allowed Transfer Interval</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MRT	<i>Maximum Ratio Transmission</i>
MTC	<i>Machine-Type Communications</i>
mMTC	<i>massive MTC</i>
PB	<i>Power Beacon</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PHY	<i>Physical</i>
PPC	<i>Packetized Predictive Control</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
ULA	<i>Uniform Linear Array</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable Low-Latency Communications</i>
WET	<i>Wireless Energy Transfer</i>
WIT	<i>Wireless Information Transfer</i>
WNCS	<i>Wireless Networked Control System</i>
WPNCs	<i>Wireless Powered &amp; Networked Control System</i>
ZOH	<i>Zero-Order Hold</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	expoente de perda de percurso
$\alpha_{\text{wet}}$	expoente de perda de percurso no enlace WET
$\alpha_{\text{wit}}$	expoente de perda de percurso no enlace WIT
$\bar{\gamma}_{\text{ca}}$	SNR média controlador-atuador
$\bar{\gamma}_{\text{sc}}$	SNR média sensor-controlador
$\bar{\tau}_a$	tempo médio de permanência mínimo
$\beta_{\text{wet}}$	ganho de potência médio no enlace WET
$\beta_{\text{wit}}$	ganho de potência médio do enlace WIT
$\chi_{\text{wet}}$	fator LOS do canal WET
$\chi_{\text{wit}}$	fator LOS do canal WIT
$\delta$	atraso de <i>feedback</i> do canal
$\eta$	eficiência do amplificador de potência
$\mathbb{E}$	valor esperado
$\gamma$	SNR instantânea no atuador
$\Gamma(\cdot)$	função gama completa
$\gamma_{\text{ca}}$	SNR instantânea controlador-atuador
$\gamma_{\text{sc}}$	SNR instantânea sensor-controlador
$\gamma_0$	SNR limite para decodificação correta
$\hat{P}_{\text{ca}}$	potência de transmissão ideal
$\kappa_{\text{ca}}$	perda de percurso na transmissão entre controlador e atuador
$\kappa_{\text{sc}}$	perda de percurso na transmissão entre sensor e controlador
$\Lambda$	variável da potência de transmissão ideal
$\lambda$	taxa de decaimento
$\lambda^*$	taxa de decaimento máxima de permitida
$\lambda_1$	taxa de decaimento para subsistema estável
$\lambda_2$	taxa máxima de decaimento para qualquer subsistema instável
$\mathbf{A}_c$	Matrizes contínuas de espaço de estados
$\mathbf{A}$	matriz de estados
$\mathbf{B}_c$	Matrizes contínuas de espaço de estados
$\mathbf{B}$	matriz de controle
$\mathbf{h}$	vetor do canal do enlace WET
$\mathbf{h}_L$	envoltórias do canal
$\mathbf{K}$	matriz de ganho de <i>feedback</i> do estado
$\mathbf{n}_{\text{ca}}$	ruído entre controlador e atuador
$\mathbf{n}_{\text{sc}}$	ruído aditivo gaussiano branco
$\mathbf{Q}$	matriz de peso do controlador
$\mathbf{R}$	covariância do componente determinístico da linha de visada
$\mathbf{s}$	signal de entrada do controlador

$\mathbf{v}$	ação de controle
$\mathbf{w}_{\text{A-CSI}}$	pré-codificação do CSI médio
$\mathbf{w}_{\text{F-CSI}}$	pré-codificação do CSI instantâneo
$\mathbf{w}_i$	pré-codificador
$\mathbf{x}$	matriz de estados do sistema
$\mathbf{y}_{\text{ca}}$	sinal recebido pelo atuador
$\mathbf{y}_{\text{sc}}$	sinal recebido pelo controlador
$\mathbf{z}$	vetor concatenado
$\mathcal{E}$	energia utilizada pelo PB
$\mathcal{G}(\cdot)$	modelo não-linear da energia coletada
$\mathcal{N}$	número de comutações
$\mathcal{O}_{\text{sc}}$	probabilidade de <i>outage</i> entre sensor-controlador
$\mathcal{O}_{\text{A-CSI}}$	probabilidade de <i>outage</i> com CSI médio
$\mathcal{O}_{\text{F-CSI}}$	probabilidade de <i>outage</i> com CSI instantâneo
$\mathcal{O}_L$	probabilidade de <i>outage</i>
$\mathcal{P}_{\text{ca}}$	potência de transmissão utilizada pelo controlador
$\mathcal{P}_{\text{sc}}$	potência de transmissão do sensor
$\mathcal{P}_{\text{A-CSI}}$	potência incidente de RF no controlador com CSI médio
$\mathcal{P}_{\text{F-CSI}}$	potência incidente de RF no controlador com CSI instantâneo
$\mathcal{P}_o$	limite de probabilidade de <i>outage</i>
$\mathcal{P}_i$	potência de RF coletada pelo controlador
$\mathcal{R}_b$	eficiência espectral
$\mathcal{R}_{\text{sc}}$	taxa de transmissão sensor-controlador
$\mathcal{R}_{ij}$	taxa de transmissão
$\mathcal{R}_{ij}^*$	taxa de dados ideal
$\mathcal{W}$	função Lambert- $W$
$\mathcal{Y}$	nível de saturação da função não-linear da energia coletada
$\nu$	parâmetro não-centralizado da distribuição qui-quadrado
$\omega_l$	variável da função de distribuição cumulativa conjunta Nakagami- $m$
$\bar{\mathbf{h}}$	componente determinístico da linha de visada
$\bar{T}_1$	estado de chaveamento
$\bar{T}_2$	estado de chaveamento
$\bar{z}$	componente LOS determinístico do enlace WIT
$\phi$	ângulo do braço
$\psi_t$	deslocamento médio de fase do $(t + 1)$ -ésimo elemento de matriz em relação à primeira antena
$\rho$	correlação do tempo
$\sigma$	sinal de chaveamento
$\tau_a$	tempo de permanência
$\Theta$	variável da potência de transmissão ideal
$\theta$	ângulo do pêndulo
$\tilde{\mathbf{h}}$	componente de dispersão

$\tilde{O}_L$	aproximação assintótica para a probabilidade de <i>outage</i>
$\tilde{z}$	componente de dispersão do enlace WIT
$\nu$	ângulo de azimute em relação ao do conjunto de antenas transmissoras
$\Upsilon(\cdot, \cdot)$	função Gamma incompleta inferior
$\varepsilon$	constante arbitrária
$\vartheta(L, \rho)$	variável da aproximação assintótica para a probabilidade de <i>outage</i>
$\vartheta_i$	constante escalar arbitrária
$\zeta$	variável CSI Médio
$\zeta_I$	variável imaginária CSI Médio
$\zeta_R$	variável real CSI Médio
$a$	variável da CDF de $\mathcal{P}_{A\text{-CSI}}$
$B$	largura de banda do sistema
$b$	variável da CDF de $\mathcal{P}_{A\text{-CSI}}$
$B^+(k)$	tempo total de permanência de subsistemas instáveis
$B^-(k)$	tempo total de permanência do subsistema estável
$c$	velocidade da luz no vácuo
$c_0$	constante da função não-linear da energia coletada
$c_1$	constante da função não-linear da energia coletada
$d_{ca}$	distância entre controlador e atuador
$d_{sc}$	distância entre sensor e controlador
$d_{wet}$	distância entre o controlador e o PB
$d_{wit}$	distância entre o controlador e o atuador
$E_b$	consumo de energia por bit transmitido
$E_b$	energia total consumida por bit transmitido
$E_{ij}$	energia consumida por bit em cada enlace sem fio
$E_i$	energia instantânea coletada do RF durante a etapa WET
$f$	frequência da portadora
$F_{\mathcal{P}_{A\text{-CSI}}}$	função de distribuição cumulativa da potência de RF
$f_{\mathcal{P}_{A\text{-CSI}}}$	função de distribuição de probabilidade da potência de RF
$G$	ganho das antenas
$H$	número de bits no cabeçalho da mensagem
$h_{ca}$	desvanecimento do canal entre controlador e atuador
$h_{sc}$	desvanecimento do canal entre sensor e controlador
$I_0(\cdot)$	função de Bessel de primeira ordem.
$I_{ca}$	informações mútuas
$I_{sc}$	informação mútua sensor-controlador
$K$	sequência de comandos de controle
$k$	instante de tempo atual
$L$	eventos de <i>outage</i> consecutivas
$M$	margem de enlace
$m$	ordem de desvanecimento Nakagami- $m$
$M_{PB}$	número de antenas no PB
$N$	número total de bits

$N_0$	densidade espectral da potência unilateral do ruído
$N_f$	figura do ruído
$P_b$	potência de transmissão do PB
$P_{ca}^*$	potência de transmissão máxima
$P_{max}$	restrição máxima da potência de transmissão
$P_{RF}$	consumo de potência dos circuitos de radio frequência
$P_{RX}$	consumo de potência dos circuitos de radio frequência no receptor
$P_{TX}$	consumo de potência dos circuitos de radio frequência no transmissor.
$p_c$	probabilidade de <i>outage</i> de controle
$p_e$	probabilidade de erro do pacote
$P_{ij}$	potência de transmissão de cada enlace sem fio
$P_t$	potência de transmissão do controlador
$R$	matriz de ponderação
$r$	número de variáveis de estado
$R_b$	taxa de transmissão
$r_{\sigma(k)}$	probabilidade de permanecer no subsistema $S_{\sigma(k)}$
$S$	número de bits enviados
$s$	número de saídas do sistema
$S_{\sigma(k)}$	subsistemas
$T$	tempo total de transmissão
$t_0$	instante de tempo inicial
$T_1$	estado de chaveamento
$T_2$	estado de chaveamento
$T_{wet}$	tempo utilizado na etapa WET
$T_{wit}$	tempo utilizado na etapa WIT
$z$	canal do enlace WIT
$O^*$	probabilidade máxima de <i>outage</i> permitida
$O_{ca}$	probabilidade de <i>outage</i> entre controlador e atuador
$P_{ij}^*$	potência de transmissão ideal para cada enlace sem fio
$O_{ca}$	probabilidade de <i>outage</i> no enlace entre controlador e atuador
$O_{sc}$	probabilidade de <i>outage</i> no enlace entre sensor e controlador
$O$	probabilidade de <i>outage</i>
$\Psi_1$	matriz do subsistema onde não há <i>outage</i> no enlace
$\Psi_2$	matriz do subsistema onde dois enlaces falham
$\Psi_3$	matriz do subsistema onde há <i>outage</i> no enlace sensor-controlador
$\Psi_4$	matriz do subsistema onde há <i>outage</i> no enlace controlador-atuador
${}_0F_1(\cdot; \cdot; \cdot)$	função limite hipergeométrica confluyente

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
1.2	CONTRIBUIÇÕES	21
<b>2</b>	<b>MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR BIT USANDO UMA ABORDAGEM DE TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA</b>	<b>23</b>
2.1	INTRODUÇÃO	23
2.2	MODELO DO SISTEMA	25
2.3	ESTABILIDADE DO SISTEMA	27
2.3.1	Modelagem do Sistema de Controle	28
2.3.2	Estabilidade Exponencial	29
2.3.3	Tempo de Permanência Médio ( <i>Average Dwell-Time</i> )	30
2.4	<i>CO-DESIGN</i> DE CONTROLE-COMUNICAÇÃO	33
2.5	RESULTADOS NUMÉRICOS	35
2.6	COMENTÁRIOS FINAIS	42
<b>3</b>	<b>MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR BIT EM CANAIS NAKAGAMI-<i>m</i> COM CORRELAÇÃO TEMPORAL</b>	<b>43</b>
3.1	PROBABILIDADE DE <i>OUTAGE</i>	44
3.2	PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	45
3.3	RESULTADOS NUMÉRICOS	46
3.4	COMENTÁRIOS FINAIS	49
<b>4</b>	<b>CONTROLE PREDITIVO ALIMENTADO POR UMA FONTE DE ENERGIA DE MÚLTIPLAS ANTENAS</b>	<b>50</b>
4.1	INTRODUÇÃO	50
4.2	MODELO DO SISTEMA	51
4.2.1	Modelo de Controle Preditivo Empacotado	52
4.2.2	Modelo do Canal	53
4.2.2.1	Enlace WET	53
4.2.2.2	Enlace WIT	53
4.3	ESTATÍSTICAS DE ENERGIA INCIDENTE	54
4.3.1	CSI Instantâneo	55
4.3.2	CSI Médio	55
4.4	ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE CONFIABILIDADE	56
4.4.1	Probabilidade de <i>Outage</i>	56
4.4.1.1	CSI Instantâneo	57
4.4.1.2	CSI Médio	57
4.4.2	Problema de Otimização	57
4.5	RESULTADOS NUMÉRICOS	59
4.6	COMENTÁRIOS FINAIS	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>64</b>



**REFERÊNCIAS** ..... **67**

## 1 INTRODUÇÃO

O número de dispositivos utilizando o conceito de Internet das coisas (IoT: do inglês, *Internet of Things*) continua crescendo. Em 2021 eram 22,44 bilhões de dispositivos conectados via Internet (ERICSSON, 2022). Nesta rede, não apenas coisas, mas também dispositivos autônomos serão beneficiados com a utilização da conexão sem fio. Na próxima década, espera-se que a indústria de manufatura evolua para uma organização distribuída. Sob o conceito da Indústria 4.0, a produção terá como principal atributo as habilidades de comunicação, o que possibilitará baixo consumo de energia em processos de manufatura, compartilhando recursos com o intuito de otimizar a cadeia produtiva, proporcionando também uma melhor integração com a logística (KADA *et al.*, 2019).

Estudos mostram que em 2027 o número de dispositivos IoT pode ultrapassar 41 bilhões. O maior usuário de dispositivos IoT é o setor industrial, o qual concentra 57,6% dos dispositivos IoT existentes (ERICSSON, 2022). Os sistemas 5G foram os primeiros a buscar soluções para essa expansão das comunicações sem fio do tipo máquina (MTC: do inglês, *Machine-Type Communications*) com requisitos muito diversos de confiabilidade e latência. Neste contexto, as redes 5G são hoje as principais facilitadoras, proporcionando a infraestrutura de comunicação necessária. Por exemplo, existem critérios muito restritivos de latência, confiabilidade e cobertura quando se lida com comunicação entre componentes de uma indústria, o que consiste em um dos principais casos de uso no desenvolvimento da tecnologia 6G, denotada como URLLC (do inglês, *Ultra-Reliable Low-Latency Communications*) (ALWIS *et al.*, 2021). Diferentemente das aplicações mMTC (do inglês, *massive MTC*), as quais representam o surgimento da IoT e não têm restrições severas de confiabilidade e latência para URLLC as aplicações envolvem cenários mais complexos do ponto de vista de requisitos de comunicações, tais como segurança de tráfego, aplicações industriais e controle, fabricação remota, treinamento, cirurgia remota, etc.

Um importante cenário que exemplifica tal integração entre comunicação e manufatura é dado por sistemas de controle em redes sem-fio (WNCS: do inglês, *Wireless Networked Control System*). WNCSs, que são um caso de URLLC, são sistemas de controle com realimentação compostos por sensores, atuadores e controladores espacialmente distribuídos e comunicando-se através de ligações sem-fio, ao invés de conexões cabeadas ponto-a-ponto (PARK *et al.*, 2018). Construir uma malha de controle em rede é uma tarefa desafiadora devido à baixa confiabilidade inerente de canais sem fio, os quais apresentam *outage* e atrasos, impactando a confiabilidade

do sistema em geral. Logo, para melhorar a estabilidade da malha, é desejável que o sistema de comunicação opere em uma região de baixa probabilidade de *outage*, demandando potência de transmissão crescente (GOLDSMITH, 2005).

Um dos desafios em MTC é o custo do dispositivo e a duração da bateria, pois muitos dispositivos serão alimentados através de baterias e requerem recarga ou substituição constante. Já os requisitos necessários para o URLLC também incluem o rigoroso desempenho de confiabilidade, que é a capacidade de garantir uma transmissão de mensagens bem-sucedida dentro de um orçamento de latência definido; e necessidade de baixa latência, definida como o intervalo de tempo entre os dados sendo gerados e transmitidos de um dispositivo e os mesmos dados sendo recebidos corretamente por outro dispositivo. Portanto, a combinação desses requisitos estritos para realizar um enlace de controle em rede estável (SAMA *et al.*, 2021), levam a um alto consumo de energia dada a natureza não confiável do canal sem fio (FENG *et al.*, 2021). A interação entre sistemas de controle e redes é uma área de pesquisa ativa.

Como consequência, dois objetivos conflitantes devem ser atingidos: *i.*) reduzir o custo de manutenção devido à reposição de baterias ou recarregamento; e *ii.*) a confiabilidade do sistema não pode ser reduzida ao ponto em que a estabilidade da malha de controle seja comprometida. Por exemplo, sempre que o sistema de comunicação sem fio apresentar desvanecimento profundo ou somreamento, a retransmissão de pacote é empregada para evitar a *outage* ao ponto de reduzir a taxa de transferência. No entanto, em um sistema de controle, ações extras podem ser necessárias para compensar a redução na taxa de transferência ou o aumento da *outage*. Portanto, o custo de controle é, inevitavelmente, elevado (ZHAO *et al.*, 2019).

Sendo assim, essa tese apresentará três cenários com o foco relacionado a minimização de energia em WNCS. No primeiro cenário temos como objetivo minimizar o consumo de energia por bit usando uma abordagem de tempo médio de permanência em WNCS. Inicialmente é apresentado o modelo de um sistema de controle comunicação é feita por dois enlaces sem fio, entre o sensor e o controlador e entre o controlador e o atuador. Em ambos os enlaces os canais seguem uma distribuição Rayleigh. Como existem dois enlaces sem fio, o sistema pode ser dividido em quatro subsistemas, representando todas as combinações com os enlaces em *outage* ou não, sendo portanto três destes subsistemas instáveis (quando pelo menos um ou ambos os enlaces estão em *outage*) e somente um estável (com ambos os enlaces sem erros de comunicação). Assim, a estabilidade do sistema será associada ao tempo de permanência do sistema no estado estável. No WNCS apresentado o sinal de chaveamento entre estados é

determinado a partir da probabilidade de *outage* dos enlaces. A partir do *co-design* de controle-comunicação foi possível apresentar uma expressão de forma fechada para a probabilidade máxima de *outage* do sistema de comunicação e a taxa de bits ideal, que são usadas para minimizar o consumo total de energia por bit.

O segundo cenário teve inserida a correlação temporal no canal de transmissão. O intuito da inserção da correlação temporal é verificar como vários eventos consecutivos de *outage* afetam a estabilidade do sistema ao longo do tempo, bem como a quantidade de energia necessária para a transmissão da informação. Sendo assim, o objetivo deste cenário é a minimização do consumo de energia por bit em canais Nakagami- $m$  com correlação temporal. Para esta análise foi considerado somente um enlace sem fio entre o controlador e o atuador. Então, a minimização neste caso nos possibilita a obtenção da potência de transmissão ideal e da *outage* por meio de uma aproximação assintótica da função de densidade de probabilidade conjunta (PDF: do inglês, Probability Density Function) do canal sem fio para os casos com alta relação sinal-ruído (SNR: do inglês, *Signal-to-Noise Ratio*).

Para finalizar, no terceiro cenário apresentamos um sistema de controle e carregamento em rede sem-fio com dois enlaces, o qual denotamos por WPNCS (do inglês Wireless Powered & Networked Control System). No primeiro enlace a fonte de energia sem fio (PB: do inglês, *Power Beacon*) através de radio-frequência (RF: do inglês, *Radio Frequency*) transfere energia para carregar o sensor e o controlador. O segundo enlace utiliza a energia coletada (EH: do inglês, *Energy Harvesting*) para determinar a ação de controle e enviar essa informação ao atuador. Com o objetivo de garantir a estabilidade do sistema neste cenário utilizamos o modelo de controle preditivo empacotado (PPC: do inglês, *Packetized Predictive Control*) que tem como função calcular uma sequência de comandos de controle a partir das medidas do sensor. Tendo como objetivo minimizar a quantidade de energia utilizada pelo PB consideramos duas estratégias de comunicação com relação à informação de estado do canal (CSI: do inglês, *Channel State Information*). A primeira considerando apenas conhecimento médio da CSI, um cenário mais próximo do real em redes sem fio com muitos dispositivos, e o segundo com conhecimento instantâneo da CSI, visando mostrar um limite superior de desempenho.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar um sistema de controle sem fio e propor métodos de otimização, visando menor custo de energia e maior eficiência energética, atendendo os critérios de estabilidade necessários para os WNCSs dentro do contexto URLLC.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar sistemas de WNCS em diferentes contextos;
- Identificar as restrições do ponto de vista de sistemas de controle e de sistema de comunicação presentes em WNCS;
- Discutir e propôr estratégias que atendam as restrições de controle e comunicação em WNCS;
- Modelar matematicamente o WNCS assumindo estabilidade conforme o tempo médio de permanência;
- Modelar matematicamente o WNCS com controle preditivo alimentado por uma fonte de energia de múltiplas antenas;
- Modelar matematicamente o problema de otimização dentro do contexto de WNCS assumindo estabilidade conforme o tempo médio de permanência e definir consumo de energia, a probabilidade de *outage* e taxa de dados;
- Modelar matematicamente o problema de otimização dentro do contexto de WNCS em canais Nakagami- $m$  com correlação temporal e determinar o consumo de energia e a probabilidade de *outage* do sistema;
- Modelar matematicamente o problema de otimização dentro do contexto de WNCS com controle preditivo alimentado por uma fonte de energia de múltiplas antenas, visando inserir o conceito de transferência de energia via rádio frequência ao contexto de WNCS;
- Validar numericamente cada um dos cenários utilizando simulações computacionais.

- Analisar os resultados obtidos em cada um dos cenários por meio das simulações computacionais.

## 1.2 CONTRIBUIÇÕES

Este documento dá ênfase a três trabalhos desenvolvidos:

- SCACIOTA, R.; LÓPEZ, O.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D.; MORITZ, L. G. "Predictive Wireless Powered & Networked Control Systems with Multi Antenna Power Beacon using Full and Average Channel State Information." [em processo de submissão, 2022].
- SCACIOTA, R.; BRANTE, G.; MORITZ, L. G.; SOUZA, R. D. "Minimization of Energy Consumption Per Bit of Wireless Networked Control Systems with Time-Correlated Nakagami- $m$  Fading Channels." *Brazilian Symposium on Communication and Signal Processing (SBrT)*, 2020.
- SCACIOTA, R.; MORITZ, L. G.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D. "Minimization of Energy Consumption Per Bit Using an Average Dwell-Time Approach for Wireless Networked Control Systems." *IEEE Access*, v. 7, p.81839-81848, 2019.

O Capítulo 2 descreve o trabalho desenvolvido em (SCACIOTA *et al.*, 2019), no qual estendemos os conceitos de (SUN; QIN, 2011) para minimizar o consumo de energia de um WNCS. Nosso *co-design* de comunicação/controlado é definido como um problema de otimização, com a função objetivo sendo o consumo total de energia, restrito às condições médias de tempo de permanência que garantem estabilidade. Comparamos o método proposto à abordagem usual na literatura, que consiste em tratar os sistemas de comunicação e controle de forma independente com canais distribuídos de acordo com uma distribuição Rayleigh, fixando a probabilidade de *outage* de acordo com uma restrição de confiabilidade.

Na sequência, o Capítulo 3 trata do trabalho desenvolvido em (SCACIOTA *et al.*, 2020). A correlação temporal é relevante na análise do sistema físico para um cenário URLLC. Com uma correlação profunda no tempo, vários eventos de *outage* podem ocorrer repetidamente, para que o sistema fique instável por um longo período de tempo, dificultando muito a tarefa de controle. Assim, para fornecer um projeto robusto para esses casos, investigamos o consumo de energia quando o canal de comunicação é modelado de acordo com um desvanecimento Nakagami- $m$  correlacionado no tempo.

No Capítulo 4 apresentamos o conceito de um WPNCS no qual o controlador e o sensor da planta são alimentados por um PB dedicado, enquanto satisfaz as restrições de confiabilidade introduzidas pelos enlaces de canal de transferência de energia (WET: do inglês, *Wireless Energy Transfer*) e de transferência de informação (WIT: do inglês, *Wireless Information Transfer*). O controlador usa a energia recebida para enviar, por meio de um enlace sem fio, uma sequência de comandos de controle preditivo para o atuador.

Por fim, para finalizar este documento no Capítulo 5 são apresentados os comentários finais sobre as contribuições dos capítulos anteriores. Neste capítulo também são apresentadas propostas para a continuação deste trabalho.

## 2 MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR BIT USANDO UMA ABORDAGEM DE TEMPO MÉDIO DE PERMANÊNCIA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Na literatura, a interação entre sistemas de controle e redes foi apresentado em (LIU; GOLDSMITH, 2003), mostrando que a escolha dos parâmetros de comunicação pode afetar significativamente o desempenho de WNCSSs. Em particular, a *outage* é mostrada como um dos parâmetros que diminui significativamente o desempenho do controlador. Sendo assim, algumas abordagens são apresentadas em (LIU; GOLDSMITH, 2004a; LIU; GOLDSMITH, 2004b) a fim de melhorar o desempenho e a estabilidade do controlador. As técnicas propostas são projetos envolvendo múltiplas camadas da rede, no sentido de combinar a camada física (PHY: do inglês, *Physical*) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC: do inglês, *Medium Access Control*). Ainda, os autores em (XIAO *et al.*, 2003) têm como foco a alocação de potência de transmissão e largura de banda, modelando o efeito de erros uniformes de quantização nos WNCSSs. A proposta otimiza o desempenho estacionário de um sistema de controle linear, alocando recursos no sistema de comunicação e ajustando os parâmetros do controlador de forma conjunta.

Além disso, vários trabalhos discutem a estabilidade dos WNCSSs, o que é crucial ao lidar com sistemas de controle sujeitos a perdas de pacotes. Por exemplo, os autores em (HEEMELS *et al.*, 2010) usam uma caracterização baseada em Lyapunov para garantir a estabilidade do controle, derivando limites no intervalo máximo entre duas transmissões de estado bem-sucedidas - geralmente denotadas como intervalo máximo permitido de transferência (MATI: do inglês, *Maximum Allowed Transfer Interval*) - e na latência máxima de cada transmissão - denotada por máxima atraso permitido (MAD: do inglês, *Maximum Allowable Delay*). No entanto, como a transmissão sem fio em canais com desvanecimento em bloco gera uma probabilidade de *outage* diferente de zero, as métricas MATI e MAD tornam-se ilimitadas, de modo que se faz necessária uma abordagem estocástica de MATI/MAD como em (PARK *et al.*, 2014; KARAGIANNIS *et al.*, 2011). Essa abordagem requer os parâmetros do WNCSS, a caracterização da duração do MATI/MAD e o uso de diferentes protocolos para solucionar diferentes problemas de estabilidade do sistema, o que não é muito prático nem fácil.

Afastando-se da caracterização de Lyapunov, uma cadeia de Markov foi utilizada em (SEILER; SENGUPTA, 2005) para analisar o efeito da *outage* na estabilidade. De maneira



semelhante, os autores em (TATIKONDA; MITTER, 2004) relacionam a taxa de transmissão mínima permitida visando garantir a estabilidade do sistema de acordo com a velocidade da dinâmica da planta. Ambos os trabalhos trataram do comportamento do sistema e a *outage*, concluindo que é necessário um método computacional para explorar melhor o relacionamento entre estabilidade e *outage*. No entanto, esses estudos pressupõem que a *outage* segue um processo de Bernoulli, que não é o caso mais comum para redes sem fio em que o comportamento da *outage* é altamente correlacionado no tempo e no espaço, não sendo acessível quando o canal é lento, no caso de desvanecimento em bloco.

Em (PARK *et al.*, 2011; WU *et al.*, 2018) os autores apresentam uma otimização multicamada de um WNCS. O conceito de *co-design* é explorado para conceber em conjunto a rede sem fio e o controlador. Nesse caso, o *co-design* é baseado em um problema de otimização restrito, cuja função objetivo é o consumo de energia da rede, enquanto as restrições são a probabilidade de *outage* e o atraso. Um *co-design* envolvendo comunicações e controle também é apresentado em (AYIDH *et al.*, 2019) onde o impacto de várias antenas é investigado. Neste artigo, é considerado um canal com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO: do inglês, *Multiple-Input Multiple-Output*),  $8 \times 8$  e os autores estudam a relação entre a multiplexação e os ganhos de diversidade quando as matrizes de canais não são conhecidas no transmissor, mas apenas no receptor. Portanto, o desempenho obtido pelo projeto MIMO é melhor que o de uma única antena em termos de consumo médio de energia e o custo de controle do sistema.

Contudo, os autores em (PARK *et al.*, 2011; AYIDH *et al.*, 2019) não analisam a estabilidade do sistema no caso de perdas de pacotes. Nesse contexto, em (ROYAN *et al.*, 2019) é proposta uma abordagem de modulação codificada adaptativa para garantir a estabilidade e maximizar a eficiência espectral nos WNCSs. Três esquemas são propostos, com o primeiro maximizando a taxa de transferência com restrições de energia, o segundo minimizando o consumo de energia com restrições de taxa de transferência e o terceiro minimizando o atraso da transmissão com restrições de energia. Seus resultados mostram que cada esquema tem um desempenho melhor, dependendo das condições e restrições do canal.

Outra opção que tem grande aderência à modelagem de WNCSs e avaliação de sua estabilidade é o uso de sistemas chaveados de tempo discreto. A abordagem consiste em definir subsistemas, de modo que um sinal de chaveamento determine qual subsistema está ativo em um determinado período de tempo. No caso de um WNCS com eventos de *outage*, o sinal de chaveamento é uma função da *outage* do enlace. A abordagem relacionada a subsistemas é

investigada por (SUN; QIN, 2011), que utilizou a abordagem de sistemas chaveados por tempo discreto para modelar a estabilidade de um WNCS. Essa abordagem consiste na definição de subsistemas, que podem ser estáveis ou instáveis. Sendo assim, no cenário investigado por (SUN; QIN, 2011) são considerados dois enlaces sem fio, o primeiro entre o sensor e o controlador e o segundo entre o controlador e o atuador. Nesse caso, são possíveis quatro subsistemas: três instáveis (quando um ou ambos os enlaces falham) e apenas um estável (quando os dois enlaces não têm *outage*). Assim, a probabilidade de *outage* determina qual subsistema está ativo a cada instante de tempo. Isso permite que os autores definam condições de estabilidade em função de um tempo médio de permanência, definido como o tempo médio entre as alternâncias dos subsistemas.

## 2.2 MODELO DO SISTEMA

Considera-se o sistema de controle representado na Figura 1, onde existem dois enlaces de comunicação sem fio, entre o sensor e o controlador e entre o controlador e o atuador. Então, no instante de tempo  $k$ , o sensor observa a planta, que é a parte do sistema que será controlada, e gera a matriz de estados, que é a representação de entradas e saídas em formas de matriz, do sistema  $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{R}^{r1}$ , sendo  $r$  o número de variáveis de estado, e recebe no controlador o sinal

$$\mathbf{y}_{sc}(k) = \sqrt{\mathcal{P}_{sc}\kappa_{sc}} h_{sc} \mathbf{x}(k) + \mathbf{n}_{sc}, \quad (1)$$

onde  $\mathcal{P}_{sc}$  é a potência de transmissão normalizada do sensor,  $\kappa_{sc}$  é a perda de percurso na transmissão entre sensor e controlador,  $h_{sc}$  é o desvanecimento quase-estático do canal, cuja envoltória segue uma distribuição Rayleigh, e  $\mathbf{n}_{sc}$  é o ruído aditivo gaussiano branco, que assume média igual a zero e variância  $\frac{N_0}{2}$  por dimensão, sendo  $N_0$  a densidade espectral da potência unilateral do ruído (PSD: do inglês, *Power Spectral Density*) (GOLDSMITH, 2005).

A SNR média no controlador é dada por (GOLDSMITH, 2005)

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

sendo  $G$  o ganho das antenas,  $c$  a velocidade da luz no vácuo,  $f$  a frequência da portadora, a largura de banda do sistema,  $d_{sc}$  distância entre sensor e controlador,  $\alpha$  o coeficiente de perda de

<sup>1</sup> Em um sistema prático, as variáveis de estado passam por codificação de fonte, codificação de canal e modulação, para então serem transmitidas ao canal. Porém, de modo a simplificar a notação, consideramos que  $\mathbf{x}(k)$  representa o vetor de variáveis de estado.



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

$$\mathbf{y}_{ca}(k) = \sqrt{\mathcal{P}_{ca} \kappa_{ca}} h_{ca} \mathbf{v}(k) + \mathbf{n}_{ca}, \quad (6)$$

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

$$\bar{\gamma}_{ca} = \frac{\mathcal{P}_{ca} G \left( \frac{c}{f} \right)^2}{N_0 B (4\pi)^2 d_{ca}^\alpha M}, \quad (7)$$

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

$$O_{ca} = 1 - \exp \left( - \frac{2^{\mathcal{R}_b} - 1}{\bar{\gamma}_{ca}} \right). \quad (8)$$

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

$$T_1 : \quad \mathbf{u}(k) = \mathbf{v}(k), \quad (9)$$

$$T_2 : \quad \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1). \quad (10)$$

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

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \quad (11)$$

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 na Seção 2.3.

### 2.3 ESTABILIDADE DO SISTEMA

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. 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 tese, os sistemas chaveados são um conjunto de matrizes discretas que descrevem o sistema e chaveiam em função do sinal da *outage*.

### 2.3.1 Modelagem do Sistema de Controle

Concatenando primeiro os vetores de estado da planta e do controlador em

$$\mathbf{z}(k) = [\mathbf{x}^T(k), \mathbf{s}^T(k-1), \mathbf{u}^T(k-1)]^T, \quad (12)$$

para que a dinâmica do laço do WNCS possa ser representada por um conjunto de estados

$$S_{\sigma(k)} : \mathbf{z}(k+1) = \Psi_{\sigma(k)} \mathbf{z}(k), \quad (13)$$

onde  $\sigma(k) \in \{1, 2, 3, 4\}$  é o sinal de chaveamento, cujo comportamento depende das falhas do enlace. Como existem dois enlaces sem fio, o sistema pode ser dividido nos quatro subsistemas a seguir

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{BK} & 0 & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & 0 \\ \mathbf{K} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

quando não houver *outage* em nenhum dos enlaces,

$$\Psi_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{BK} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & \mathbf{K} & 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

quando os dois enlaces falham,

$$\Psi_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 & \mathbf{B} \\ \mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

representando uma *outage* no enlace sensor-controlador e

$$\Psi_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 & \mathbf{B} \\ 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

com uma *outage* no enlace controlador-atuador.

Sendo  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  capazes de modelar um sistema controlável, o estado  $S_1$  é estável quando  $\mathbf{K}$  for projetado corretamente. Por outro lado,  $S_{\sigma(k)}$ ,  $\sigma(k) \in \{2,3,4\}$ , são instáveis se a planta do sistema é instável. Além disso, é razoável supor que, se o sistema permanecer por tempo suficiente no estado  $S_1$ , este sistema é considerado estável. Então, as condições para a estabilidade de tais sistemas foram apresentadas em (SUN; QIN, 2011), as quais descrevemos a seguir.

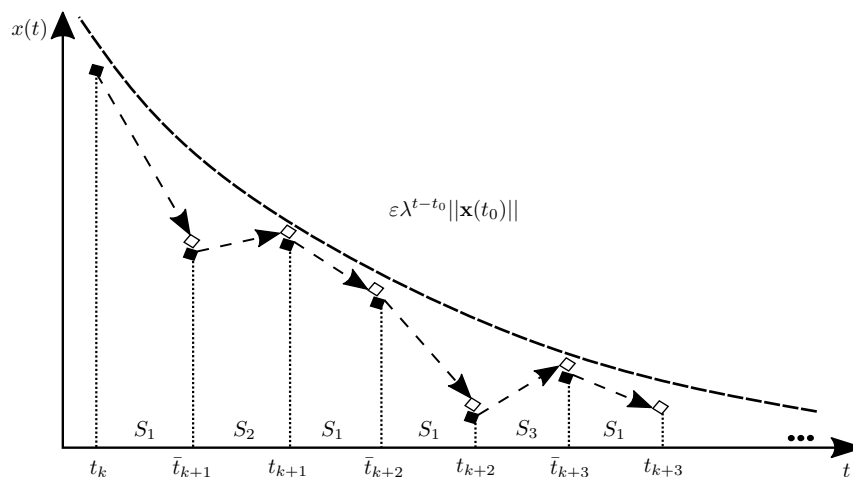
### 2.3.2 Estabilidade Exponencial

De acordo com (KHALIL, 2002), o WNCS sujeito a perdas de pacotes pode ser avaliado através da estabilidade exponencial. Por exemplo, a Figura 2 ilustra um sinal contínuo  $x(t)$  oscilando dependendo do estado atual do sistema (SOUZA *et al.*, 2017). A permanência em estados estáveis,  $S_1$ , faz com que a magnitude das variáveis de estado decaiam com o tempo, enquanto a permanência em estados instáveis ( $S_2$ ,  $S_3$  ou  $S_4$ ) tem o efeito contrário. Assim, se o tempo de alternância entre estados estáveis e instáveis, indicado por tempo de permanência, for lento o suficiente, a estabilidade do sistema poderá ser limitada por uma função exponencial, representada pela linha tracejada na Figura 2. Segundo (SUN; QIN, 2011), o sistema é globalmente exponencialmente estável se

$$\|\mathbf{x}(t)\| \leq \varepsilon \lambda^{t-t_0} \|\mathbf{x}(t_0)\|, \quad (18)$$

sendo  $t_0$  o instante de tempo inicial,  $\varepsilon > 0$  uma constante arbitrária e  $\lambda < 1$  é definida como a taxa de decaimento, que 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.

**Figura 2 – Estabilidade exponencial vinculada a  $x(t)$ .**



**Fonte: Autoria própria.**

Das matrizes do subsistema  $S_{\sigma(k)}$  definidas em (13) é possível obter a taxa de decaimento para o subsistema estável como

$$\lambda_1 = \det \Psi_1, \quad (19)$$

onde  $0 < \lambda_1 < 1$ , bem como a taxa máxima de decaimento para qualquer subsistema instável

$$\lambda_2 = \max_{i \in \{2,3,4\}} (\det \Psi_i), \quad (20)$$

onde  $\lambda_2 > 1$ .

Então, usando (SUN; QIN, 2011, Lemma 1) pode ser mostrado que se  $\Psi_1$  é uma rfmatriz estável de Schur (BHATIA, 1997), matriz quadrada com entradas reais e autovalores de valor absoluto menores que um, e  $\Psi_i, i \in \{2,3,4\}$ , são instáveis,

$$\|\Psi_1^k\| \leq \vartheta_1 \lambda_1^k, \quad (21)$$

$$\|\Psi_i^k\| \leq \vartheta_i \lambda_2^k, \quad i \in \{2, 3, 4\}, \quad (22)$$

onde  $\vartheta_i$  é uma constante escalar arbitrária.

Vale ressaltar que a estabilidade dos sistemas chaveados incluem vários fenômenos interessantes. Por exemplo, mesmo que todos os subsistemas sejam exponencialmente estáveis, o sistema chaveado resultante pode divergir dependendo da natureza dos sinais de chaveamento (LIN; ANTSAKLIS, 2009). A observação oposta também é verdadeira, é possível alternar cuidadosamente entre subsistemas instáveis visando tornar o sistema chaveado exponencialmente estável (LIN; ANTSAKLIS, 2009). Portanto, a estabilidade dos sistemas chaveados depende não apenas da dinâmica de cada subsistema, mas também das propriedades do próprio sinal de chaveamento, as quais abordamos na subseção a seguir usando uma abordagem de tempo médio de permanência.

### 2.3.3 Tempo de Permanência Médio (*Average Dwell-Time*)

Para o WNCS em estudo, o sinal de chaveamento é ditado pela probabilidade de *outage*. Portanto, uma abordagem é necessária para restringir o sinal de chaveamento no domínio do tempo, usando um tempo médio de permanência. Quando o sinal de chaveamento é controlado por tempo, a estabilidade assintótica dos sistemas lineares chaveados é equivalente à estabilidade exponencial (HESPANHA, 2004; KHALIL, 2002). Então, se o tempo médio de permanência for suficientemente grande, o sistema chaveado permanece exponencialmente estável se todos os subsistemas também forem exponencialmente estáveis (HESPANHA; MORSE, 1999). Quando alguns subsistemas são instáveis, como neste cenário, é possível estender os resultados de (HESPANHA; MORSE, 1999) impondo uma segunda condição de muito tempo em subsistemas instáveis.

Sendo  $\mathcal{N}_\sigma[0,k)$  equivalente ao número de comutações de  $\sigma(k)$  no intervalo de tempo  $[0,k)$ , então  $\tau_a > 0$  é definido como tempo de permanência se a seguinte condição for válida:

$$\mathcal{N}_\sigma[0,k) \leq \mathcal{N}_0 + \frac{k}{\tau_a}, \quad (23)$$

onde  $\mathcal{N}_0 \geq 0$  é definido como o limite de interações entre subsistemas (SUN; QIN, 2011). Intuitivamente, o tempo de permanência denota o tempo médio entre chaveamentos entre um dos subsistemas disponíveis. Além disso, o Teorema 1 em (SUN; QIN, 2011) fornece duas condições suficientes para a estabilidade exponencial em função da taxa de decaimento  $\lambda$ . Primeiro, o tempo de permanência do sistema é dado por

$$\tau_a = \frac{\ln h}{\ln \lambda - \ln \lambda^*}, \quad (24)$$

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

$$\inf_{k>0} \frac{B^-(k)}{B^+(k)} \geq \frac{\ln \lambda_2 - \ln \lambda^*}{\ln \lambda^* - \ln \lambda_1}, \quad (25)$$

onde  $B^-(k)$  é o tempo total de permanência do subsistema estável, enquanto  $B^+(k)$  é o tempo total de permanência de subsistemas instáveis, para que  $B^-(k) + B^+(k) = k$ , o que nos permite alcançar estabilidade exponencial mesmo quando alguns subsistemas são instáveis. Além disso, lembremos que o sinal de chaveamento está relacionado à probabilidade de *outage* neste cenário, que será detalhado a seguir.

De acordo com a Figura 1, durante o intervalo de tempo  $[0,k)$  existe um total de  $2k$  transmissões de dados,  $k$  para cada enlace de transmissão. Além disso, tem-se que

$$n_{\sigma(k)} = r_{\sigma(k)}k, \quad (26)$$

que representa o número de pacotes manipulados por cada subsistema  $S_{\sigma(k)}$ , onde  $r_{\sigma(k)}$  é a probabilidade de permanecer no subsistema  $S_{\sigma(k)}$ . Então, a probabilidade de permanência em cada subsistema depende das probabilidades de *outage* dos enlaces sensor-controlador e controlador-atuador, de modo que

$$r_1 = (1 - \mathcal{O}_{sc})(1 - \mathcal{O}_{ca}), \quad (27)$$

$$r_2 = \mathcal{O}_{sc}\mathcal{O}_{ca}, \quad (28)$$

$$r_3 = (1 - \mathcal{O}_{sc})\mathcal{O}_{ca}, \quad (29)$$

$$r_4 = \mathcal{O}_{sc}(1 - \mathcal{O}_{ca}). \quad (30)$$



Em seguida, a taxa de perda de pacotes pode ser calculada com base no número de pacotes perdidos em cada subsistema,

$$r = \frac{2n_2 + n_3 + n_4}{2k} = \frac{2r_2 + r_3 + r_4}{2}. \quad (31)$$

Sabe-se que não há perda de pacote em  $S_1$  e dois pacotes são perdidos em  $S_2$ . Então, aplicando (28)-(30) em (31) é possível obter

$$\begin{aligned} r &= \frac{2(\mathcal{O}_{sc}\mathcal{O}_{ca}) + (1 - \mathcal{O}_{sc})\mathcal{O}_{ca} + \mathcal{O}_{sc}(1 - \mathcal{O}_{ca})}{2} \\ &= \frac{\mathcal{O}_{sc} + \mathcal{O}_{ca}}{2}. \end{aligned} \quad (32)$$

Tendo  $B^-(k) = k - B^+(k)$  e  $\frac{B^+(k)}{k} = r$  (SUN; QIN, 2011), é possível aplicar (32) em (25) obter a primeira condição de estabilidade (tempo médio de permanência em subsistemas instáveis) em função da falta de conexão

$$r = \frac{\mathcal{O}_{sc} + \mathcal{O}_{ca}}{2} \leq \frac{\ln \lambda^* - \ln \lambda_1}{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}. \quad (33)$$

Sem perda de generalidade, neste trabalho assumimos a mesma probabilidade de *outage* para os dois enlaces, que será obtida pela alocação de energia adequada no sensor e no atuador na Seção 2.4. Então, quando

$$\mathcal{O}_{ca} = \mathcal{O}_{sc} = \mathcal{O}, \quad (34)$$

o resultado em (33) pode ser simplificado para

$$\mathcal{O} \leq \frac{\ln \lambda^* - \ln \lambda_1}{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}. \quad (35)$$

Além disso, para satisfazer a condição em (24) o tempo médio de permanência deve ser calculado. Para esse fim, primeiro escrevemos o número máximo de trocas para subsistemas instáveis durante o intervalo  $[0, k)$  como

$$\mathcal{N}_s = 2(n_2 + n_3 + n_4), \quad (36)$$

de modo que o tempo médio de permanência mínimo seja dado por

$$\bar{\tau}_a = \frac{k}{\mathcal{N}_s}. \quad (37)$$

Usando (26), (28)-(30) e (36) em (37) obtemos o tempo médio de permanência mínimo em função da probabilidade de *outage*

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_a &= \frac{1}{2(\mathcal{O}_{sc} + \mathcal{O}_{ca} - \mathcal{O}_{sc}\mathcal{O}_{ca})} \\ &= \frac{1}{2(2\mathcal{O} - \mathcal{O}^2)}. \end{aligned} \quad (38)$$

## 2.4 CO-DESIGN DE CONTROLE-COMUNICAÇÃO

Nesta seção, o objetivo é minimizar o consumo de energia por bit transmitido ( $E_b$ ) do WNCS proposto, restrito à estabilidade exponencial global do sistema. A energia consumida por bit em cada enlace sem fio<sup>2</sup>  $ij \in \{sc, ca\}$  pode ser escrito como

$$E_{ij} = \frac{P_{ij}\eta^{-1} + P_{TX} + P_{RX}}{\mathcal{R}_{ij}}, \quad (39)$$

onde  $\eta$  é a eficiência do amplificador de potência,  $P_{ij}$  é a potência de transmissão,  $\mathcal{R}_{ij}$  é a taxa de transmissão,  $P_{TX}$  é o consumo de potência dos circuitos de radiofrequência (RF) no transmissor e  $P_{RX}$  é o equivalente no receptor.

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

$$E_b = E_{sc} + E_{ca}. \quad (40)$$

Portanto, visando minimizar  $E_b$  foi alocada a potência de transmissão do sensor e do controlador, adaptando conjuntamente a taxa de transmissão, com a otimização restringida às condições de estabilidade definidas por (35) e (38). O problema de otimização proposto é escrito como

$$\min_{\mathcal{P}_{sc}, \mathcal{P}_{ca}, \mathcal{R}_{sc}, \mathcal{R}_{ca}} E_b = E_{sc} + E_{ca} \quad (41a)$$

$$\text{s.t.} \quad \bar{\tau}_a \geq \tau_a, \quad (41b)$$

$$\mathcal{O} \leq \frac{\ln \lambda^* - \ln \lambda_1}{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}, \quad (41c)$$

$$0 \leq \mathcal{P}_{ij} \leq P_{\max}, \quad (41d)$$

onde  $P_{\max}$  é a restrição máxima da potência de transmissão. Sabendo que, se o tempo médio de permanência for suficientemente grande, é possível afirmar que o sistema chaveado permanece estável somente se todos os subsistemas também forem estáveis (HESPANHA; MORSE, 1999). Como esse não é o caso em nosso cenário de otimização, a condição em (41c) garante que o sistema chaveado não gaste muito tempo nos subsistemas instáveis.

Primeiro, aplica-se (24) e (38) na restrição (41b) para obter a probabilidade máxima de *outage* permitida que garanta o tempo médio máximo de permanência, de modo que

$$\frac{\ln h}{\ln \lambda - \ln \lambda^*} \geq \frac{1}{2(2\mathcal{O} - \mathcal{O}^2)}, \quad (42)$$

<sup>2</sup> A unidade de  $E_{ij}$  é Joule/bit.

onde  $\lambda^*$  também é uma função de  $\mathcal{O}$  devido a (41c). Então, como a probabilidade de *outage* é uma função monotônica com ambos  $\mathcal{P}_{ij}$  e  $\mathcal{R}_{ij}$ , é possível resolver (42) e (41c) como igualdades, a fim de encontrar a probabilidade máxima de *outage* permitida para minimizar o consumo de energia. Assim, após algumas manipulações algébricas, obtemos

$$2\mathcal{O} - \mathcal{O}^2 = \frac{\ln \lambda - \ln \left[ \lambda_1 \exp \left( \mathcal{O} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \right]}{2 \ln h}, \quad (43)$$

que tem duas raízes em relação a  $\mathcal{O}$ , mas apenas uma das raízes resulta em  $\mathcal{O} \leq 1$ . Portanto, a probabilidade máxima de *outage* permitida  $O^*$  que minimiza a energia consumida por bit pode ser escrita em forma fechada como

$$O^* = 1 - \frac{\ln \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)}{4 \ln h} - \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{\ln \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)}{\ln h} - 4 \right)^2 - \frac{8 \ln \frac{\lambda}{\lambda_1}}{\ln h}}. \quad (44)$$

Combinando (44) com (3) temos a potência de transmissão ideal para cada enlace,  $P_{ij}^*$ , em função da taxa de bits e das características do sistema de controle, para que

$$P_{ij}^* = \frac{1 - 2^{-\frac{\mathcal{R}_{ij}}{B}}}{\mathcal{Q} d_{ij}^{-\alpha} \ln(1 - O^*)}, \quad (45)$$

onde

$$\mathcal{Q} = \frac{Gc^2}{(4\pi f)^2 N_0 B M}. \quad (46)$$

Então, para encontrar a taxa de dados ideal, tomamos a derivada de  $E_{ij}$  em relação a  $\mathcal{R}_{ij}$  e igualamos a zero. Observe que essa abordagem é ótima, pois a minimização de  $E_b = E_{sc} + E_{ca}$  é equivalente a minimizar  $E_{sc}$  e  $E_{ca}$  individualmente. Assim, resolver  $\frac{\partial E_{ij}}{\partial \mathcal{R}_{ij}} = 0$  produz

$$\mathcal{R}_{ij}^* = \frac{B}{\ln 2} \left\{ 1 + \mathcal{W} \left( -\frac{1}{e} \left[ 1 + \frac{\mathcal{Q} P_{RF} \ln(1 - O^*)}{d_{ij}^\alpha} \right] \right) \right\}, \quad (47)$$

onde  $P_{RF} = \eta(P_{TX} + P_{RX})$ ,  $e \approx 2,718$  é o número de Euler e  $\mathcal{W}(\cdot)$  é a função Lambert- $W$  (CORLESS *et al.*, 1996).

Em resumo, para resolver o problema de minimização em (41a) determina-se primeiro  $O^*$  usando (44), o qual depende de  $\lambda$ , escolhido durante o projeto do controlador, e também depende de  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , e  $\vartheta$ , dada pela dinâmica específica do sistema de controle. Então, empregamos (47) para encontrar a taxa de bits ideal, uma vez  $\mathcal{R}_{ij}^*$  é uma função apenas de  $O^*$ . Finalmente, determinamos  $P_{ij}^*$  usando (45), que é uma função tanto de  $\mathcal{R}_{ij}^*$  quanto  $O^*$ .

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

Parâmetro	Valor
Frequência de portadora	$f = 2,5 \text{ GHz}$
Ganho das antenas	$G = 5 \text{ dB}$
PSD do ruído	$N_0 = -204 \text{ dBm/Hz}$
Largura de banda	$B = 10 \text{ kHz}$
Margem de enlace	$M = 20 \text{ dB}$
Coefficiente de perda de percurso	$\alpha = 4$
Eficiência do amplificador de potência	$\eta = 0,35$
Consumo de potência do circuito no TX	$P_{\text{TX}} = 97,9 \text{ mW}$
Consumo de potência do circuito no RX	$P_{\text{RX}} = 112 \text{ mW}$

**Fonte: Autoria própria.**

## 2.5 RESULTADOS NUMÉRICOS

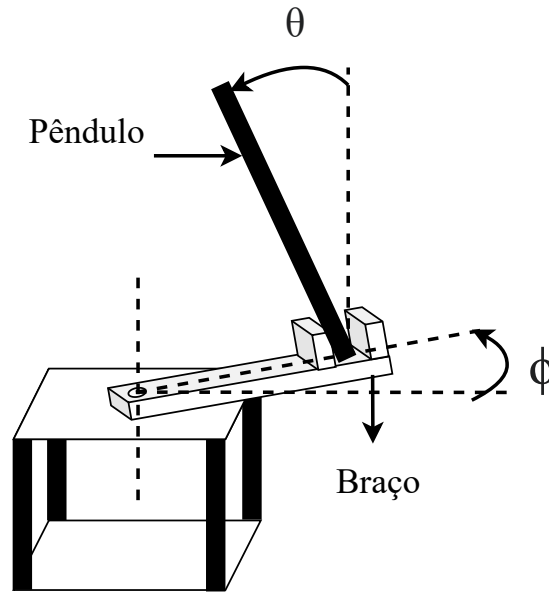
Nesta seção, apresentamos alguns resultados numéricos para validar nossa análise teórica. Salvo indicação em contrário, empregamos o mesmo sistema contínuo sem perturbação apresentada em (HATTORI *et al.*, ), que se refere a uma estrutura de um pêndulo invertido rotacional, cujos parâmetros físicos são definidos em (REALTEC, 2011). Neste sistema, é necessário estabilizar o ângulo do braço,  $\phi$ , tendo em vista a estabilidade do ângulo do pêndulo,  $\theta$ , conforme ilustrado na Figura 3. A ideia é capturar as interdependências entre a dinâmica de ambos os sistemas, para que um *co-design* de controle e de comunicação se torne importante para reduzir o consumo de energia, ao mesmo tempo em que a estabilidade é garantida. Além disso, o sistema foi simulado para  $10^5$  períodos de amostragem e os parâmetros usados para modelar o sistema de comunicação estão na Tabela 1<sup>3</sup>, seguindo o mesmo usado em (CUI *et al.*, 2005).

Observemos que, embora uma faixa de frequência não licenciada tenha sido usada em nossos resultados numéricos, nossa análise pode ser aplicada a outra faixa de frequência. Além disso, para lidar com possíveis fontes de interferência é possível utilizar métodos de contenção na camada MAC ou bandas licenciadas exclusivas com níveis de interferência controlados.

O pêndulo pode ser descrito pelas seguintes matrizes contínuas de espaço de esta-

<sup>3</sup> Baseado em (CUI *et al.*, 2005).

Figura 3 – Estrutura rotacional de um pêndulo invertido, onde  $\phi$  é o ângulo do braço e  $\theta$  é ângulo de pêndulo.



Fonte: Autoria própria.

dos (HATTORI *et al.*, )

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 111,18 & 0 & 0 & -1,4938 \\ -6,5400 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -8,6596 \\ 0,0001 \end{bmatrix}. \quad (48)$$

Então, assumindo um tempo de amostragem de  $T = 0,25$  s, a discretização de (48) resulta em

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 99,2 & 0 & 9,4 & -1,3 \\ -5,7 & 1 & -0,5 & 0,6 \\ 1049,8 & 0 & 99,2 & -14 \\ -61,2 & 0 & -5,7 & 1,8 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -7,5850 \\ 0,3799 \\ -81,1010 \\ 4,4826 \end{bmatrix}, \quad (49)$$

que é um sistema controlável instável (HATTORI *et al.*, ). Neste trabalho, um regulador linear-quadrático (LQR: do inglês, *Linear-Quadratic Regulator*) é usado para direcionar o sistema para a região de estabilidade (OGATA, 1995). Sendo assim, a matriz de ganho do controlador será obtida utilizando  $N = 0$ , que representa o peso das medidas de desempenho causadas pelo vetor

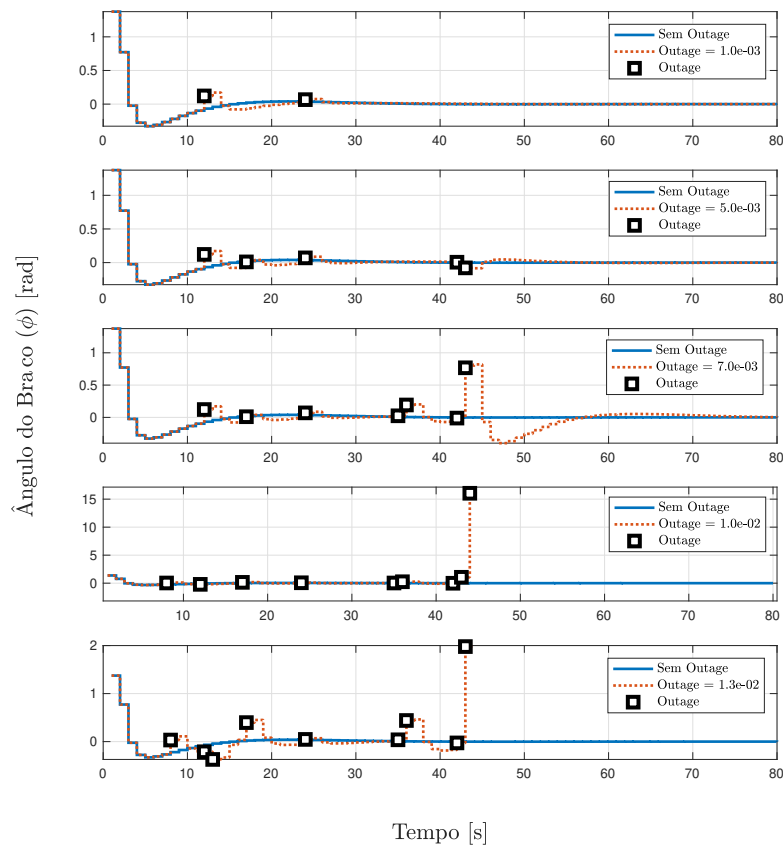
de estado,  $R = 10$  como matriz de peso do controlador e a matriz de ponderação

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (50)$$

respectivamente. Em seguida, resolvendo a equação de Riccati em tempo discreto (OGATA, 1995) com esses parâmetros, temos

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -13,0494 & 0,0093 & -1,2316 & 0,1900 \end{bmatrix}. \quad (51)$$

**Figura 4 – Resposta ao degrau do ângulo do braço do pêndulo sujeito a diferentes valores de probabilidade de *outage*. O controlador tenta mover o braço de  $\phi = \frac{17\pi}{36}$  rad para  $\phi = 0$  rad, enquanto o braço do pêndulo não pode exceder um ângulo máximo de  $|\phi| \leq \frac{\pi}{2}$ .**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4 mostra a resposta ao degrau para o braço angular quando o controlador tenta mover o braço de  $\phi = \frac{17\pi}{36}$  rad para  $\phi = 0$  rad, sujeito a diferentes valores de probabilidade de *outage*. Além disso, o braço do pêndulo não pode exceder um ângulo máximo de  $|\phi| \leq \frac{\pi}{2}$  neste

exemplo em particular. Se a ação de controle mover o ângulo do braço para mais de  $\frac{\pi}{2}$  rad, o pêndulo cairá. Os quadrados pretos presentes na Figura 4 representam o momento onde houve *outage* em pelo menos um dos enlaces. Por exemplo, na terceira sub-figura ocorreram 7 *outages* no período em que o braço está estabilizando. A linha tracejada representa a posição do ângulo do braço a partir das ações determinadas pelo controlador em cada período de tempo. Como observamos nas sub-figuras superiores da Figura 4, com um pequeno número de eventos de *outage*, o controlador ainda é capaz de estabilizar o pêndulo. No entanto, quando a probabilidade de *outage* aumenta, as oscilações do controlador também aumentam até um ponto em que o sistema se torna instável. Neste exemplo, a probabilidade máxima de *outage* permitida obtida de (44) é  $O^* = 7 \cdot 10^{-3}$ , ilustrado pela terceira sub-figura.

A Figura 5 mostra a relação entre energia consumida por bit ( $E_b$ ) e a taxa de decaimento ( $\lambda$ ) para diferentes distâncias entre o controlador e o atuador, assumindo  $d_{sc} = d_{ca} = d$ . Além disso, o sensor e o controlador usam a potência de transmissão ideal e a taxa de bits ideal fornecida respectivamente por (45) e (47). Os resultados teóricos (linhas azuis) são comparados com as simulações de Monte Carlo (marcadores) empregando uma busca exaustiva em  $\mathcal{P}_{ij}$  e  $\mathcal{R}_{ij}$  a fim de resolver (41a), mostrando a efetividade da análise teórica proposta.

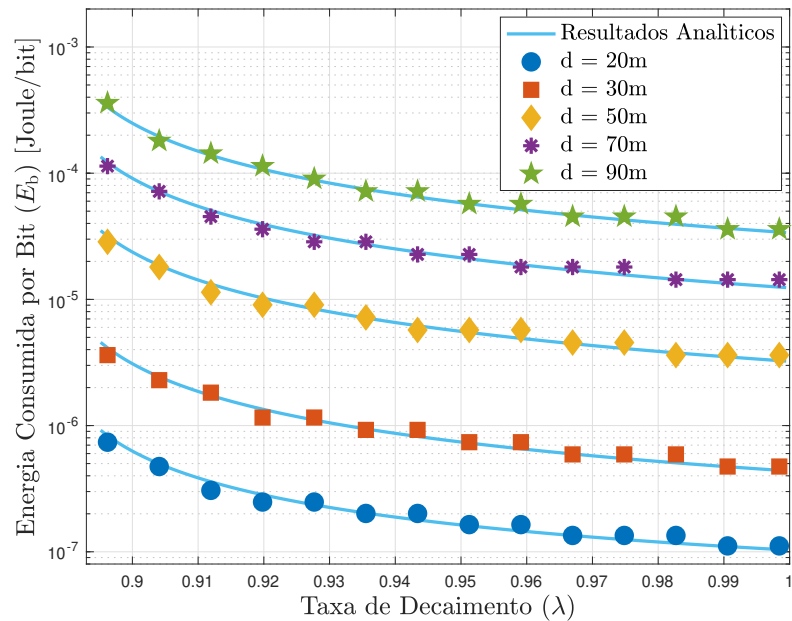
Além disso, como podemos observar, o consumo de energia diminui com  $\lambda$ , o que ocorre porque menor  $\lambda$  implica em uma maior estabilidade ligada ao sistema. Em outras palavras, o sistema se torna mais sensível a eventos de *outage* ao permanecer nos estados instáveis. Como consequência,  $O^*$  deve ser diminuído para evitar instabilidade, o que implica em alta potência de transmissão, aumentando  $E_b$ . Além disso, a Figura 5 indica que uma taxa de decaimento o mais próximo possível da unidade deve ser usada para minimizar o consumo de energia.

Assim, empregamos  $\lambda \rightarrow 1$  nas simulações. No entanto, vamos observar que  $\lambda$  pode depender da dinâmica do sistema de controle e do projeto proposto do controlador, uma vez que é uma função dos autovalores de  $\mathbf{A} + \mathbf{BK}$ .

Para entender melhor a contribuição da potência de transmissão e a eficiência espectral na minimização do consumo de energia, a Figura 6 apresenta  $E_b$  como uma função de  $\mathcal{R}_b$  para diferentes distâncias de transmissão, assumindo que a potência de transmissão seja otimizada de acordo com (45). Como observamos, o impacto de  $\mathcal{R}_b$  no consumo de energia é significativo, o  $\mathcal{R}_b$  ideal que minimiza a energia consumida depende da distância do enlace.

A Tabela 2 complementa a análise, mostrando a eficiência espectral ideal,  $\mathcal{R}_b^* = \frac{\mathcal{R}_{ij}^*}{B}$ , e a potência de transmissão ideal,  $P_{ij}^*$ , em função da distância do enlace. Como observamos, os

**Figura 5 – Energia consumida por bit em função da taxa de decaimento para diferentes distâncias entre o transmissor e o receptor, assumindo  $d_{sc} = d_{ca} = d$ .**



**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 2 – Potência de transmissão ideal e eficiência espectral em função da distância do enlace.**

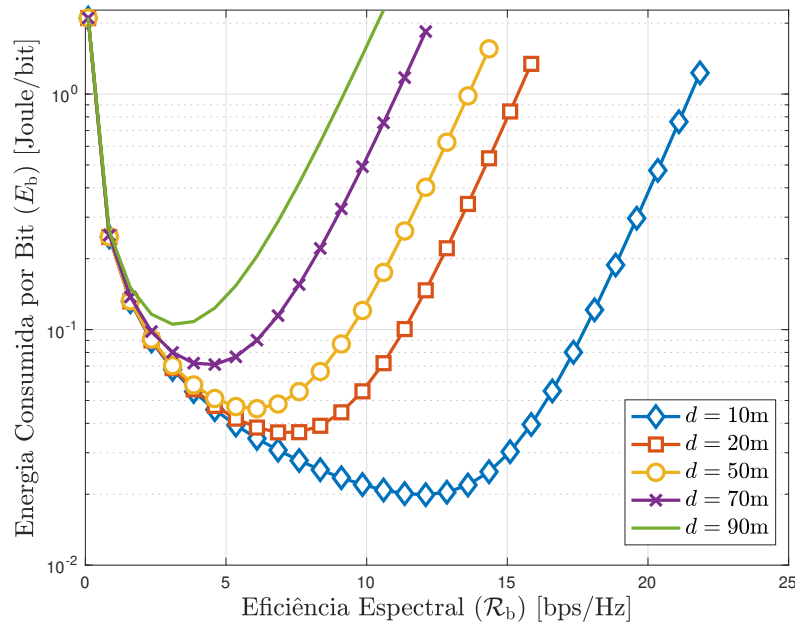
Distância ( $d$ ) [m]	$P_{ij}^*$ [dBm]	$\mathcal{R}_b^*$ [bps/Hz]
10	11,24	9,45
20	13,45	6,20
30	15,08	4,45
40	16,52	3,35
50	17,92	2,65
60	19,29	2,15
70	20,34	1,75
80	21,07	1,40
90	22,10	1,20
100	22,80	1,00

**Fonte: Autoria própria.**

valores ótimos para a eficiência espectral são altos para intervalos de comunicação muito curtos. Ainda, a Figura 6 indica que o consumo de energia é uma função convexa da eficiência espectral. Assim, o consumo de energia aumenta quando nos afastamos da eficiência espectral ideal, que serve como orientação prática para o projeto do sistema, dependendo das opções disponíveis para taxas de modulação e código. Além disso, também é interessante notar que, a potência de transmissão ideal aumenta abruptamente em relação à distância do enlace, e a eficiência espectral ideal diminui abruptamente quando a distância aumenta.



**Figura 6 – Energia consumida por bit em função da eficiência espectral ( $\mathcal{R}_b$ ), para diferentes  $d$ .**

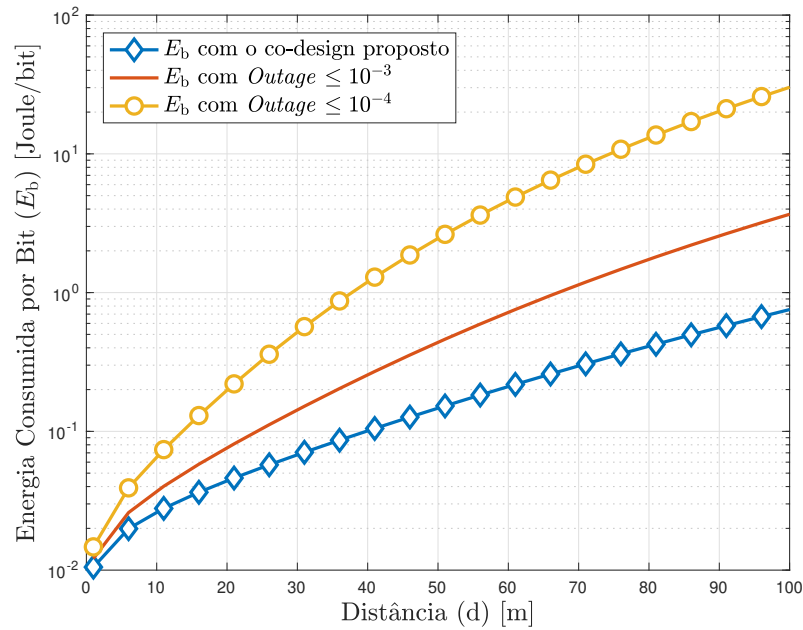


**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 7 compara a abordagem de *co-design* proposta, otimizando a potência de transmissão e a eficiência espectral usando  $O^*$  para garantir estabilidade de acordo com o tempo médio de permanência, com a abordagem usual da literatura, de minimizar o consumo de energia considerando uma meta de QoS, expresso em termos de uma probabilidade máxima de *outage*, não necessariamente ligada ao sistema de controle. Três casos são comparados na Figura 7: o *co-design* proposto e dois limites de QoS definidos para  $O \leq 10^{-3}$  e  $O \leq 10^{-4}$ . Como podemos observar na figura, a abordagem proposta consome significativamente menos energia, garantindo ainda a estabilidade do sistema de controle, com a diferença em termos de  $E_b$  aumentando com a distância de transmissão. Por exemplo, à distância de  $d = 70$  m, o método proposto consome 75% menos energia se comparado com  $O \leq 10^{-3}$ , e 96% menos do que  $O \leq 10^{-4}$ .

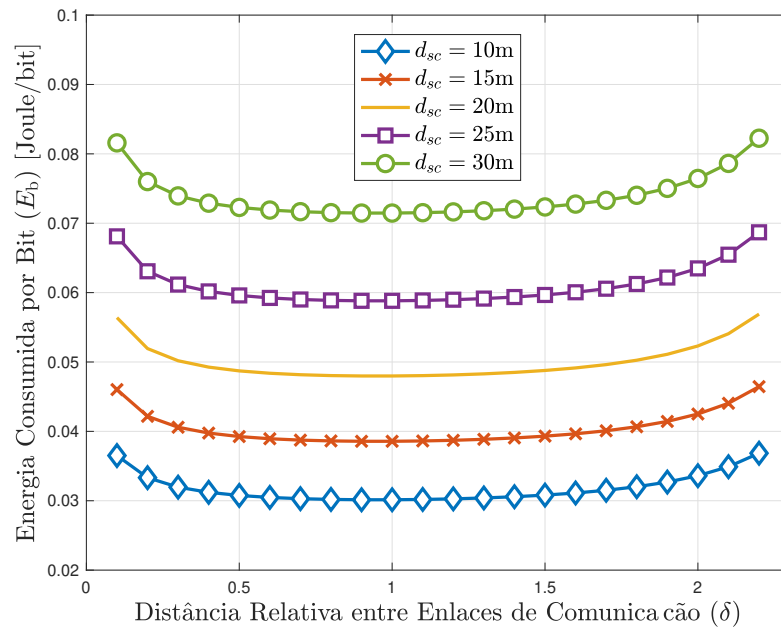
Finalmente, a Figura 8 ilustra o caso em que o sensor e o atuador não estão na mesma posição, assumindo que  $d_{ca} = \delta d_{sc}$ , com  $\delta \in [0.1, 2.2]$ . É apresentado  $E_b$  como função de  $\delta$ , então  $\mathcal{P}_{ca}^*$  e  $\mathcal{P}_{sc}^*$  são definidos de acordo com (45) para obter a probabilidade de *outage* alvo  $O^*$  em cada enlace, sendo  $\mathcal{R}_{sc}^*$  e  $\mathcal{R}_{ca}^*$  otimizados com (47) para minimizar o consumo de energia. Como podemos observar,  $d_{ca} = d_{sc}$  é o cenário que gera o menor consumo de energia, enquanto  $E_b$  apenas aumenta ligeiramente quando  $\delta \neq 1$ .

**Figura 7 – Energia consumida por bit em função da distância entre o receptor e o transmissor.**



**Fonte: Autoria própria.**

**Figura 8 – Energia consumida por bit em função da constante que multiplica a distância entre o receptor do controlador e o transmissor.**



**Fonte: Autoria própria.**

## 2.6 COMENTÁRIOS FINAIS

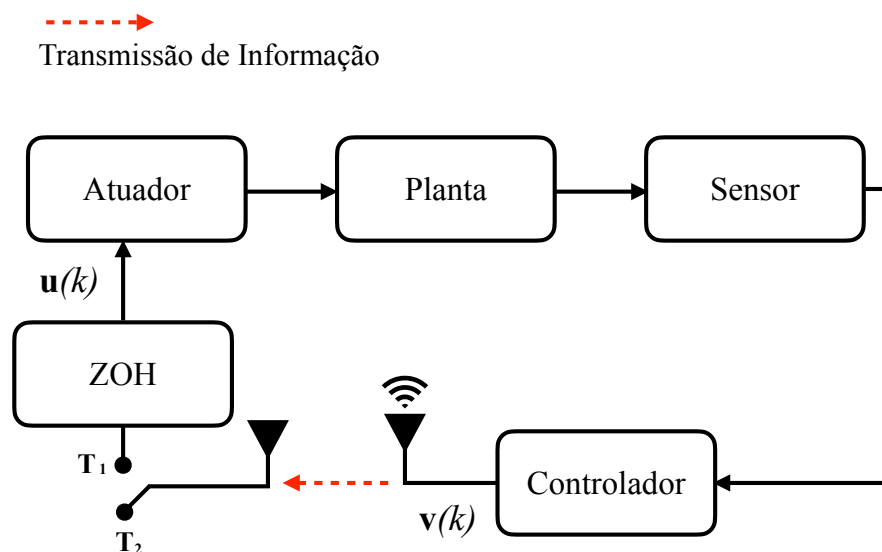
Os resultados de (SCACIOTA *et al.*, 2019) mostram que a abordagem de *co-design* consome significativamente menos energia do que o design independente, no qual simplificamos os requisitos de controle em um limite de QoS, para que o consumo de energia seja minimizado em relação a esse limite. Por exemplo, até 75% menos energia é consumida com a abordagem de *co-design* em comparação com o design independente, com um limite de 99,9% de confiabilidade na distância de transmissão de 70 m. Além disso, também mostramos que os parâmetros ideais dependem intimamente do projeto do controlador. Por exemplo, a taxa de decaimento obtida pelo controlador implica em diferentes limites de probabilidade de *outage*, afetando o consumo de energia. Nos casos em que é necessária uma convergência mais rápida, a quantidade de energia necessária aumenta exponencialmente, o que destaca a importância do *co-design*, a fim de encontrar soluções para alcançar o objetivo dos WNCSs.

### 3 MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA POR BIT EM CANAIS NAKAGAMI- *m* COM CORRELAÇÃO TEMPORAL

Em nenhum momento no Capítulo 2 foi levado em consideração a correlação temporal no canal de transmissão, que pode impactar consideravelmente o projeto do WNCS. A correlação temporal é relevante na análise do sistema físico para um cenário URLLC. Nesse caso as transmissões são de curta duração, com intervalos também curtos entre transmissões. Com correlação no tempo, vários eventos de *outage* podem ocorrer repetidamente, tornando o sistema instável por um longo período de tempo. Sendo assim, neste capítulo temos como foco a análise de eventos de *outage* consecutivos. Além disso, visando simplificar o sistema estudado neste capítulo será considerado apenas um enlace sem fio, como feito em outros trabalhos (TONG *et al.*, 2018).

Sendo assim, considera-se o sistema de controle descrito na Figura 9, onde existe um enlace de comunicação sem fio entre o controlador e o atuador enquanto a conexão entre o sensor e o controlador é feita por um enlace com fio. Além disso, embora um único par sensor-atuador seja considerado na análise, nossa estrutura pode ser estendida para mais de dois enlace sem fio, por exemplo, o caso de um controlador remoto operando com múltiplos sensores ou múltiplos atuadores.

**Figura 9 – Arquitetura geral de um sistema de controle distribuído em uma rede de comunicação sem fio com um enlace de comunicação sem fio entre o controlador e o atuador.**



Fonte: Autoria própria.

A cada período de tempo o controlador observa o estado do sistema e transmite um sinal

ao atuador que é descrito como (6). A SNR média no controlador é dada por (7) (GOLDSMITH, 2005). Além disso, A SNR instantânea é dada por

$$\gamma_{ca}(k) = \bar{\gamma}_{ca} h_{ca}^2(k). \quad (52)$$

Entretanto, diferente do Capítulo 2,  $h_{ca}$  assume canais modelados de acordo com uma distribuição Nakagami- $m$  com transmissões correlacionadas. No caso de uma *outage*, o ZOH é responsável por manter o valor recebido anteriormente, uma vez que o sistema não usa nenhuma previsão para as ações do atuador. Então,  $\mathbf{u}$  é o sinal de entrada do atuador e depende da *outage* entre o controlador e o atuador. Portanto, a saída do ZOH sem erros de transmissão é  $\mathbf{u}(k) = \mathbf{v}(k)$ , enquanto a entrada do atuador no caso de um evento de *outage* é  $\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1)$ .

### 3.1 PROBABILIDADE DE OUTAGE

Agora investigamos a probabilidade de *outage* consecutiva assumindo correlação de tempo. Vamos considerar o caso de  $L$  eventos de *outage* consecutivas, que podem ocorrer dependendo da dinâmica do sistema e da correlação de tempo do canal sem fio, e com os quais o WNCS terá que lidar. Denotamos as envoltórias do canal pelo conjunto  $|\mathbf{h}_L| = \{|h_{ca}(1)|, \dots, |h_{ca}(L)|\}$ . Então, utilizando a mesma abordagem de (SHI *et al.*,), a distribuição conjunta de  $|\mathbf{h}_L|$  pode ser escrita como uma distribuição Nakagami- $m$  multi-variável com correlação exponencial, cuja PDF é dada por (SHI *et al.*,)

$$f_{|\mathbf{h}_L|}(z_1, \dots, z_L) = \int_{t=0}^{\infty} \frac{t^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-t} \prod_{l=1}^L \frac{2z_l^{2m-1}}{\Gamma(m) \left( \frac{\Omega_l(1-\rho^{2(l+\delta-1)})}{m} \right)} \exp\left( \frac{-mz_l^2}{\Omega_l(1-\rho^{2(l+\delta-1)})} \right) \times \exp\left( \frac{-\rho^{2(l+\delta-1)}t}{1-\rho^{2(l+\delta-1)}} \right) {}_0F_1\left( ; m; \frac{mz_l^2 \rho^{2(l+\delta-1)}t}{\Omega_l(1-\rho^{2(l+\delta-1)})^2} \right) dt, \quad (53)$$

onde  $\Gamma(\cdot)$  é a função gama completa (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1964, Eq. 6.1.1),  ${}_0F_1(\cdot; \cdot; \cdot)$  é a função limite hipergeométrica confluyente (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2007, Eq. 9.14.1),  $m$  denota a ordem de desvanecimento Nakagami- $m$ ,  $\rho$  é a correlação do tempo,  $\delta$  é o atraso de *feedback* do canal e  $\Omega_l = \mathbb{E}\{|h_{ca}(l)|^2\}$ .

Denotando as informações mútuas para cada transmissão consecutiva  $k$ ,  $1 \leq k \leq L$ , como

$$I_{ca}(k) = B \log_2(1 + \gamma_{ca}(k)), \quad (54)$$

a probabilidade de *outage* de  $L$  transmissões consecutivas é

$$\mathcal{O}_L = \Pr\{I_{ca}(1) < \mathcal{R}, \dots, I_{ca}(L) < \mathcal{R}\}. \quad (55)$$

Segundo (SHI *et al.*, ), é possível reescrever (55) em termos da função de distribuição cumulativa conjunta (CDF: do inglês, *Cumulative Distribution Function*) das variáveis aleatórias independentes de  $L$  Nakagami- $m$ ,  $F_{|\mathbf{h}_L|}(\cdot)$ , então

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_L &= \Pr(I_{ca}(1) < \mathcal{R}, \dots, I_{ca}(L) < \mathcal{R}) \\ &= F_{|\mathbf{h}_L|}(\varpi, \dots, \varpi), \end{aligned} \quad (56)$$

onde  $\mathcal{R} = \frac{\mathcal{R}_b}{B}$  e  $\varpi = \sqrt{\frac{2^{\mathcal{R}_b} - 1}{\bar{\gamma}_{ca}}}$ . Simplificando a notação uma vez que  $\bar{\gamma}_{ca}$  é o mesmo, independentemente da realização do canal,

$$\begin{aligned} F_{|\mathbf{h}_L|}(\varpi, \dots, \varpi) &= \sum_{n_1, \dots, n_L=0}^{\infty} \frac{\Gamma\left(m + \sum_{l=1}^L n_l\right)}{\Gamma(m) \left(1 + \sum_{l=1}^L \omega_l\right)^m} \prod_{l=1}^L \frac{1}{n_l!} \left(\frac{\omega_l}{1 + \sum_{l=1}^L \omega_l}\right)^{n_l} \\ &\times \prod_{l=1}^L \frac{\Upsilon\left(m + n_l, \frac{m\varpi}{\Omega_l(1 - \rho^{2(l+\delta-1)})}\right)}{\Gamma(m + n_l)}, \end{aligned} \quad (57)$$

no qual

$$\omega_l = \frac{\rho^{2(l+\delta-1)}}{1 - \rho^{2(l+\delta-1)}} \quad (58)$$

sendo  $\Upsilon(\cdot, \cdot)$  a função Gamma incompleta inferior (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1964, Eq. 6.1.1).

No entanto, a probabilidade de *outage* em (57) é difícil de manipular, devido às várias operações de produto e soma. Em vez disso, é possível usar uma SNR alta, o que é uma suposição comum nos sistemas URLLC devido à alta confiabilidade requerida. Sob o regime de alta SNR, é possível obter uma aproximação assintótica para a probabilidade de *outage* como (SHI *et al.*, )

$$\tilde{\mathcal{O}}_L = \frac{m^{mL} (2^{\mathcal{R}_b} - 1)^{mL} \vartheta(L, \rho)}{[\Gamma(m + 1)]^L \prod_{l=1}^L \Omega_l^m P_l^m} \quad (59)$$

sendo

$$\vartheta(L, \rho) = [\Theta \Lambda]^{-m}, \quad (60)$$

onde

$$\Theta = 1 + \sum_{l=1}^L \frac{\rho^{2(l+\delta-1)}}{1 - \rho^{2(l+\delta-1)}}, \quad (61)$$

$$\Lambda = \prod_{l=1}^L 1 - \rho^{2(l+\delta-1)}. \quad (62)$$

### 3.2 PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Nesta seção, nosso objetivo é minimizar o consumo de energia por bit transmitido ( $E_b$ ) do WNCS proposto com canais Nakagami- $m$  com correlação temporal. A energia consumida

por bit pode ser escrita como

$$E_{ca} = \frac{\mathcal{P}_{ca}\eta^{-1} + P_{TX} + P_{RX}}{\mathcal{R}}. \quad (63)$$

Portanto, com o objetivo de minimizar  $E_b$ , alocamos a potência de transmissão do controlador. O problema de otimização proposto é escrito como

$$\min_{\mathcal{P}_{ca}} E_{ca} \quad (64a)$$

$$\tilde{\mathcal{O}}_L \leq \mathcal{P}_o, \quad (64b)$$

$$0 \leq \mathcal{P}_{ca} \leq P_{\max}, \quad (64c)$$

onde  $P_{\max}$  é uma restrição máxima de potência de transmissão e  $\mathcal{P}_o$  o limite de probabilidade de *outage*.

A fim de resolver (64a), primeiro é preciso relaxar a condição em (64c). Além disso, sabe-se por meio de (SHI *et al.*, ) que a potência de transmissão aumenta quando  $\tilde{\mathcal{O}}_L$  diminui, de modo que, para minimizar a potência de transmissão, devemos permanecer com  $\tilde{\mathcal{O}}_L = \mathcal{P}_o$ . Então, realizando as devidas manipulações algébricas a potência de transmissão ideal sob o regime de alta SNR pode ser escrita como

$$\hat{P}_{ca} = \frac{m(2^{\mathcal{R}_b} - 1)(N_0B)}{(\Theta\Lambda)^{-L}\mathcal{P}_o[\Gamma(m+1)]^{-m}}. \quad (65)$$

Em resumo, para obter a potência de transmissão para o problema de minimização em (64a) primeiro é determinado  $\tilde{\mathcal{O}}_L$  usando (59), que depende do CDF conjunta das realizações de desvanecimento Nakagami- $m$  correlacionadas no tempo. Então, é determinado  $\hat{P}_{ca}$  usando (65) e, finalmente, reintroduzimos a restrição em (64c) fazendo

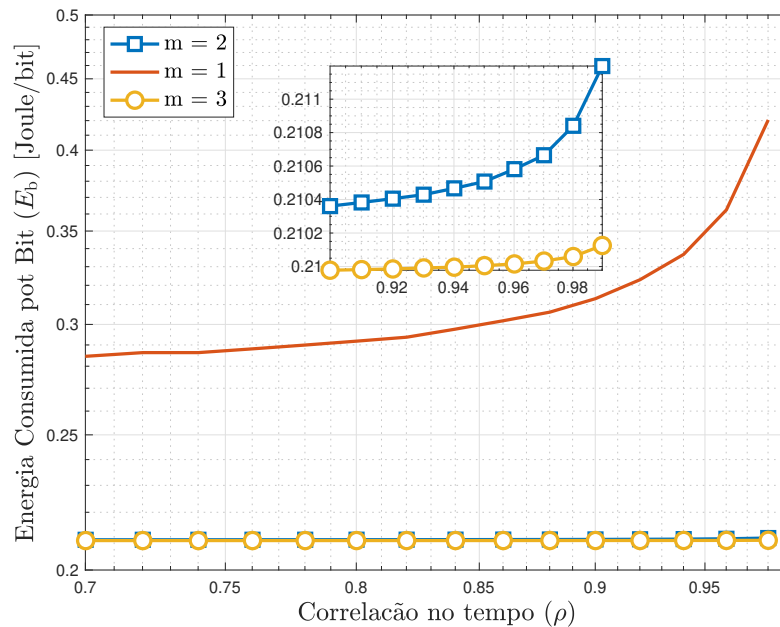
$$P_{ca}^* = \max \{0, \min\{\hat{P}_{ca}, P_{\max}\}\}. \quad (66)$$

### 3.3 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados alguns resultados numéricos para ilustrar nossa análise teórica. Os parâmetros usados para modelar o sistema de comunicação são os mesmos do Capítulo 2 e estão resumidos na Tabela 1, segundo (CUI *et al.*, 2005). A confiabilidade do sistema está vinculada aos requisitos de URLLC em (ERICSSON, 2018), assume-se então  $\mathcal{P}_o = 10^{-5}$  para o WNCS em estudo.

A Figura 10 mostra a relação entre a energia consumida por bit ( $E_b$ ) e a correlação de tempo ( $\rho$ ) para diferentes parâmetros Nakagami- $m$ . A potência de transmissão foi otimizada,

**Figura 10 – Energia consumida por bit em função da correlação de tempo para diferentes ordens de desvanecimento.**



**Fonte: Autoria própria.**

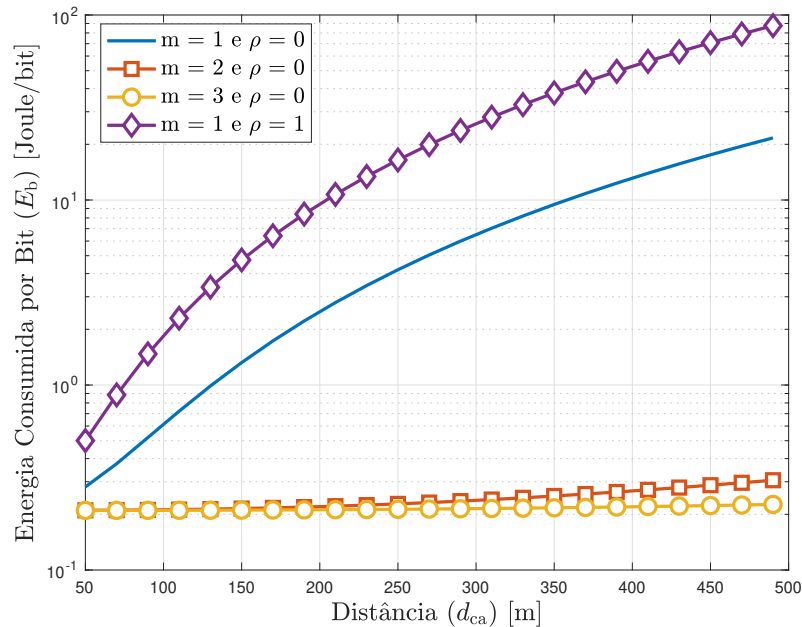
assumindo  $d_{ca} = 50\text{m}$  e duas transmissões consecutivas com desvanecimento,  $L = 2$ . Além disso, o sensor e o controlador usam a potência de transmissão ideal calculada por (66). Então, como podemos observar, o consumo de energia aumenta com  $\rho$ , o que ocorre uma vez que  $\rho$  implica em um consumo de energia exponencialmente maior. Além disso, a Figura 10 mostra que a energia mínima consumida por bit diminui com o aumento de  $m$ . Como esperado, quanto maior o  $m$  maior é a ordem de diversidade, reduzindo assim a energia consumida por bit.

A Figura 11 representa a energia consumida por bit em função de diferentes distâncias entre o controlador e o atuador. Além disso, também consideramos duas transmissões consecutivas com o mesmo coeficiente de desvanecimento,  $L = 2$ . Como podemos observar na figura, a presença de correlação no tempo afeta a quantidade de energia consumida por bit. Além disso, nesta figura, temos três cenários sem correlação temporal ( $\rho = 0$ ) e um cenário com correlação de tempo completo ( $\rho = 1$ ), a partir do qual percebemos que o sistema requer 4 vezes mais energia em comparação com o caso com  $\rho = 0$  quando a distância do enlace é  $d_{ca} = 500\text{m}$ .

Por fim, a Tabela 3 compara a relação entre o consumo de energia por bit e o número de eventos de *outage* consecutivos ( $L$ ) para diferentes distâncias nos enlaces sem fio. Para a simulação, usamos  $m = 1$  e  $\rho = 1$ . Como é possível notar na Tabela 3 para uma transmissão com desvanecimento,  $L = 1$  comunicando em  $d_{ca} = 400\text{m}$  requer 75% mais energia se comparada



**Figura 11 – Energia consumida por bit em função da distância entre o receptor e o transceptor para diferentes ordens de desvanecimento e correlação de tempo.**



**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 3 – Energia consumida por bit em função do número de *outage* consecutivas para diferentes distâncias no enlace sem fio.**

Distância [m]	Eventos de <i>outage</i> consecutivos ( $L$ )		
	1	2	3
50	$210,8 \cdot 10^{-3}$	$500,6 \cdot 10^{-3}$	92,13
100	$215,1 \cdot 10^{-3}$	1,854	$0,52 \cdot 10^3$
200	$239,3 \cdot 10^{-3}$	9,512	$2,942 \cdot 10^3$
300	$291 \cdot 10^{-3}$	$0,025 \cdot 10^3$	$8,106 \cdot 10^3$
400	$376,3 \cdot 10^{-3}$	$0,052 \cdot 10^3$	$16,64 \cdot 10^3$
500	$500,6 \cdot 10^{-3}$	$0,092 \cdot 10^3$	$29,07 \cdot 10^3$

**Fonte: Autoria própria.**

com o caso onde  $d_{ca} = 100\text{m}$ . Além disso, à distância de  $d_{ca} = 50\text{m}$ , considerando quatro transmissões consecutivas com desvanecimento,  $L = 4$ , requer  $145 \cdot 10^3$  vezes mais energia que o cenário com  $L = 1$ . Esse aumento no consumo de energia é de até  $18 \cdot 10^6$  vezes quando a distância do enlace é  $d_{ca} = 500\text{m}$ . Entretanto, é possível afirmar que ao levarmos esses dados para a realidade a modelagem proposta será válida somente onde quando a potência de transmissão for  $\mathcal{P}_{ca} < 1\text{ W}$ . Isso se dá por algumas restrições presentes em sistemas de radiofrequência sem fio como potência irradiada e arquitetura do circuito de amplificação de potência.

### 3.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Os resultados apresentados em (SCACIOTA *et al.*, 2020) mostram que os parâmetros ideais dependem da distância entre o transmissor e o receptor, bem como do tempo correlação. Além disso, os resultados numéricos mostram que o consumo de energia em sistemas com correlação de tempo integral é 4 vezes maior quando comparado ao caso de um sistema sem correlação temporal. Também é possível observar que há um aumento exponencial da energia consumida com o aumento do número de *outage* consecutivas.

## 4 CONTROLE PREDITIVO ALIMENTADO POR UMA FONTE DE ENERGIA DE MÚLTIPLAS ANTENAS

### 4.1 INTRODUÇÃO

Na literatura, com o objetivo de melhorar a robustez do controlador frente a perda de pacotes, os autores em (TONG *et al.*, 2018) empregam um esquema preditivo de controle de pacotes, para que o controlador defina uma sequência de comandos de controle com antecedência. Em seguida, é proposto um método de *co-design* de comunicação/controlador com o objetivo de otimizar o comprimento da previsão do controlador. Além disso, a capacidade de comprimento de bloco finito é empregada por (TONG *et al.*, 2018), já que os pacotes de comunicação para WNCSs podem ser mais curtos do que nos cenários de comunicação usuais, devido às restrições típicas de atraso (DURISI *et al.*, 2016b). Além disso, em (CHANG *et al.*, 2020) os autores visam reduzir o consumo de energia de comunicação usando uma alocação dinâmica de qualidade de serviço (QoS: do inglês, *Quality of Service*). Ao detalhar o processo de controle da planta em estudo, os autores mostram quando a alta QoS é crítica para o desempenho do controle e quando a QoS pode ser relaxada para um nível mais baixo. Em seguida, um algoritmo de alocação dinâmica é fornecido visando a redução do consumo de energia.

Comum a (TONG *et al.*, 2018; ZHAO *et al.*, 2019; AYIDH *et al.*, 2019; CHANG *et al.*, 2020) é o esforço para economizar energia dos dispositivos pertencentes ao WNCS. Mesmo assim, como aponta (WOLFF, 2021), a evolução da fabricação industrial que emprega sensores operados por bateria hoje pode se tornar um problema de manutenção no futuro. Isso é motivado pela necessidade de substituir constantemente as baterias em milhares de dispositivos. Por outro lado, a transferência de energia sem fio (WET) é uma opção adequada para dispositivos de baixa potência, como sensores industriais. Sistemas com WET permitem carregar baterias sem conexões físicas, usando sinais de RF (LÓPEZ *et al.*, 2021b; CLERCKX *et al.*, 2022). No entanto, apenas alguns WNCSs habilitados para WET, que denotamos por sistema de controle e carregamento em rede sem fio (WPNCs: do inglês, *Wireless Powered & Networked Control System*), aparecem na literatura.

Alguns exemplos de WPNCs podem ser encontrados em (KARADAG *et al.*, 2021; CALVO-FULLANA *et al.*, 2020). Os autores em (KARADAG *et al.*, 2021) introduzem a coleta de energia (EH: do inglês, *Energy Harvesting*) via RF em um WNCS. Vários sensores e

controladores são implantados, de modo que o objetivo é fornecer controle de energia, coleta de energia e programação de transmissão. Nele, um algoritmo heurístico de tempo polinomial é desenvolvido para agendar a transmissão dos nós sensores, garantindo os requisitos de coleta de energia. Além disso, em (CALVO-FULLANA *et al.*, 2020) os autores consideram um cenário com múltiplas plantas, onde os sensores são alimentados por EH e comunicam suas medições aos seus respectivos controladores através de um canal sem fio compartilhado. Eles propõem um mecanismo de comunicação de acesso aleatório que garante o desempenho do controle, ao mesmo tempo em que lida com a restrição de EH. Entretanto, (KARADAG *et al.*, 2021; CALVO-FULLANA *et al.*, 2020) têm um forte foco nos requisitos do controlador, sem levar em consideração como a confiabilidade do sistema é afetada pela interação entre os enlace WET e de transferência de informações sem fio (WIT).

## 4.2 MODELO DO SISTEMA

Considera-se um sistema de controle e carregamento em rede sem-fio (WPNCs) apresentado na Figura 12 composto de:

- um enlace sem fio para carregar o controlador e o sensor usando um equipamento fonte de energia;
- um controlador recebendo informações de um sensor acoplado, estabelecido como um bloco único; e
- um enlace sem fio entre o controlador e o atuador.

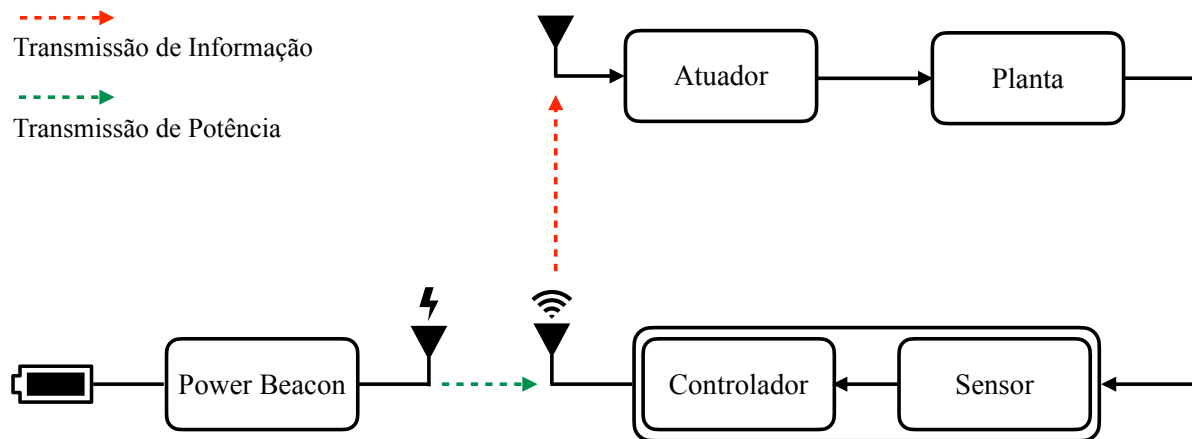
Os dois enlaces sem fio operam no modo de coleta (*Harvesting*) e transmissão (*Transmission*). Assim, inicia-se primeiro a etapa WET, na qual um PB transfere energia utilizando RF para carregar o sensor e o controlador próximos. Então, na etapa WIT o controlador envia comandos de controle ao atuador. Dada uma restrição de latência, o tempo total de transmissão é dividido em duas partes,

$$T = T_{\text{wet}} + T_{\text{wit}}, \quad (67)$$

onde  $T_{\text{wet}}$  é o tempo utilizado na etapa WET e  $T_{\text{wit}}$  é o tempo utilizado na etapa WIT. Além disso, também assumimos que o controlador utiliza toda a energia recebida durante a etapa WET para a transmissão de dados na etapa WIT. Apenas a potência necessária para a transmissão de dados será considerada nesta análise, tendo em vista que esta geralmente é muito maior do que a

potência exigida pelos circuitos de RF do controlador e do sensor. Além disso, consideramos que toda a potência coletada pelo módulo controlador/sensor é suficiente para que o transmissor possa efetuar o envio da informação ao atuador e o conhecimento do CSI instantâneo ou médio no PB, conforme será detalhado na Seção 4.3.

**Figura 12 – Arquitetura geral de um sistema de controle distribuído em uma rede de comunicação sem fio com um enlace de comunicação sem fio entre o controlador e o atuador.**



Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.1 Modelo de Controle Preditivo Empacotado

No modelo PPC, o controlador estima o estado da planta a partir das medidas do sensor e calcula uma sequência de comandos de controle  $K$  a serem enviados ao atuador, onde  $k = 0$  indica os comandos de controle para o intervalo de tempo atual  $i$ , enquanto  $k > 0$  indica os comandos de controle dos intervalos de tempo futuros. O número total de bits por pacote é (TONG *et al.*, 2018)

$$N = H + KS, \quad (68)$$

onde  $H$  é o número de bits no cabeçalho da mensagem e  $S$  é o número de bits enviados.

O atuador possui um *buffer* como medida de segurança contra *outage* de transmissão de pacotes, de modo que o sistema pode tolerar até  $K - 1$  perdas de pacotes sequenciais antes de esgotar os comandos de controle para executar no próximo intervalo de tempo. Tal evento é denominado *outage* de controle, cuja probabilidade  $p_c$  depende da probabilidade de erro do pacote  $p_e$ , que por sua vez depende da qualidade do enlace WIT e da energia fornecida pelo enlace WET. Então, para atingir uma certa probabilidade de *outage* de controle, devemos garantir

que (TONG *et al.*, 2018)

$$p_e \leq p_c^{\frac{1}{K}}. \quad (69)$$

## 4.2.2 Modelo do Canal

### 4.2.2.1 Enlace WET

Assume-se que o controlador contém uma única antena, enquanto o PB está equipado com um arranjo linear uniforme (ULA: do inglês, *Uniform Linear Array*) de  $M_{\text{PB}}$  antenas. Além disso, o canal entre o PB e o controlador está sujeito a um desvanecimento Rice quase estático. Assim, o vetor do canal do enlace WET é (GOLDSMITH, 2005)

$$\mathbf{h} = \sqrt{\beta_{\text{wet}}} (\bar{\mathbf{h}} + \tilde{\mathbf{h}}) \in \mathbb{C}^{M_{\text{PB}} \times 1}, \quad (70)$$

onde  $\bar{\mathbf{h}}$  é o componente determinístico da linha de visada (LOS: do inglês, *Line of Sight*), e é o componente de dispersão de média zero (aleatório) com covariância  $\mathbf{R} = \mathbb{E} [\tilde{\mathbf{h}}\tilde{\mathbf{h}}^H]$ . Então, tem-se que (LÓPEZ *et al.*, 2021c)

$$\bar{\mathbf{h}} = \sqrt{\frac{\chi_{\text{wet}}}{1 + \chi_{\text{wet}}}} [1, e^{i\psi_1}, \dots, e^{i\psi_{M_{\text{PB}}-1}}]^T, \quad (71)$$

$$\tilde{\mathbf{h}} \sim \sqrt{\frac{1}{1 + \chi_{\text{wet}}}} \mathcal{CN}(0, \mathbf{R}), \quad (72)$$

sendo  $\psi_t, t \in \{1, \dots, M_{\text{PB}} - 1\}$ , o deslocamento médio de fase do  $(t + 1)$ -ésimo elemento de matriz em relação à primeira antena e  $\chi_{\text{wet}}$  é o fator LOS do canal WET. Assumindo elementos de antena de meio comprimento de onda igualmente espaçados, segue-se que  $\psi_t = -t\pi \sin v$ , sendo  $v \in [0, 2\pi]$  é o ângulo de azimute em relação ao do conjunto de antenas transmissoras.

Além disso, é o ganho de potência médio no enlace WET pode ser apresentado como

$$\beta_{\text{wet}} = \frac{c^2}{(16\pi^2 f^2 d_{\text{wet}}^{\alpha_{\text{wet}}})}, \quad (73)$$

onde  $d_{\text{wet}}$  é a distância entre o controlador e o PB, e  $\alpha_{\text{wet}}$  é o expoente de perda de percurso no enlace WET.

### 4.2.2.2 Enlace WIT

O controlador estabelece WIT para um atuador de antena única através de um canal quase estático sujeito a desvanecimento Rice com fator LOS,  $\chi_{\text{wit}}$ . Então, tem-se que (GOLDS-

MITH, 2005)

$$z = \sqrt{\beta_{\text{wit}}} (\bar{z} + \tilde{z}) \in \mathbb{C}, \quad (74)$$

sendo  $\bar{z}$  o componente LOS determinístico do enlace WIT e  $\tilde{z}$  é o componente de dispersão do enlace WIT de média zero, tal que

$$\bar{z} = \sqrt{\frac{\chi_{\text{wit}}}{1 + \chi_{\text{wit}}}} e^{j\nu}, \quad (75)$$

$$\tilde{z} \sim \sqrt{\frac{1}{1 + \chi_{\text{wit}}}} \mathcal{CN}(0,1), \quad (76)$$

com o ganho de potência médio dada por,

$$\beta_{\text{wit}} = \frac{c^2}{N_f N_0 B 16 \pi^2 f^2 d_{\text{wit}}^{\alpha_{\text{wit}}}} \quad (77)$$

sendo  $d_{\text{wit}}$  a distância entre o controlador e o atuador,  $N_f$  a figura do ruído e  $\alpha_{\text{wit}}$  o expoente de perda de percurso. A CDF de  $|z|^2$  é (ZHU *et al.*, 2008)

$$F_{|z|^2}(x) = 1 - Q_1 \left( \sqrt{2\chi_{\text{wit}}}, \sqrt{2(1 + \chi_{\text{wit}})x} \right). \quad (78)$$

### 4.3 ESTATÍSTICAS DE ENERGIA INCIDENTE

Nesta seção será caracterizada estatisticamente a potência incidente de RF no controlador durante a etapa WET. Assumindo duas estratégias em relação à disponibilidade do CSI:

1. F-CSI: do inglês, *Full-CSI*, onde o CSI instantâneo do enlace entre controlador e o PB está disponível no PB, que serve como referência de desempenho; e
2. A-CSI: do inglês, *Average-CSI*, que não requer *feedback* ao PB para estimar o CSI instantâneo e, portanto, é uma abordagem mais prática que requer apenas informações estatísticas.

Então, de uma forma geral, assumindo um pré-codificador  $\mathbf{w}_i$ ,  $i \in \{\text{F-CSI}, \text{A-CSI}\}$ , a potência de RF coletada pelo controlador é dada por

$$\mathcal{P}_i = |\mathbf{w}_i^H \mathbf{h}|^2, \quad (79)$$

com F-CSI e A-CSI detalhados a seguir.

### 4.3.1 CSI Instantâneo

Sabendo que a utilização de um sistema com F-CSI é ideal para um único usuário, foi adotada a pré-codificação de transmissão de máxima taxa (MRT: do inglês, *Maximum Ratio Transmission*), dada por (LÓPEZ *et al.*, 2021a)

$$\mathbf{w}_{\text{F-CSI}} = \frac{\sqrt{P_b} \mathbf{h}}{\|\mathbf{h}\|}, \quad (80)$$

sendo  $P_b$  a potência de transmissão do PB. Então, após a substituição (80) em (79), é obtido

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\text{F-CSI}} &= \left| \sqrt{P_b} \frac{\mathbf{h}^H}{\|\mathbf{h}\|} \mathbf{h} \right|^2 \\ &= \beta_{\text{wet}} P_b \|\mathbf{h}\|^2. \end{aligned} \quad (81)$$

Tendo  $\mathbf{h}$  conhecido e  $P_b$  otimizado para minimizar o consumo de energia enquanto atende às restrições de desempenho, conforme detalhado na Seção 4.5,  $\mathcal{P}_{\text{F-CSI}}$  é determinístico.

### 4.3.2 CSI Médio

Fazendo  $\mathbb{E}[\mathbf{h}] = \bar{\mathbf{h}} \sqrt{\beta_{\text{wet}}}$ , assim, o pré-codificador MRT com A-CSI pode ser projetado como (LÓPEZ *et al.*, 2021a)

$$\mathbf{w}_{\text{A-CSI}} = \frac{\sqrt{P_b} \bar{\mathbf{h}}}{\|\bar{\mathbf{h}}\|}. \quad (82)$$

Portanto, substituindo (82) em (79) resulta em

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\text{A-CSI}} &= \left| \sqrt{P_b} \frac{\bar{\mathbf{h}}^H}{\|\bar{\mathbf{h}}\|} \mathbf{h} \right|^2 \\ &= \beta_{\text{wet}} P_b \left| \|\bar{\mathbf{h}}\| + \frac{\bar{\mathbf{h}}^H \tilde{\mathbf{h}}}{\|\bar{\mathbf{h}}\|} \right|^2 \\ &= \beta_{\text{wet}} P_b |\zeta|^2. \end{aligned} \quad (83)$$

Fazendo,  $\bar{\mathbf{h}}^H \tilde{\mathbf{h}} \sim \mathcal{CN}\left(0, \bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{R} \bar{\mathbf{h}}\right)$ , portanto,

$$\zeta = \|\bar{\mathbf{h}}\| + \frac{\bar{\mathbf{h}}^H \tilde{\mathbf{h}}}{\|\bar{\mathbf{h}}\|} \sim \mathcal{CN}\left(\|\bar{\mathbf{h}}\|, \frac{\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{R} \bar{\mathbf{h}}}{\|\bar{\mathbf{h}}\|^2}\right). \quad (84)$$

Sendo assim, é possível decompor  $\zeta$  como

$$\zeta = \frac{\sqrt{\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{R} \bar{\mathbf{h}}}}{\sqrt{2} \|\bar{\mathbf{h}}\|} (\zeta_{\text{R}} + j\zeta_{\text{I}}), \quad (85)$$



onde  $\zeta_R \sim \mathcal{N}\left(\frac{\sqrt{2}\|\bar{\mathbf{h}}\|^2}{\sqrt{\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{R} \bar{\mathbf{h}}}, 1}\right)$  e  $\zeta_I \sim \mathcal{N}(0,1)$ . Como consequência,

$$\frac{2\|\bar{\mathbf{h}}\|^2}{\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{R} \bar{\mathbf{h}}} |\zeta|^2 = \zeta_R^2 + \zeta_I^2, \quad (86)$$

seguindo uma distribuição qui-quadrado não-central com  $k = 2$  graus de liberdade, e um parâmetro não-centralizado  $\nu = \frac{2\|\bar{\mathbf{h}}\|^4}{\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{R} \bar{\mathbf{h}}}$ .

Diante do exposto, a CDF de  $\mathcal{P}_{\text{A-CSI}}$  é

$$F_{\mathcal{P}_{\text{A-CSI}}}(x) = 1 - Q_1(a, b\sqrt{x}), \quad (87)$$

onde  $a = \sqrt{\frac{2}{\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{R} \bar{\mathbf{h}}}} \|\bar{\mathbf{h}}\|^2$ ,  $b = \sqrt{\frac{2}{P_b \beta_{\text{wet}} \bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{R} \bar{\mathbf{h}}}} \|\bar{\mathbf{h}}\|$ , com  $Q_1(\cdot, \cdot)$  sendo a função de primeira ordem Marcum  $Q$ . Além disso, é possível obter a PDF da potência de RF incidente no controlador de (87), como

$$f_{\mathcal{P}_{\text{A-CSI}}}(x) = \frac{1}{2} e^{-\frac{(a^2+x b^2)}{2}} b^2 I_0(a b \sqrt{x}), \quad (88)$$

onde  $I_0(\cdot)$  é a função de Bessel de primeira ordem. Portanto, diferente para o caso com F-CSI,  $\mathcal{P}_{\text{A-CSI}}$  é uma variável aleatória.

## 4.4 ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE CONFIABILIDADE

### 4.4.1 Probabilidade de *Outage*

A confiabilidade do sistema é afetada por ambos os enlaces. Um canal WET ruim diminuirá a disponibilidade de energia no controlador, impactando a SNR recebida no atuador na etapa WIT. Enquanto isso, um canal WIT ruim afetará diretamente a comunicação entre o controlador e o atuador. A probabilidade de interrupção do sistema pode ser escrita como

$$\mathcal{O}_i = \Pr(\gamma_i < \gamma_0), \quad (89)$$

onde  $i \in \{\text{F-CSI}, \text{A-CSI}\}$ ,  $\gamma_0 = 2^{R_b} - 1$  é a SNR limite para decodificação correta,  $R_b = \frac{N}{BT_{\text{wit}}}$  é a taxa de transmissão, e a SNR instantânea no atuador, dado por (GOLDSMITH, 2005)

$$\gamma_i = \frac{P_t \beta_{\text{wit}}}{N_f N_0 B} |z|^2, \quad (90)$$

Adicionalmente, a potência de transmissão do controlador é dada por

$$P_t = \frac{E_i}{T_{\text{wit}}} \quad (91)$$

onde  $E_i$  é a energia instantânea coletada do RF durante a etapa WET, que depende de  $i \in \{\text{F-CSI}, \text{A-CSI}\}$ , dada por

$$E_i = T_{\text{wet}} \mathcal{G}(\mathcal{P}_i) \quad (92)$$

enquanto  $\mathcal{G}(\cdot)$  é o modelo não-linear da energia coletada. Lembrando que  $P_t$  depende do pré-codificador empregado na etapa WET, mas descartamos o índice  $i$  para aliviar a notação.

#### 4.4.1.1 CSI Instantâneo

Combinando (89)-(92) obtêm-se

$$\mathcal{O}_{\text{F-CSI}} = \Pr \left( |z|^2 < \frac{(2^{R_b} - 1)T_{\text{wit}}}{T_{\text{wet}} \mathcal{G}(\mathcal{P}_{\text{F-CSI}}) \beta_{\text{wit}}} \middle| \mathcal{P}_{\text{F-CSI}} \right), \quad (93)$$

que pode ser solucionado utilizando (78), então

$$\mathcal{O}_{\text{F-CSI}} = 1 - Q_1 \left( \sqrt{2\chi_{\text{wit}}}, \sqrt{\frac{(2^{R_b} - 1)T_{\text{wit}}}{T_{\text{wet}} \mathcal{G}(\mathcal{P}_{\text{F-CSI}}) \beta_{\text{wit}}}} \right). \quad (94)$$

#### 4.4.1.2 CSI Médio

Quando somente a CSI média é acessível,  $\mathcal{P}_{\text{A-CSI}}$  é uma variável aleatória e podemos explorar a caracterização estatística da etapa WET apresentada na Seção 4.3 para escrever a probabilidade de *outage* do sistema. A probabilidade de *outage* pode ser obtida como a média da potência de RF incidente sobre a CDF da SNR instantânea, de modo que

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{\text{A-CSI}} &= \mathbb{E}_{\mathcal{P}_{\text{A-CSI}}} \left[ F_{|z|^2} \left( \frac{(2^{R_b} - 1)T_{\text{wit}}}{T_{\text{wet}} \mathcal{G}(\mathcal{P}_{\text{A-CSI}}) \beta_{\text{wit}}} \right) \right] \\ &= \int_0^\infty F_{|z|^2} \left( \frac{(2^{R_b} - 1)T_{\text{wit}}}{T_{\text{wet}} \mathcal{G}(x) \beta_{\text{wit}}} \right) f_{\mathcal{P}_{\text{A-CSI}}}(x) dx. \end{aligned} \quad (95)$$

#### 4.4.2 Problema de Otimização

O objetivo é minimizar a quantidade de energia utilizada pelo PB, otimizando a potência de transmissão do PB e a alocação de tempo entre WET e WIT. O problema de otimização pode ser formulado por

$$\min_{P_b, T_{\text{wet}}} \quad \mathcal{E} = T_{\text{wet}} P_b \quad (96a)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathcal{O}_i \leq p_c^{\frac{1}{K}}, \quad (96b)$$

$$T = T_{\text{wet}} + T_{\text{wit}}, \quad (96c)$$

onde a restrição (96b) define a probabilidade de *outage* limite (para F-CSI e A-CSI) com base no modelo PPC, enquanto (96c) implica que  $T_{\text{wet}}$  é o tempo de carregamento otimizado e o tempo de transmissão de dados é definido como  $T_{\text{wit}} = T - T_{\text{wet}}$ . Devido às expressões envolvidas, neste trabalho foi avaliado numericamente o problema de otimização acima utilizando o método de busca exaustiva.

Além disso, assumimos canais com desvanecimento Rice,  $\mathbf{R} = \mathbf{I}$  (LÓPEZ *et al.*, 2021c), que usado em (71) gera

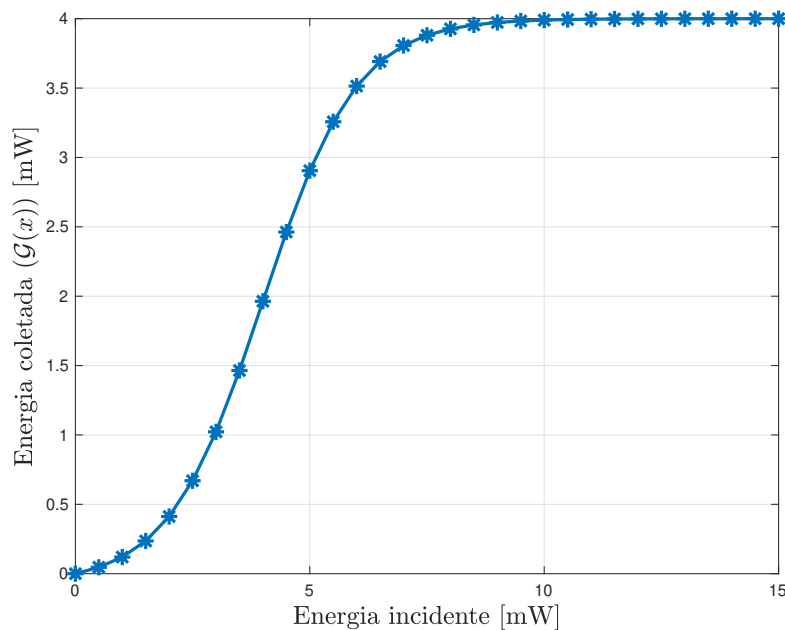
$$\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{R} \bar{\mathbf{h}} = \frac{M_{\text{PB}} \chi_{\text{wet}}}{(1 + \chi_{\text{wet}})^2}. \quad (97)$$

onde  $M_{\text{PB}}$  é o número de antenas no PB. Então, em (87)  $a = \sqrt{2 \chi_{\text{wet}} M_{\text{PB}}}$  e  $b = \sqrt{\frac{2(1 + \chi_{\text{wet}})}{P_b \beta_{\text{wet}}}}$ . Além disso, adotamos a função EH não linear dada por (BOSHKOVSKA *et al.*, 2015)

$$\mathcal{G}(x) = \frac{\mathcal{Y}(1 - e^{-c_0 x})}{1 + e^{-c_0(x - c_1)}}, \quad (98)$$

onde  $\mathcal{Y}$  é o nível de saturação, e  $c_0$  e  $c_1$  são constantes <sup>1</sup>. A Figura 13 apresenta o gráfico da função não-linear de energia coletada dada pela equação (98). Observa-se que há um ponto onde a função satura, ou seja, a partir de um certo valor de energia incidente a energia coletada sempre resultará em uma constante. No caso desta função, a saturação ocorre quando  $\mathcal{G}(x) = \mathcal{Y}$ .

**Figura 13 – Função não-linear da energia coletada.**



**Fonte: Autoria própria.**

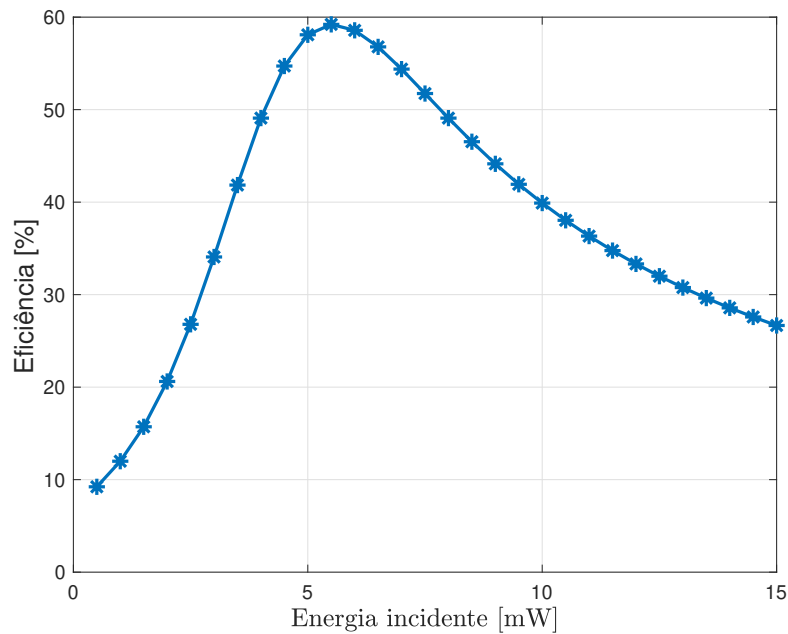
<sup>1</sup> Seguindo os parâmetros usados em (BOSHKOVSKA, 2016)

A Figura 14 apresenta entre a função não-linear da energia coletada presente em (98) e a eficiência de captação de energia dada por

$$\text{Eficiência de captação} = 100 \frac{\text{Energia coletada}}{\text{Energia incidente}} \quad (99)$$

É possível notar que há uma potência ótima que leva a uma eficiência máxima. Vale salientar que a potência ótima será referente ao nível de saturação e as constantes  $c_0$  e  $c_1$ .

**Figura 14 – Eficiência em função da energia incidente.**



**Fonte: Autoria própria.**

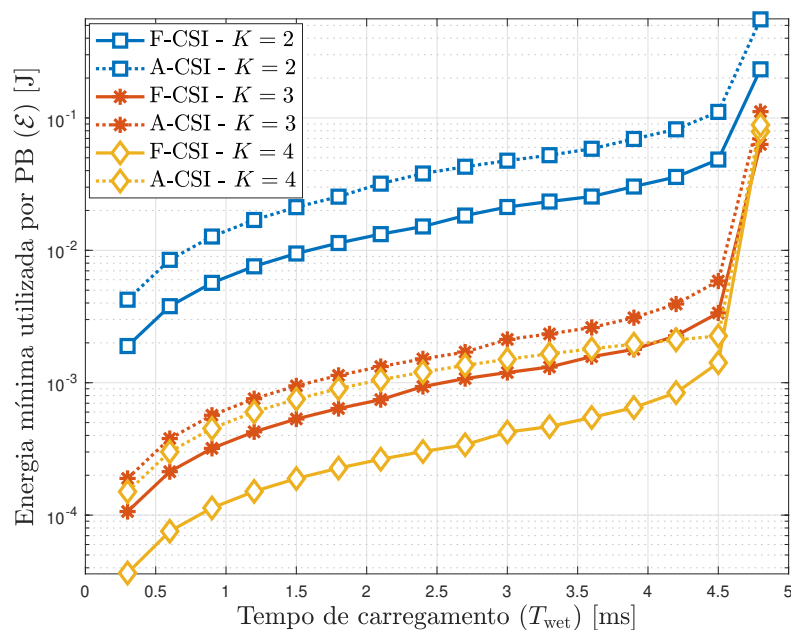
#### 4.5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, são apresentados os resultados numéricos para ilustrar a análise teórica apresentada das Seções anteriores. Os parâmetros padrão para simulações estão listados na Tabela 4 a menos que seja afirmado o contrário. A Figura 15 plota a energia mínima utilizada pelo PB ( $\mathcal{E}$ ) como uma função do tempo de carregamento ( $T_{\text{wet}}$ ), considerando F-CSI e A-CSI cenários com a sequência de comandos de controle preditivo sendo  $K \in \{2, 3, 4\}$ . Observa-se que o comprimento máximo do vetor de controle  $K$  depende do tipo de controlador e planta, objetivo de desempenho, sinais de referência, distúrbios. Assim, sendo conservadores, avaliamos o desempenho do sistema para alguns valores pequenos de  $K$ . Aumentando  $K$  reduz  $\mathcal{E}$  e o valor ótimo de  $T_{\text{wet}}$ . Por exemplo, o cenário com A-CSI e  $K = 2$  tem um tempo de carregamento ótimo

Tabela 4 – Parâmetros de simulação

Descrição	Parâmetro	Valor
Distância entre o controlador e o PB	$d_{wet}$	5 m
Distância entre o controlador e o Atuador	$d_{wit}$	30 m
Parâmetro LOS na etapa WET	$\chi_{wet}$	6 dB
Parâmetro LOS na etapa WIT	$\chi_{wit}$	0 dB
Expoente de perda de percurso	$\alpha_{wit} = \alpha_{wet}$	2,7
Frequência da operadora	$f$	2,5 GHz
Tempo de transmissão	$T$	5 ms
Confiabilidade do sistema de controle	$p_c$	$10^{-9}$
Nível de saturação do EH	$\mathcal{Y}$	4 mW
Constantes sem unidade do EH	$c_0, c_1$	1, 4
Figura do ruído	$N_f$	10 dBm
PSD do ruído	$N_0$	-204 dB/Hz
Tamanho do cabeçalho	$H$	32 bits
Tamanho do pacote de dados	$S$	24 bits
Largura de banda	$B$	100 kHz

Fonte: Autoria própria.

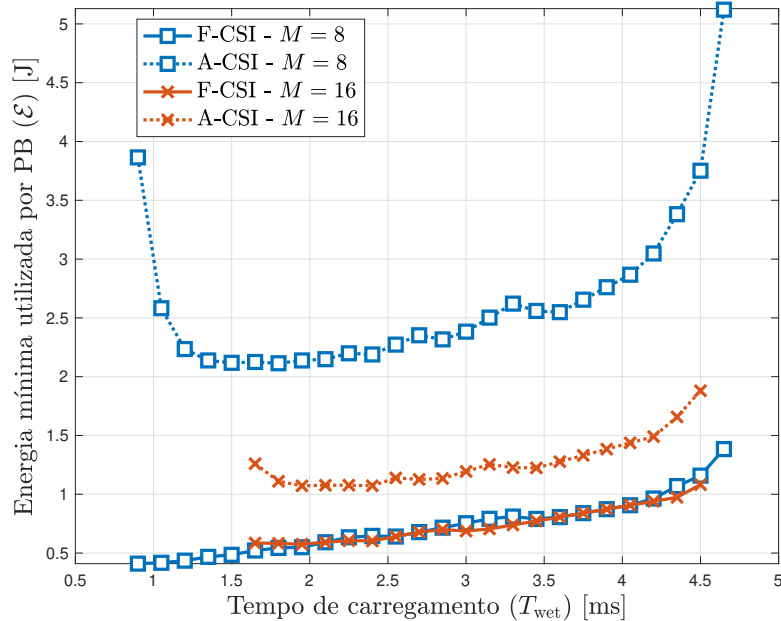
Figura 15 – Energia mínima utilizada pelo PB ( $\mathcal{E}$ ) como uma função do tempo de carregamento ( $T_{wet}$ ), para F-CSI e A-CSI, com  $M = 8$  e  $K \in \{2, 3, 4\}$ .

Fonte: Autoria própria.

em  $T_{wet} = 1,8$  ms, que diminui 0,25 ms nos casos quando  $K = 3$  e  $K = 4$ . Vale destacar também que para  $K = 1$  (sistema sem modelo PPC), o valor mínimo para  $T_{wet}$  aumentaria de forma surpreendente  $\sim 22$  s para F-CSI e  $\sim 25$  s para A-CSI, o que mostra a importância de aplicar o modelo PPC para atender as restrições de atraso no WPNCS. Por outro lado, aumentando  $K$  também reduz a diferença de desempenho do A-CSI em relação ao F-CSI, tornando o A-CSI muito mais atraente. Além disso, também é possível observar que  $\mathcal{E}$  aumenta quando  $T_{wet}$

também aumenta. Isso se deve ao equilíbrio entre os enlaces WET e WIT. Quando  $T_{\text{wet}}$  é grande, a etapa WIT se torna muito curta, exigindo uma grande quantidade de energia para atender às restrições de confiabilidade.

**Figura 16 – Energia mínima utilizada pelo PB ( $\mathcal{E}$ ) como uma função do tempo de carregamento ( $T_{\text{wet}}$ ), para F-CSI e A-CSI, com  $K = 2$  e  $M \in \{8, 16\}$  antenas.**

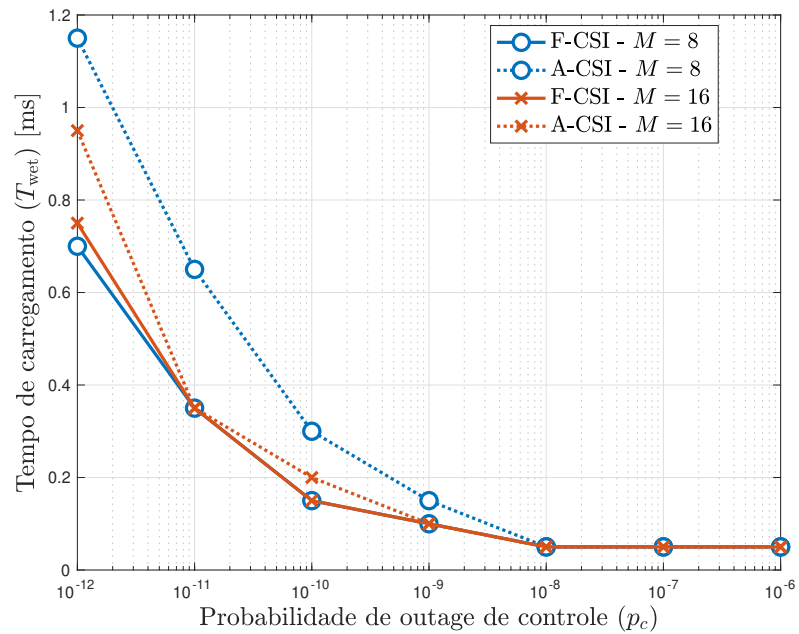


**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 16 mostra a energia mínima necessária em função do tempo de carregamento que garante a estabilidade em um sistema com F-CSI e A-CSI. É possível notar que existe uma energia mínima de transmissão para cada tempo de carregamento. O sistema não pode garantir a estabilidade para todas as faixas de tempo de carregamento porque a probabilidade de *outage* é maior do que o exigido pelo sistema de controle com menor tempo. Como é possível verificar, tem-se uma demanda alta de energia transmitida pelo PB no início e no final das curvas em função de  $T_{\text{wet}}$ . Isso ocorre pois é necessário que a quantidade de energia coletada seja suficiente para garantir a estabilidade do sistema. Sendo assim, podemos afirmar que é possível determinar a energia transmitida mínima para cada um dos cenários.

A Figura 17 relaciona o valor ótimo de  $T_{\text{wet}}$  e a confiabilidade do sistema de controle ( $p_c$ ) para ambos os cenários F-CSI e A-CSI com  $K = 3$  e  $M \in \{8, 16\}$  antenas. Primeiro, comparando F-CSI e A-CSI, observamos que o valor ótimo de  $T_{\text{wet}}$  é geralmente menor para F-CSI, mas a distância entre F-CSI e A-CSI diminui quando  $M$  aumenta. Além disso, um número maior de antenas no PB também leva a um menor  $T_{\text{wet}}$ , enquanto um requisito mais rigoroso em

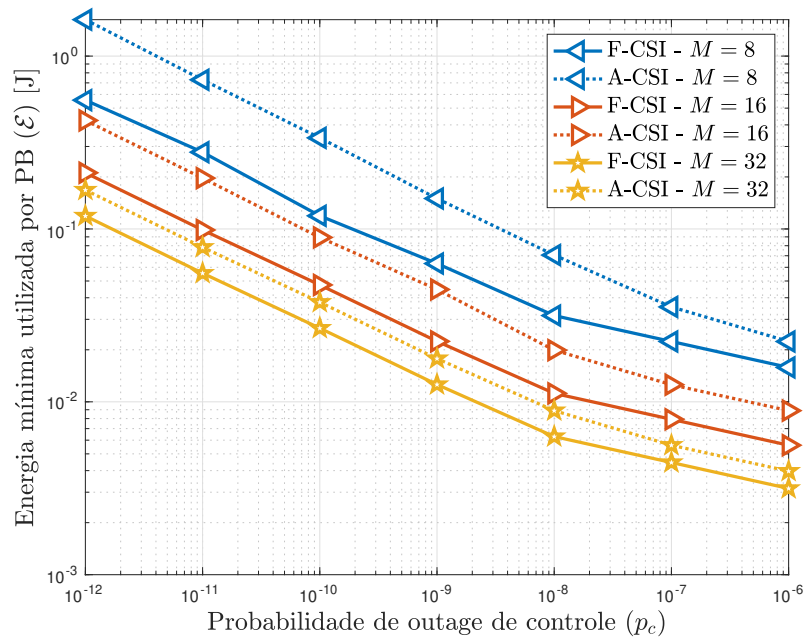
**Figura 17** – Valor ótimo de  $T_{\text{wet}}$  como uma função da confiabilidade do sistema de controle ( $p_c$ ), com  $K = 3$  e  $M \in \{8, 16\}$  antenas.



Fonte: Autoria própria.

termos de  $p_c$  aumenta  $T_{\text{wet}}$  consideravelmente.

**Figura 18** –  $\mathcal{E}$  mínima versus  $p_c$  com  $K = 3$  e  $M \in \{8, 16, 32\}$ .



Fonte: Autoria própria.

Por fim, a Figura 18 apresenta o valor mínimo de  $\mathcal{E}$  como uma função de  $p_c$  com  $K = 3$  e  $M \in \{8, 16, 32\}$ . Observa-se que quando  $p_c$  diminui, mais energia é necessária pelo

controlador para se comunicar com o atuador, de modo que a energia no enlace WET também aumenta consideravelmente. Além disso, é importante notar que o desempenho do esquema A-CSI se aproxima do F-CSI quando  $M$  aumenta. Por exemplo, quando  $p_c = 10^{-10}$ , F-CSI consome 61% menos energia que A-CSI com  $M = 8$ , que decresce para 43% com  $M = 16$  para 29% quando  $M = 32$ . Assim, aumentar  $M$  beneficia mais o esquema A-CSI, que requer apenas CSI médio e, portanto, é mais adequado para a implementação prática de um WPNCs.

#### 4.6 COMENTÁRIOS FINAIS

Os resultados apresentados neste capítulo mostram que aumentar o comprimento de previsão dos comandos de controle reduz a energia mínima utilizada pelo PB e o valor ótimo do tempo de carregamento. Bem como aumentar o número de antenas no PB reduz o consumo de energia da mesma maneira em relação a diferença de desempenho entre A-CSI e F-CSI. Verificou-se que há uma energia mínima de transmissão para cada tempo de carregamento visando garantir a estabilidade do sistema. Quando a variável  $p_c$  diminui, mais energia é necessária pelo controlador para se comunicar com o atuador, de modo que a energia no enlace WET também aumenta consideravelmente. O cenário A-CSI consome até 29% mais energia que o F-CSI, com a vantagem de exigir apenas CSI médio no PB. O trabalho apresentado neste capítulo está em processo de submissão.



## 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram propostas algumas abordagens de minimização do consumo total de energia por bit em um sistema de controle de rede sem fio. O objetivo do Capítulo 2 foi obter uma equação fechada para a minimização para o consumo de energia por bit aos casos de WNCS verificando a estabilidade de sistema utilizando a abordagem do tempo médio de permanência. Primeiramente o sistema WNCS foi modelado visando o sistema de comunicação. Então, foi apresentada a modelagem do sistema WNCS analisando o sistema de controle. Esta modelagem foi baseada nos conceitos da estabilidade exponencial e do tempo de permanência médio. Sendo assim, foi apresentado o *co-design* de controle-comunicação onde é obtida uma equação fechada para a probabilidade de *outage* relacionada a estabilidade do sistema. Por fim, com as devidas manipulações algébricas obteve-se a potência de transmissão ideal e a taxa de dados ideal para cada enlace que atendem à restrição de estabilidade e minimizam a energia consumida por bit em função da probabilidade de *outage* ideal.

No Capítulo 3 é apresentada a modelagem de um sistema de comunicação com desvanecimento Nakagami- $m$  correlacionado no tempo, visando minimizar o consumo de energia. Para isso, foi obtida a probabilidade de *outage* sujeita à correlação temporal. Em particular, o interesse foi relacionado ao caso de eventos consecutivos de *outage*, ou seja, quando várias *outages* ocorrem uma após a outra. Então, a energia consumida por bit foi minimizada para este WNCS restringindo a probabilidade de *outage* consecutiva a um determinado limite de confiabilidade. Em suma, com as devidas manipulações algébricas foi obtida uma aproximação em equação fechada para determinar a potência de transmissão ideal que minimizam a energia consumida por bit em função da probabilidade de *outage* e do tempo de correlação. Os resultados apresentados no Capítulo 3 mostram que o consumo de energia por bit ideal depende dos parâmetros de distância entre o transmissor e o receptor, da correlação no tempo, do atraso de *feedback* do canal e da ordem de desvanecimento Nakagami- $m$ .

O Capítulo 4 apresenta um WPNCS que utiliza um PB multi-antena dedicado para carregar o controlador e o sensor através de RF usando F-CSI ou A-CSI, enquanto satisfaz as restrições de confiabilidade introduzidas pelos enlaces de canal WET e WIT. Então, no enlace WIT, o controlador utiliza toda a energia coletada anteriormente para enviar uma sequência de comandos de controle preditivo ao atuador, por meio de um enlace sem fio. Além disso, foi definido um problema de otimização visando minimizar o consumo total de energia ajustando

adequadamente a potência de transmissão do PB, bem como o tempo alocado às fases de colheita de energia e transmissão de informação, sujeito a restrições de atraso máximo e probabilidade de *outage* máxima de controle.

Dessa forma, muitas extensões são possíveis a partir desse trabalho. Uma das possibilidades é o uso de estratégias de retransmissão de pacotes que pode ser associado ao problema com o objetivo de reduzir o efeito das perdas de pacote. No entanto, o uso de retransmissões é desafiador em casos de sistemas de controle, tendo em vista que o tempo de transmissão aumenta, sendo fundamental projetar esquemas que ainda garantam estabilidade do sistema. Outra possibilidade importante é considerar que os pacotes de comunicação são mais curtos, o que é fundamental em sistemas URLLC. Por exemplo, 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 MTC. Entretanto, os sistemas sem fio atuais não são projetados para suportar transmissões de pacotes curtos. Quando os pacotes são da ordem de poucas dezenas de bits, as informações podem ter o mesmo tamanho que o cabeçalho de comunicações, e os métodos convencionais para transmiti-los podem ser altamente sub-ótimos. Sendo assim, para fazer com que o método proposto seja realista é necessário remodelar as equações de capacidade e de probabilidade de falha considerando blocos de tamanho finito (DURISI *et al.*, 2016a).

Ainda é possível verificar o sistema URLLC sem *outage* no projeto da camada física usando uma diversidade de interfaces (ID: do inglês, *Interface Diversity*) e integrando diferentes interfaces de comunicação, onde cada interface tem como base uma tecnologia diferente. Alguns requisitos de baixa latência excluem protocolos reativos que dependem, por exemplo, de estratégias de retransmissão, as quais dependem de um canal de retorno. Sendo assim, para baixa latência é possível considerar a diversidade de interfaces, onde a informação é dividida por interfaces (ou tecnologias) de comunicação diferentes. A utilização de diferentes tecnologias é válida pois para URLLC existem rádios IEEE 802.15.4 capazes de se comunicar em diferentes frequências, por exemplo em 915MHz e 2,4GHz. Isso faz com que ao enviar a mesma informação por duas interfaces diferentes é possível verificar um aumento da confiabilidade do sistema.

Em (NIELSEN *et al.*, 2017) é explorado este conceito a fim de demonstrar como a codificação pode ser explorada para permitir a divisão flexível da carga útil nas interfaces. Os autores de (NIELSEN *et al.*, 2017) também focam na análise em interfaces sem fio independentes, formulam o problema de otimização do problema ideal de divisão da carga útil, bem como o método de avaliação genérico. Com isso, os autores fornecem uma solução analítica para a

divisão ideal de dados entre duas interfaces que minimiza a latência esperada. Portanto, dentro do contexto dos WNCSSs é possível utilizar este conceito de diversidade da interface com o intuito de analisar a confiabilidade de diferentes tipos de enlace. Então, é possível explorar a quantidade de repetições a serem feitas, ou a quantidade de parcelas que a informação deve ser dividida (no caso de ID) e avaliar qual é a energia consumida por bit para cada um dos casos.

Uma extensão possível para este trabalho seria aplicar o sistema URLLC em diferentes contextos envolvendo aprendizagem distribuída (FL: do inglês, *Federated Learning*). Em (SAMARAKOON *et al.*, 2020) os autores propõem uma estrutura de alocação de recursos e potência de transmissão conjunta distribuída, baseada em FL, para permitir comunicação veicular ultra confiável e com baixa latência. Isso nos mostra que é possível explorar cenários que incluem sistemas URLLC associados a FL. Além disso, outro cenário possível seria adicionar fonte não confiável de energia, com nós alimentados por PBs. Ou seja, um cenário onde uma estação base é utilizada tanto para transferir energia quanto para transferir informações. Neste cenário vários desafios precisam ser levados em consideração como a modelagem de uma canal que envia e recebe informação e também transferir energia, a probabilidade de *outage* que relaciona os dois casos, bem como a função custo que define o problema de FL.

Outra possibilidade é a otimização do processo computacional do sistema. Por exemplo, no contexto da computação, a multi conectividade tem sido estudada como uma forma de melhorar a eficiência da comunicação, garantindo o desempenho desejado em termos de latência de serviço e/ou aumento da confiabilidade (ELBAMBY *et al.*, 2019; SORET *et al.*, 2022; MERLUZZI *et al.*, 2019). Outras soluções levam em consideração as representações do modelo de dados e treinamento para explorar as compensações entre a utilização de recursos e o desempenho do aprendizado (ELGABLI *et al.*, 2020; MERLUZZI *et al.*, 2021; DINGZHU *et al.*, 2020). A possibilidade de reduzir a utilização dos recursos de comunicação, sem comprometer o desempenho das aplicações específicas, é então uma importante direção de pesquisa (HU *et al.*, 2020). Finalmente, comunicações semânticas e orientadas a objetivos podem ser investigadas neste contexto para melhorar a eficácia seguindo a abordagem sugerida em (STRINATI; BARBAROSSA, 2021; PARK *et al.*, 2021).

## REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. **Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables**. 9. ed. New York: Dover, 1964.

ALWIS, C. D.; KALLA, A.; PHAM, Q.-V.; KUMAR, P.; DEV, K.; HWANG, W.-J.; LIYANAGE, M. Survey on 6G frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research. **IEEE Open Journal of the Communications Society**, 2021.

AYIDH, A. al; NADAS, J. B.; GHANNAM, R.; ZHAO, G.; IMRAN, M. A. Communication and control co-design using MIMO wireless network. *In: UK/China Emerging Technologies (UCET)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5.

BHATIA, Rajendra. **Matrix Analysis**. [S.l.]: Springer, 1997. v. 169.

BOSHKOVSKA, Elena. Practical non-linear energy harvesting model and resource allocation in SWIPT systems. **CoRR**, abs/1602.00833, 2016.

BOSHKOVSKA, Elena; NG, Derrick Wing Kwan; ZLATANOV, Nikola; SCHOBER, Robert. Practical non-linear energy harvesting model and resource allocation for SWIPT systems. **IEEE Commun. Lett.**, v. 19, n. 12, p. 2082–2085, 2015.

CALVO-FULLANA, M.; ANTÓN-HARO, C.; MATAMOROS, J.; RIBEIRO, A. Random access communication for wireless control systems with energy harvesting sensors. **IEEE Trans. Signal Process.**, v. 68, p. 3961–3975, 2020.

CHANG, B.; ZHAO, G.; ZHANG, L.; IMRAN, M. A.; CHEN, Z.; LI, L. Dynamic communication QoS design for real-time wireless control systems. **IEEE Sensors Journal**, v. 20, n. 6, p. 3005–3015, 2020.

CLERCKX, B.; KIM, J.; CHOI, K. W.; KIM, D. I. Foundations of wireless information and power transfer: Theory, prototypes, and experiments. **Proceedings of the IEEE**, v. 110, n. 1, p. 8–30, 2022.

CORLESS, R.; GONNET, G.; HARE, D.; JEFFREY, D.; KNUTH, D. On the Lambert  $W$  function. **Advances in Computational Mathematics**, v. 5, p. 329–359, 01 1996.

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.

DINGZHU, W.; MEHDI, B.; KAIBIN, H. Joint parameter-and-bandwidth allocation for improving the efficiency of partitioned edge learning. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 19, n. 12, p. 8272–8286, 2020.

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.

ELBAMBY, M. S.; PERFECTO, C.; LIU, C.-F.; PARK, J.; SAMARAKOON, S.; CHEN, X.; BENNIS, M. Wireless edge computing with latency and reliability guarantees. **Proceedings of the IEEE**, v. 107, n. 8, p. 1717–1737, 2019.

ELGABLI, A.; PARK, J.; BEDI, A. S.; BENNIS, M.; AGGARWAL, Va. Communication efficient framework for decentralized machine learning. p. 1–5, 2020.

ERICSSON. **NR URLLC Rel-16 Use Cases and Requirements**. [S.l.], 2018.

ERICSSON. 2022. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/mobility-visualizer>.

FENG, C.; WANG, H.-M.; POOR, H. Vincent. Reliable and secure short-packet communications. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, 2021.

GOLDSMITH, Andrea. **Wireless Communications**. 1st. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.

GRADSHTEYN, I.S.; RYZHIK, I.M. **Table of Integrals, Series, and Products**. Seventh. Amstergam: Elsevier/Academic Press, 2007.

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**, n. 6, p. 1411–1421, Dec. 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. v. 55, n. 8, p. 1781–1796, Aug 2010. ISSN 0018-9286.

HESPANHA, J. P. Uniform stability of switched linear systems: extensions of Lasalle's invariance principle. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 49, n. 4, p. 470–482, April 2004. 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*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 3, p. 2655–2660 vol.3. ISSN 0191-2216.

HU, Yulin; LI, Yi; GURSOY, M. Cenk; VELIPASALAR, Senem; SCHMEINK, Anke. Throughput analysis of low-latency IoT systems with QoS constraints and finite blocklength codes. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 69, n. 3, p. 3093–3104, 2020.

KADA, B.; ALZUBAIRI, A.; TAMEEM, A. Industrial communication networks and the future of industrial automation. *In: 2019 Industrial Systems Engineering Conference (ISEC)*. [S.l.: s.n.], 2019.

KARADAG, G.; IQBAL, M. S.; COLERI, S. Optimal power control, scheduling, and energy harvesting for wireless networked control systems. **IEEE Trans. Commun.**, v. 69, n. 3, p. 1789–1801, 2021.

KARAGIANNIS, G.; ALTINTAS, O.; EKICI, E.; HEIJENK, G.; JARUPAN, B.; LIN, K.; WEIL, T. Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 13, n. 4, p. 584–616, Fourth 2011. ISSN 1553-877X.

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

LIN, H.; ANTSAKLIS, P. J. Stability and stabilizability of switched linear systems: A survey of recent results. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 54, n. 2, p. 308–322, Feb 2009. ISSN 0018-9286.

LIU, X.; GOLDSMITH, A. Wireless communication tradeoffs in distributed control. *In: 42nd IEEE International Conference on Decision and Control (CDC)*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 688–694. ISSN 0191-2216.

LIU, X.; GOLDSMITH, A. Wireless medium access control in networked control systems. *In: American Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 4, p. 3605–3610. ISSN 0743-1619.

LIU, X.; GOLDSMITH, A. Wireless network design for distributed control. *In: 43rd IEEE International Conference on Decision and Control (CDC)*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 2823–2829. ISSN 0191-2216.

LÓPEZ, O.L. A.; MAHMOOD, N. H.; ALVES, H.; LATVA-AHO, M. CSI-free vs CSI-based multi-antenna WET for massive low-power Internet of Things. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 20, n. 5, 2021.

LÓPEZ, O. L. A.; ALVES, H.; SOUZA, R. D.; MONTEJO-SÁNCHEZ, S.; FERNÁNDEZ, E. M. G.; LATVA-AHO, M. Massive wireless energy transfer: Enabling sustainable IoT toward 6G era. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 11, p. 8816–8835, 2021.

LÓPEZ, O. L. A.; MONTEIRO, F. A.; ALVES, H.; ZHANG, R.; LATVA-AHO, M. A low-complexity beamforming design for multiuser wireless energy transfer. **IEEE Wireless Communication Letter**, v. 10, n. 1, p. 58–62, 2021.

MERLUZZI, M.; LORENZO, P. Di; BARBAROSSA, S. Wireless edge machine learning: Resource allocation and trade-offs. **IEEE Access**, v. 9, p. 45377–45398, 2021.

MERLUZZI, M.; PIETRO, N. di; LORENZO, P. Di; CALVANESE, E. S.; BARBAROSSA, S. Network energy efficient mobile edge computing with reliability guarantees. *In: 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

NIELSEN, J. J.; LI, R.; POPOVSKI, P. Optimized interface diversity for ultra-reliable low latency communication (URLLC). *In: GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

OGATA, Katsuhiko. **Discrete-time Control Systems**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1995. ISBN 0-13-034281-5.

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

PARK, J.; SAMARAKOON, S.; ELGABLI, A.; KIM, J.; BENNIS, M.; KIM, S.-L.; DEBBAH, M. Communication-efficient and distributed learning over wireless networks: Principles and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 5, p. 796–819, 2021.

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

PARK, P.; COLERI, S.; FISCHIONE, C.; LU, C.; JOHANSSON, K. H. Wireless network design for control systems: A survey. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 20, n. 2, p. 978–1013, 2018.

PARK, P.; KHADILKAR, H.; BALAKRISHNAN, H.; TOMLIN, C. J. High confidence networked control for next generation air transportation systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 59, n. 12, p. 3357–3372, Dec 2014. ISSN 0018-9286.

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

ROYAN, M.; VEHKAPERÄ, M.; CHARALAMBOUS, T.; WICHMAN, R. Adaptive coded modulation for stabilization of wireless networked control systems over binary erasure channels. *In: 57th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 48–55.

SAMA, M. R.; GUERZONI, R.; KIESS, W.; THAKOLSRI, S.; JÜRJENS, L. J. Why is application reliability an issue for an ultra-reliable 6G network? *In: 2021 Joint European Conference on Networks and Communications 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. [S.l.: s.n.], 2021.

SAMARAKOON, S.; BENNIS, M.; SAAD, W.; DEBBAH, M. Distributed federated learning for ultra-reliable low-latency vehicular communications. **IEEE Transactions on Communications**, v. 68, n. 2, p. 1146–1159, 2020.

SCACIOTA, R.; MORITZ, G. L.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D. Minimization of energy consumption per bit using an average dwell-time approach for wireless networked control systems. **IEEE Access**, v. 7, p. 81839–81848, 2019. ISSN 2169-3536.

SCACIOTA, R.; MORITZ, G. L.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D. Minimization of energy consumption per bit of wireless networked control systems with time-correlated Nakagami- $m$  fading channels. *In: 38th Brazilian Symposium on Communication and Signal Processing*. [S.l.: s.n.], 2020.

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.

SHI, Z.; MA, S.; HOU, F.; TAM, K.; WU, Y. Optimal power allocation for HARQ schemes over time-correlated Nakagami- $m$  fading channels. *In: IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*. [S.l.: s.n.]. p. 1–6.

SORET, B.; NGUYEN, L. D.; SEEGER, J.; BRÖRING, A.; ISSAID, C. B.; SAMARAKOON, S.; GABLI, A. E.; KULKARNI, V.; BENNIS, M.; POPOVSKI, P. Learning, computing, and trustworthiness in intelligent IoT environments: Performance-energy tradeoffs. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, v. 6, n. 1, p. 629–644, 2022.

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.



STRINATI, E. C.; BARBAROSSA, S. 6G networks: Beyond shannon towards semantic and goal-oriented communications. **Computer Networks**, v. 190, p. 107930, 2021. ISSN 1389-1286.

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.

TONG, X.; ZHAO, G.; IMRAN, M. A.; PANG, Z.; CHEN, Z. Minimizing wireless resource consumption for packetized predictive control in real-time cyber physical systems. *In: IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. ISSN 2474-9133.

WOLFF, D. D. **The future of the IoT (batteries not required)**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://news.mit.edu/2021/future-iot-batteries-not-required-0521>.

WU, B.; LEMMON, M. D.; LIN, H. Formal methods for stability analysis of networked control systems with IEEE 802.15.4 protocol. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 26, n. 5, p. 1635–1645, Sep. 2018. ISSN 1063-6536.

XIAO, L.; JOHANSSON, M.; HINDI, H.; BOYD, S.; GOLDSMITH, A. Joint optimization of communication rates and linear systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 48, n. 1, p. 148–153, Jan 2003. ISSN 0018-9286.

ZHAO, G.; IMRAN, M. A.; PANG, Z.; CHEN, Z.; LI, L. Toward real-time control in future wireless networks: Communication-control co-design. **IEEE Communications Magazine**, v. 57, n. 2, p. 138–144, February 2019. ISSN 0163-6804.

ZHU, Y.; XIN, Y.; KAM, P.-Y. Outage probability of Rician fading relay channels. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 57, n. 4, p. 2648–2652, 2008.