

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

ERICH ARNON HEILMANN

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA MINIMIZAÇÃO  
DO CONSUMO DE ENERGIA EM REDES DE SENSORES  
SEM FIO COM RESTRIÇÕES DE ATRASO E  
CONFIABILIDADE**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2018

ERICH ARNON HEILMANN

**OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA MINIMIZAÇÃO  
DO CONSUMO DE ENERGIA EM REDES DE SENSORES  
SEM FIO COM RESTRIÇÕES DE ATRASO E  
CONFIABILIDADE**

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

Orientador: Prof. Dr. Glauber Gomes de Oliveira Brante

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz

CURITIBA  
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

H466o  
2018 Heilmann, Erich Arnon  
Otimização de parâmetros para minimização do consumo de energia em redes de sensores sem fio com restrições de atraso e confiabilidade / Erich Arnon Heilmann.-- 2018.  
46 f. : il. ; 30 cm

Disponível também via World Wide Web  
Texto em português com resumo em inglês  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2018  
Bibliografia: f. 43-46

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

---

CDD: Ed. 23 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba  
Bibliotecário: Adriano Lopes CRB9/1429

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 787

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Otimização de Parâmetros Para Minimização do Consumo de Energia em Redes de Sensores sem Fio com Restrições de Atraso e Confiabilidade**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Erich Arnon Heilmann**, no dia 09 de março de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Telecomunicações e Redes, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

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

Prof(a). Dr(a). André Augusto Mariano - (UFPR)

Prof(a). Dr(a). Ohara Kerusauskas Rayel - (UTFPR)

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

Curitiba, 09 de março de 2018.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar preciso agradecer a toda minha família pelo apoio e, principalmente, aos meus pais, Alvaro Heilmann e Elisabeth Maria Gonçalves Heilmann, que sempre me deram suporte para que pudesse me doar aos estudos e estar em constante evolução como estudante, profissional e acima de tudo como ser humano.

Gostaria de agradecer ao meu orientador inicial Richard Demo Souza por toda a paciência e compreensão ao longo da elaboração deste trabalho, por todo o conhecimento transmitido ao longo dos estudos que vem desde a graduação, e por todo o suporte e dedicação em sua posição de educador e orientador, sendo um exemplo de profissional e pesquisador, sem o qual este trabalho não seria possível. Além disso, quero agradecer ao meu coorientador Guilherme Luiz Moritz e ao meu atual orientador Glauber Gomes de Oliveira Brante por todo o apoio, compreensão e ressaltar a importância fundamental destes durante a elaboração do trabalho. Também quero agradecer ao professor doutor Marcelo Eduardo Pellenz por suas contribuições para o desenvolvimento desse estudo. Ainda gostaria de agradecer ao meu chefe Wellington Desan pela compreensão e incentivo para que finalizasse este estudo e a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído.

## RESUMO

HEILMANN, Erich Arnon. Otimização de Parâmetros para Minimização do consumo de energia em Redes de Sensores sem Fio com Restrições de Atraso e Confiabilidade. 46 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Muitos sistemas apresentam imposições de confiabilidade e latência que se tornam mais difíceis de serem atingidas quando a rede em que o sistema opera é uma rede sem fio. Por outro lado, módulos sensores em uma rede desse tipo precisam economizar energia para evitar gastos com manutenção e estender seu tempo de vida, visto que muitas vezes estes módulos se encontram em locais de difícil acesso. Diversos estudos até aqui realizados mostram ser possível reduzir o consumo de energia de nós otimizando parâmetros da comunicação sem fio. O fato de o sistema exigir uma latência máxima implica que o número de retransmissões não pode ser ilimitado. Nesta dissertação é avaliada a minimização do consumo de energia otimizando parâmetros de comunicação como a ordem de modulação, a SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), taxa de código e inclusive o número de retransmissões, em uma rede que possui exigências de confiabilidade, latência e potência máxima. Este trabalho considera uma comunicação através de um canal com desvanecimento do tipo Rayleigh, o uso de códigos corretores de erro convolucionais, além de S-HARQ (*Simple-Hybrid Automatic Repeat Request*) como técnica de retransmissão de mensagens. Ao final a mesma avaliação é feita, porém maximizando a eficiência energética do sistema, o que nos leva a perceber que o número máximo de retransmissões não sofre grande impacto quando o tipo de otimização é trocado. Os resultados mostram que a limitação de atraso impacta diretamente na seleção dos parâmetros. Quando o objetivo for reduzir o consumo energético ou aumentar a eficiência energética em um ambiente com limitação de latência nem sempre a melhor escolha será aumentar o número de retransmissões possíveis. Maiores atrasos permitem o uso de números de retransmissões maiores, estendendo o alcance dos dispositivos e reduzindo seu consumo. Além disso, aumentar a confiabilidade das entregas de pacotes impacta de maneira a dificultar a comunicação do ponto de vista energético.

**Palavras-chave:** Otimização de Parâmetros, Redes de Sensores Sem Fio, Minimização do Consumo, Restrição de Atraso

## ABSTRACT

HEILMANN, Erich Arnon. Parameters Optimization for Energy Minimization in Wireless Sensor Networks with Delay and Reliability Constraints. 46 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Many systems present constraints of reliability and delay, which become harder to be achieved when the system operates through a wireless network. On the other hand, sensor modules in these networks need to save energy avoiding maintenance costs and extending their lifetime, since these modules are usually located in places that are difficult to access. Several works have shown that it is possible to reduce the energy consumption in sensor nodes optimizing wireless communication parameters. The fact that the system requires a maximum delay implies that the number of retransmissions cannot be unlimited. In this work we evaluate the energy consumption minimization, optimizing communication parameters such as the modulation order, the SNR (Signal-to-Noise Ratio), code rate, including the number of retransmissions, in a network with reliability, latency and maximum power requirements. This work considers that the wireless links are subjected to Rayleigh fading, while we employ convolutional error correcting codes and S-HARQ (Simple-Hybrid Automatic Repeat Request) as the retransmission technique. In addition, the same evaluation is made, but maximizing system's energy efficiency, which yields small differences with respect to the case when the energy consumption is minimized. Results show that the delay constraints impact directly in communication parameters selection. Moreover, when the goal is to reduce energy consumption or to increase energy efficiency in an environment with latency constraints, it is not always a good choice to increase the number of possible retransmissions. Higher delays allow the use of a large number of retransmission attempts, extending the device's range and reducing its energy consumption. Furthermore, increasing package delivery reliability turns the communication task harder from the energy efficiency point of view.

**Keywords:** Parameters Optimization, Wireless Sensor Network, Energy Consumption Minimization, Delay Constraint

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Diagrama de um codificador convolucional	21
Figura 2	– Esquema de funcionamento de ARQ.	22
Figura 3	– Energia consumida para entregar um bit com sucesso com otimização de SNR e taxa de código para diferentes ordens de modulação ( $M$ ) e valores de FER alvo. A palavra de informação foi considerada fixa, enquanto o bloco codificado variava seu tamanho, sem limitação de atraso.	32
Figura 4	– Eficiência energética com otimização de SNR e taxa de código para diferentes ordens de modulação ( $M$ ) e valores de FER alvo. A palavra de informação foi considerada fixa, enquanto o bloco codificado variava seu tamanho, sem limitação de atraso.	32
Figura 5	– Energia ótima consumida para entregar um bit com sucesso ao variar o número de retransmissões, utilizando uma FER alvo de $10^{-3}$ , S-HARQ e códigos convolucionais com a palavra de informação fixada em 100 bits, além de restrição de atraso de 7,5 ms. A otimização realizada foi de SNR, taxa de código e ordem de modulação.	34
Figura 6	– Eficiência energética ao variar o número de retransmissões, utilizando uma FER alvo de $10^{-3}$ , S-HARQ e códigos convolucionais, além de restrição de atraso de 7,5 ms e de potência de 100mW. A otimização presente foi de SNR, taxa de código e ordem de modulação.	35
Figura 7	– Melhores escolhas de constelação, variando o número de retransmissões $K$ , utilizando uma FER alvo de $10^{-3}$ , códigos convolucionais com a palavra de informação fixa e o tamanho de bloco variável, restrição de atraso de 7,5 ms, além de potência limite de 100mW.	36
Figura 8	– Melhores escolhas de SNR para otimização de eficiência energética (EE) e consumo de energia (CE) por bit para diferentes restrições de atraso ( $T_{max}$ ).	37
Figura 9	– Número ótimo de retransmissões, considerando a minimização do consumo de energia para diferentes valores de $T_{Tmax}$ .	38
Figura 10	– Número ótimo de retransmissões para diferentes valores de $T_{Tmax}$ considerando a maximização da eficiência energética.	39
Figura 11	– Energia ótima consumida para entregar um bit com sucesso para diferentes valores de $T_{Tmax}$ . A taxa de erro de <i>frame</i> alvo é de $10^{-3}$ e a potência do dispositivo está limitada em 100mW.	39
Figura 12	– Eficiência energética ótima para diferentes valores de $T_{Tmax}$ . A taxa de erro de <i>frame</i> alvo é de $10^{-3}$ e a potência do dispositivo está limitada em 100mW.	40



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de um dispositivo sem fio de baixa potência .....	31
---	----

## LISTA DE SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgement</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
FER	<i>Frame Error Rate</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
M-QAM	<i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i>
NACK	<i>Negative acknowledgement</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
UPA	<i>Unidade de processamento aritmético</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$n$	Número de estágios no registrador de deslocamento
$k$	Número de bits de informação
$n$	Número de bits da palavra de código
$r$	Taxa de código
$\epsilon_{st}$	Energia de Inicialização
$T_b$	Tempo médio de transmissão de um bit de informação
$r$	Taxa de código
$M$	Ordem de modulação
$R_s$	Taxa de símbolo
$L_H$	Tamanho do cabeçalho de pacote
$L_O$	Tamanho do <i>overhead</i>
$L_P$	Tamanho do <i>payload</i>
$\epsilon_{el,tx}$	Consumo dos eletrônicos de pré-processamento do transmissor
$P_{el,tx}$	Potência dos eletrônicos de pré-processamento do transmissor
$\epsilon_{el,rx}$	Consumo dos eletrônicos de pré-processamento do receptor
$P_{el,rx}$	Potência dos eletrônicos de pré-processamento do receptor
$T_{fb}$	Tempo médio por bit de informação por pacote
$L_F$	Tamanho do frame de <i>feedback</i>
$\epsilon_{PA}$	Consumo do sistema de amplificação
$P_{PA}$	Potência dissipada pelo sistema de amplificação
$P_{tx}$	Potência de transmissão
$\xi$	Taxa de pico-a-média na saída do amplificador
$\eta$	Eficiência de dreno do amplificador
$\bar{\gamma}$	SNR média
$\sigma_n^2$	Potência de ruído
$d$	Distância de comunicação
$\alpha$	Expoente de perda de percurso
$N_0$	Densidade espectral de potência de ruído
$W$	Largura de banda
$N_f$	Figura de ruído
$M_l$	Margem de comunicação
$V_{dd}$	Tensão de operação da UPA
$I_0$	Corrente média
$\Delta t_j$	Tempo de execução de operação aritmética
$f_{UPA}$	Frequência de operação da UPA
$c_j$	Número de pulsos de <i>clock</i>
$P_f$	Probabilidade de erro de pacote
$K$	Número máximo de retransmissões
$P_{bin}$	Probabilidade de erro de uma modulação binária
$P_b$	Probabilidade de erro de bit dos bits de informação
$\epsilon_T$	Energia consumida pelo transmissor

$C$	Compensação de perda de pacotes
$n_{EE}$	Eficiência energética
$L$	Tamanho do pacote de informação
$T_{Tmax}$	Tempo máximo de duração de uma comunicação
$r_{min}$	Menor taxa de código usada na simulação
$M_{min}$	Menor constelação da simulação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	15
<b>2</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1	REDES DE SENSORES SEM FIO	16
2.1.1	Eficiência Energética em Redes de Sensores Sem Fio	17
2.1.2	Sistemas Limitados em Atraso e Confiabilidade	18
2.2	PARÂMETROS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO	18
2.2.1	SNR	19
2.2.2	Modulação	19
2.2.3	Códigos Convolucionais	20
2.2.4	Requisição de Repetição Automática (ARQ)	21
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>23</b>
3.1	ELEMENTOS DE CONSUMO DE ENERGIA	23
3.1.1	Energia de Inicialização	23
3.1.2	Energia dos Componentes Eletrônicos de Pré-Processamento	24
3.1.3	Energia de Irradiação Eletromagnética	25
3.1.4	Energia de Codificação e Decodificação em Banda Base	26
3.2	ESTATÍSTICAS DE RETRANSMISSÃO	26
3.3	ENERGIA TOTAL POR BIT ENTREGUE COM SUCESSO	27
3.4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	28
3.5	RESTRIÇÃO DE ATRASO	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS NUMÉRICOS</b>	<b>30</b>
4.1	EXPLORANDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA	30
4.2	OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS	33
4.3	RESTRIÇÃO DO LIMITE DE ATRASO	37
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>41</b>
	REFERÊNCIAS	43

## 1 INTRODUÇÃO

Quando a abordagem envolve o que conhecemos como Redes de Sensores Sem Fio (WSN, do inglês, *Wireless Sensor Networks*), reduzir o consumo de energia é um fator de extrema importância, uma vez que em redes desse tipo, um nó necessita de autonomia para operar por longos períodos de tempo sem trocas ou recarga de bateria. Os avanços constantes da eletrônica e das comunicações sem fio tornaram possível a criação de dispositivos de baixa potência, baixo custo, que realizam diversos tipos de sensoriamento e possuem tamanhos muito pequenos (AKYILDIZ et al., 2002a; RASHID; REHMANI, 2016). Sendo assim, esses pequenos módulos não permitem o uso de grandes baterias, além de muitas vezes estarem localizados em regiões que dificultam o acesso para manutenção (SADI et al., 2014). Nesse cenário as motivações econômicas e ambientais ganham importância, demandando cada vez mais atenção para um aumento na eficiência energética de dispositivos em redes de sensores (LI et al., 2011).

As dificuldades na comunicação sem fio se tornam ainda maiores quando através desta opera um sistema com restrições de latência. Sistemas com essa característica podem ser observados, por exemplo, em comunicações via satélite (DROBCZYK; MARTENS, 2016) ou em sistemas de controle, os quais costumam apresentar exigências de confiabilidade e tempo de entrega de mensagens, tornando-se mais difíceis de serem atingidas quando a comunicação é sem fio e a energia disponibilizada pela bateria é limitada (SADI et al., 2014). Sistemas como esses fazem parte de um campo emergente e com diversas áreas de aplicação como automação industrial (WILLIG, 2008), carros inteligentes (WALTER et al., 2011; TANG et al., 2006) e *smart grid* (LI et al., 2012). O padrão IEEE 802.15.4 possui emendas (GUTIERREZ, 2006) que especificam latências máximas permitidas para garantir a confiabilidade de sistemas, por exemplo, para automação industrial, onde a latência máxima é 10ms, sistemas de transporte aéreo, nos quais o atraso limite é 4,8s (AERONAUTICS, 2002) e aplicações de segurança de cooperação veicular com 100ms de atraso máximo (KARAGIANNIS et al., 2011).

Com o consumo de dispositivos que fazem parte de uma WSN em foco, é preciso poder determinar quais as principais fontes de consumo e avaliar o consumo geral do sistema. Em (ROSAS; OBERLI, 2012) um modelo para consumo de energia é apresentado, o qual mostra que as principais dissipações de energia de um dispositivo sensor estão relacionadas ao consumo de inicialização, ao consumo dos componentes eletrônicos envolvidos no processo de pré-processamento, consumo para processar o

*feedback* do receptor e, principalmente, ao consumo para transmitir o sinal eletromagnético contendo a mensagem. Em (PELLENZ et al., 2010) é inserido o uso de códigos convolucionais conjuntamente com técnicas de retransmissão para avaliação da eficiência energética levando em conta um modelo de consumo semelhante, porém nesse estudo o consumo dos circuitos eletrônicos existentes para a codificação não é levado em conta. Em (ROSAS et al., 2014) é adicionado o uso de códigos corretores de erro, resultando na inserção de mais um componente no modelo citado acima: o consumo eletrônico de banda base.

Para obter uma melhor eficiência energética em dispositivos sem fio é possível otimizar o uso de diversos parâmetros da comunicação. Em (SANKARASUBRAMANIAM et al., 2003) é otimizado o tamanho do pacote enviado em uma WSN, enquanto em (MENON et al., 2017) o tamanho de *payload* é otimizado levando em consideração o uso de códigos convolucionais. Outros parâmetros como a ordem de modulação e a SNR (do inglês, *Signal-to-Noise Ratio*) podem ser alvo de otimização como apresentado em (ROSAS; OBERLI, 2012).

Quando ocorrem falhas na transmissão de dados é necessário realizar a retransmissão dos pacotes recebidos com erros. As retransmissões podem ter grande impacto no consumo de energia de um enlace de comunicação. Para tentar reduzir o efeito das retransmissões são utilizados esquemas de requisição de repetição automática (ARQ, do inglês, *Automatic Repeat Request*). Essas técnicas foram muito estudadas com a intenção de aumentar o *throughput* da comunicação, porém agora são alvo de estudos visando consumos de energia mais eficiente. Em (ROSAS et al., 2016) a taxa de códigos corretores de erro é otimizada visando uma melhor eficiência energética para diferentes técnicas de repetição automática híbrida (HARQ, do inglês, *Hybrid Automatic Repeat Request*). A eficiência energética também é explorada combinada com HARQ para redes colaborativas e não colaborativas no estudo de (STANOJEV et al., 2009).

Em alguns casos as restrições de atraso e confiabilidade precisam ser respeitadas para garantirem a estabilidade do sistema. Esse fato é explorado em (SADI et al., 2014) onde é realizada uma otimização conjunta entre o sistema de controle e de comunicação para minimizar o consumo de energia do sistema de comunicação, onde o período de amostragem dos dados, o tamanho da constelação e a probabilidade de erro são variáveis de decisão. Por outro lado (NUGGEHALLI et al., 2002) explora diferentes estratégias para realizar retransmissões em um ambiente limitado em latência. A existência dessas restrições torna mais difícil atingir alta eficiência energética, como verificado em (CHEN

et al., 2013).

O processo de seleção de parâmetros para elevar a eficiência de dispositivos em WSNs se mostra bastante efetivo. Por exemplo, em (CUI et al., 2005) é otimizado o tempo de transmissão e parâmetros de modulação em sistemas sem codificação sendo possível atingir até 80% de economia de energia se comparado ao sistema não otimizado considerando um canal AWGN (do inglês, *Additive White Gaussian Noise*). Já em (ROSAS; OBERLI, 2012), considerando comunicações de curto-alcance é possível estender o tempo de vida de um dispositivo de baixa potência em até 500% selecionando uma melhor constelação em detrimento à modulação BPSK (em inglês, *Binary Phase Shift Keying*). Ademais, (ROSAS et al., 2014) mostra que o uso de uma baixa taxa de código é a ótima escolha para comunicações mais longas, enquanto uma taxa maior possui desempenho melhor para distâncias menores. Com isso pode-se estender a duração da bateria ou até mesmo aumentar o alcance do dispositivo.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo investigar a otimização de parâmetros de comunicação sem fio como SNR, ordem de modulação, taxa de código e também o número de retransmissões em um sistema onde os nós envolvidos na comunicação possuem uma potência limitada para consumo, além de restrições de latência e confiabilidade para entrega de pacotes. A maioria dos trabalhos elaborados leva em conta o canal AWGN (ROSAS; OBERLI, 2012; NUGGEHALLI et al., 2002; MENON et al., 2017). Por esta razão este estudo irá considerar um cenário onde a comunicação ocorre através de um canal com desvanecimento em bloco do tipo Rayleigh, pois este remete a ambientes onde a comunicação é feita pelas componentes de multipercurso, sendo esse cenário o indicado para modelagem quando não existe linha de visada. Para que seja possível realizar uma avaliação mais clara sobre o impacto das retransmissões no sistema será aplicado o método de retransmissão de mensagem chamado S-HARQ (do inglês, *simple-ARQ*), uma vez que este apresenta um baixo grau de complexidade.

Para aproximar a situação de um caso real o tamanho da palavra de informação será mantido fixo neste estudo, enquanto o bloco codificado é quem terá seu tamanho variado com diferentes valores de taxa de código, diferentemente, por exemplo, dos casos encontrados em (ROSAS; OBERLI, 2012; ROSAS et al., 2016), trabalhos que serviram de base para este estudo, onde a palavra de informação varia de maneira a resultar sempre na palavra de código com o mesmo tamanho, fato que não é encontrado na prática.



A aplicação de uma técnica de códigos corretores de erro foi inserida, uma vez que é seguro afirmar que seu uso com modulações em quadratura (M-QAM, em inglês, *M-ary Quadrature Amplitude Modulation*) é sempre melhor em distâncias práticas (CUI et al., 2005). A opção pelo uso de um tamanho de bloco variável determinou a seleção pelos códigos corretores de erro convolucionais para uma maior simplicidade, uma vez que o uso de códigos do tipo BCH era dificultado pela impossibilidade de aplicação da tabela de códigos gerados por elementos primitivos de ordem menor que  $2^{10}$ . O uso de um bloco codificado com tamanho variável e grande implica em polinômios de ordem muito alta tornando o uso de tabelas inviável. Por fim, também limitou-se a potência de transmissão a um patamar máximo, tendo em vista as restrições de sistemas reais.

## 1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O resto deste documento está organizado da seguinte maneira. O Capítulo 2 irá apresentar a fundamentação teórica de diversos conceitos relacionados aos parâmetros envolvidos na otimização proposta nesse trabalho. No Capítulo 3 será apresentado o modelo do sistema baseado nas diferentes fontes de consumo de energia envolvidas na comunicação entre os nós, nas estatísticas que apontam para as retransmissões permitidas e a totalização do consumo envolvendo os dois lados da comunicação. Além disso será apresentado o equacionamento para estabelecimento da latência máxima usada no trabalho. Já o Capítulo 4 apresentará os resultados numéricos obtidos, enquanto no Capítulo 5 estará a conclusão do documento, incluindo comentários e considerações.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos envolvidos neste trabalho, como as redes de sensores sem fio, a aplicação de técnicas de modulação do sinal, o uso de códigos corretores de erro convolucionais, o método de retransmissões de mensagens empregado e sistemas limitados em atraso e confiabilidade. Todos estes conceitos estão envolvidos no modelo do sistema apresentado no Capítulo 3.

### 2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO

Com a redução de custos e miniaturização dos componentes eletrônicos tornou-se possível criar equipamentos muito pequenos para aplicação nos mais diversos tipos de sensoriamentos. Esses dispositivos não são capazes apenas de monitorar fenômenos, mas também podem se comunicar e interagir uns com os outros para transferir a informação em questão, sendo que em uma WSN essa comunicação é feita através do meio sem fio (AKYILDIZ et al., 2002b). Uma rede de sensores normalmente possui uma grande quantidade de nós sensores dispostos ao longo de uma região, que devido ao seu pequeno tamanho permitem uma rápida implantação, além de assumirem diferentes topologias, pois podem se auto organizar para formar a rede. Todas as características de uma WSN permitem sua aplicação nas mais diversas áreas, indo do uso militar (ĐURIŠIĆ et al., 2012) ou monitoramento de habitats (MAINWARING et al., 2002), onde a presença de humanos não é permitida, até a aplicação residencial, com monitoramento de estruturas (KIM et al., 2007) ou da saúde de pacientes (MILENKOVIĆ et al., 2006).

No início de sua disseminação, as redes de sensores apresentavam como principal preocupação a economia de energia, enquanto o foco em altas exigências de QoS (do inglês, *Quality of Service*) ficava restrito às redes convencionais (AKYILDIZ et al., 2002a). Entretanto este panorama está mudando, uma vez que as WSNs possuem um enorme potencial para melhorar a eficiência de muitos sistemas distribuídos de larga escala em automação industrial, automação residencial, rodovias automatizadas, transporte aéreo e *smart grid* (SADI et al., 2014). Por outro lado, a necessidade de economizar energia e melhorar sua eficiência ainda persiste, visto que devido ao seu tamanho diminuto, os módulos que compõem uma WSN não possuem grandes baterias, além de muitas vezes estarem dispostos em regiões de difícil acesso para realização constante de manutenções.

### 2.1.1 Eficiência Energética em Redes de Sensores Sem Fio

Como existem diferentes aplicações para este tipo de rede, existem diferentes abordagens para melhorar a eficiência energética de maneira a atingir suas requisições específicas (RAULT et al., 2014). Em (SEAH et al., 2009) um estudo é levantado sobre as diversas formas de uso de uma técnica conhecida como *energy harvesting*, através da qual é possível extrair energia do ambiente de diferentes formas, como energia solar, térmica ou mecânica. Outra forma de uso do *harvesting* é extrair energia de outros sinais de telecomunicações que estão no meio (VULLERS et al., 2010).

Outra opção é reduzir a quantidade de informação que trafega pela rede. Com uma técnica conhecida como agregação, é possível fundir dados para selecionar o que transmitir adiante. Assim, fazendo uso de boas técnicas de localização dos nós é possível obter ganhos de energia como observado em (KRISHNAMACHARI et al., 2002). Outro método chamado de codificação de rede aumenta drasticamente a vazão de dados da rede como apresentado em (KATABI et al., 2006), levando à economia de energia. Também é possível usar a compressão de dados, reduzindo o tamanho dos pacotes, otimizando assim o tempo de transmissão e consumindo menos energia (MARCELLONI; VECCHIO, 2008), porém esta técnica é válida desde que a energia consumida para execução do algoritmo de compressão seja menor que a economia durante a transmissão.

A forma como o roteamento é realizado dentro da rede também pode ser explorada para aumentar a eficiência energética. O uso de outro dispositivo como *relay*, bem como seu posicionamento podem ser selecionados para melhorar a eficiência em redes de sensores como mostrado em (ERGEN; VARAIYA, 2006). Ainda em relação ao roteamento (LIU et al., 2012) mostra o uso de métricas que escolhem o caminho baseado na energia disponível em cada nó ou na taxa de consumo de cada dispositivo.

Por último apontam-se as otimizações de rádio, que remetem a otimizações da camada física da comunicação sem fio e que serão exploradas nessa dissertação. Entre as diversas opções nessa categoria é possível ressaltar o uso da comunicação cooperativa com o intuito de criar múltiplas antenas virtualmente, aumentando a diversidade espacial e poupando energia como pode ser observado em (BRANTE et al., 2011; JAYAWEERA, 2006). Em (ROSAS; OBERLI, 2012) mais parâmetros são otimizados, como a ordem de modulação e a relação sinal-ruído. Quando aplicado o uso de códigos corretores de erro estes também podem ser usados de maneira a reduzir o consumo de energia do dispositivo como apresentado por (PELLENZ et al., 2010). Diversos outros métodos podem ser explorados para melhorar a eficiência energética de módulos em uma WSN e

uma descrição mais detalhada de todos eles é apresentada em (RAULT et al., 2014).

### 2.1.2 Sistemas Limitados em Atraso e Confiabilidade

Ainda em (RAULT et al., 2014) é exposto como sistemas SCADA (em inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*), *smart grids*, sistemas de segurança, controle de tráfego, entre outros, apresentam exigências de atraso limite e demandas de QoS. Em WSNs voltadas para o monitoramento e cuidados com a saúde, estas duas limitações também podem ser verificadas. Nesse caso a informação a respeito do estado de saúde do paciente precisa ser entregue ao médico ou um hospital dentro de um tempo limite, da mesma maneira a integridade desses dados precisa ser garantida, devido ao grau de importância da informação.

O agendamento de transmissões para maximizar o tempo de vida da bateria de dispositivos sem fio é explorado por (NUGGEHALLI et al., 2002), levando em consideração um ambiente restrito à atraso com um esquema de recuperação de energia nos momentos de inatividade do dispositivo. A eficiência energética também é investigada em (CHEN et al., 2013), considerando um ambiente restrito em atraso, onde os resultados apontaram para um grande impacto dessa limitação sobre a eficiência do sistema. Em (SADI et al., 2014) o problema explorado visa a minimização do consumo de energia de um sistema de controle operando através de uma rede sem fio, enquanto cumpre as limitações de tempo e confiabilidade desse sistema.

Nesta dissertação as restrições de atraso serão estabelecidas por um tempo máximo que a comunicação entre um transmissor e um receptor pode durar, enquanto a confiabilidade será representada uma taxa de erro de quadro (FER, do inglês, *Frame Error Rate*) alvo, a qual o sistema sempre deve respeitar.

## 2.2 PARÂMETROS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

Nesta sessão são apresentados os parâmetros explorados durante a otimização e sua melhor compreensão pode auxiliar no entendimento do modelo que será apresentado no Capítulo 3.

### 2.2.1 SNR

Um parâmetro muito explorado em estudos sobre otimização em comunicações sem fio é a SNR. Normalmente expressada em decibel no campo de telecomunicações, a SNR representa razão entre a potência do sinal,  $P_{signal}$ , emitido por um transmissor e a potência do ruído,  $P_{noise}$ , presente no meio onde a comunicação ocorre. Matematicamente ela é definida como:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{signal}}{P_{noise}}. \quad (1)$$

A SNR varia de acordo com as propriedades estatísticas do canal sem fio em questão e quanto maior for seu valor melhor será para a comunicação, visto que maior será a potência do sinal perante o ruído. Tal aumento na potência do sinal influenciam diretamente a eficiência energética do sistema. Em (ROSAS; OBERLI, 2012), um dos trabalhos levados como base para essa dissertação, o equacionamento para obtenção da SNR média é baseado no desempenho de transmissões fazendo uso de modulações em quadratura (QAM), o qual foi mantido no estudo aqui apresentado e será melhor detalhado na modelagem do sistema.

### 2.2.2 Modulação

O processo de modulação pode ser definido como a codificação de uma mensagem em um modo que torne possível sua transmissão, onde normalmente um sinal em banda base com a mensagem é traduzido para um sinal em banda passante com uma frequência mais alta quando comparado com o primeiro. A modulação pode ser feita através da variação de fase, frequência ou amplitude do sinal em banda passante, chamado de portadora (RAPPAPORT et al., 1996). Atualmente os sistemas sem fio fazem uso de esquemas de modulação digital que apresentam diversas vantagens perante as técnicas analógicas, entre elas a facilidade de criptografia e a possibilidade de um uso mais eficiente do espectro (GOLDSMITH, 2005).

Esta dissertação estabeleceu como um dos objetivos a otimização da ordem de modulação da comunicação e para isso determinou o uso da modulação em quadratura M-QAM, baseado na afirmação de (CUI et al., 2005) de que esta modulação possui desempenho melhor em ambientes reais. Conforme será apresentado adiante, as variações na ordem de modulação fazem com que a quantidade de bits enviados varie, impactando

diretamente no consumo energético do sistema, já que quanto maior a quantidade de bits, maior a potência necessária para transmissão. De toda a forma, os resultados podem ser aplicados para qualquer outro esquema de modulação em que a taxa de erro de símbolo possa ser escrita na mesma forma em um canal AWGN, conforme apresentado em (ROSAS; OBERLI, 2012).

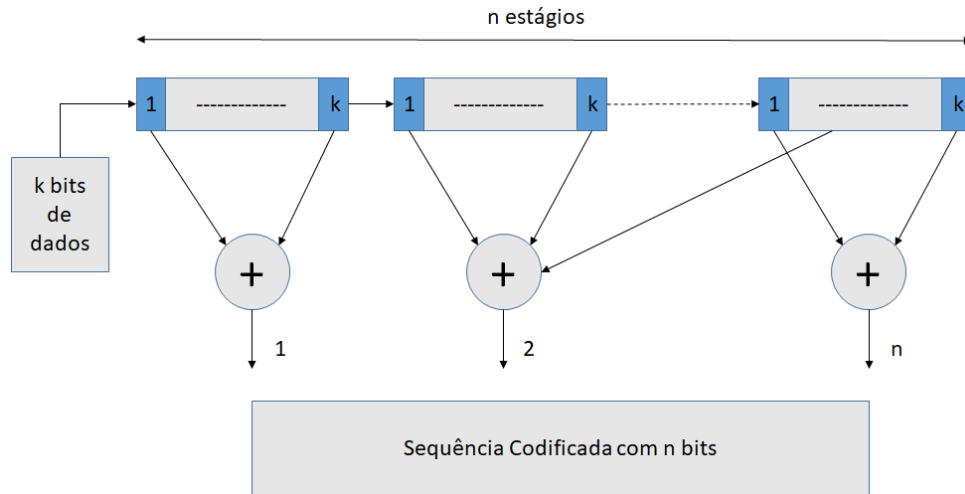
### 2.2.3 Códigos Convolucionais

A principal razão para o uso de técnicas de detecção e correção de erros é inserir redundâncias nos dados transmitidos, reduzindo a probabilidade de erro de bit ou de bloco e melhorando assim o desempenho da comunicação (RAPPAPORT et al., 1996). A codificação também pode ser considerada como a incorporação dos pontos de constelação de um sinal em um espaço dimensional de sinalização maior do que o necessário para a comunicação. Ao fazer uso de um espaço dimensional maior a distância entre os pontos dessa constelação aumenta e isso permite uma melhor identificação e correção dos erros (GOLDSMITH, 2005).

A codificação em bloco permite um número limitado de detecções e correções, sendo normalmente utilizado para melhorar o desempenho de um sistema de comunicação quando outras técnicas não são possíveis, como o uso de um bom demodulador ou o próprio aumento da potência de transmissão (RAPPAPORT et al., 1996).

Os códigos convolucionais podem ser considerados uma classe especial da codificação em bloco, sendo diferentes na forma como fundamentalmente as sequências de dados não são agrupados em blocos distintos e codificados (VITERBI; OMURA, 2013). Os símbolos codificados que são gerados por um código convolucional são oriundos da passagem dos bits de informação através de um registrador de deslocamento finito e linear. Como pode ser observado na Figura 1 o registrador de deslocamento possui  $n$  estágios com  $k$  bits cada um, onde  $k$  também é o número de bits de informação a serem codificados. O resultado do processo será uma palavra codificada com  $n$  bits de comprimento, resultado dos  $n$  operadores de adição binária existentes para cada estágio do registrador. A taxa de código  $r$  então é determinada pela razão entre  $k$  e  $n$ , ou seja,  $r = k/n$ .

Figura 1 – Diagrama de um codificador convolucional.



Fonte: Autoria própria.

Para realizar a decodificação existem diversas opções como o algoritmo de Fano ou o algoritmo stack, entre outros, porém o mais conhecido e mais utilizado é chamado de algoritmo de Viterbi (LOU, 1995).

#### 2.2.4 Requisição de Repetição Automática (ARQ)

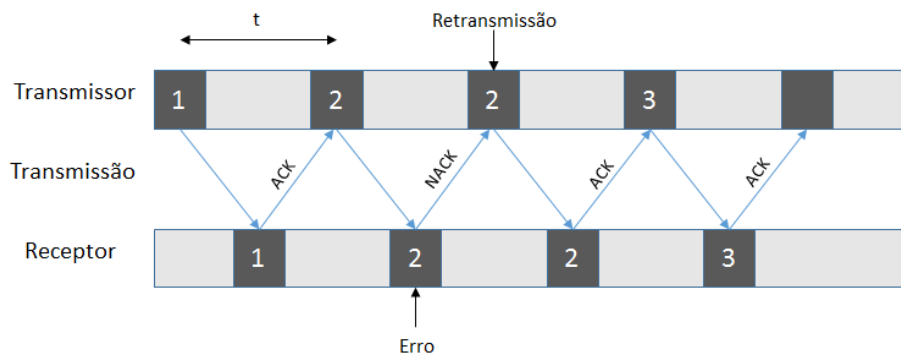
O método conhecido como requisição de resposta automática é utilizado para o controle de erros durante a transmissão de dados. Essa técnica faz uso de pacotes de reconhecimento de entrega conhecidos como ACK (do inglês, *acknowledgement*), a qual é enviada pelo canal de retorno informando ao transmissor que a mensagem recebida está correta. Por outro lado, se o receptor identificar erros, este irá então enviar outro pacote chamado NACK (do inglês, *negative acknowledgement*), permitindo que o transmissor possa reenviar o pacote que apresentou problemas na entrega. Esse processo pode ser melhor compreendido observando o fluxo apresentado na Figura 2. Quando códigos corretores de erro são aplicados juntamente com ARQ caracteriza-se o que é chamado de ARQ híbrido (HARQ) (LIN et al., 1984).

Nesta dissertação será explorado o método mais simples de HARQ, conhecido como HARQ Tipo-I, ou apenas *Simple-HARQ* (S-HARQ). Nessa técnica, quando um pacote de dados é recebido ele é decodificado baseado no código corretor de erro aplicado. O método do S-HARQ é similar ao ARQ, então a Figura 2 também é válida para esse caso. Quando o receptor não conseguir recuperar a mensagem enviada mesmo fazendo uso dos bits de redundância inseridos pelo código corretor, uma mensagem de NACK será

enviada ao transmissor para que um novo pacote seja retransmitido (LIN et al., 1984).

Como citado anteriormente esse trabalho explora ambientes restritos em atraso, onde o número de retransmissões não pode ser ilimitado. Dessa forma é possível exemplificar ao observar a Figura 2, onde nota-se que  $t$  é o tempo entre o envio de um pacote e a recepção da confirmação de entrega. Então, nesse caso, se o tempo limite para entrega de dois pacotes fosse  $2t$  o sistema passaria por uma falha, visto que houve um erro no segundo envio. Em (ROSAS et al., 2016) um estudo é feito sobre a eficiência energética atingível por esquemas HARQ quando a otimização aplicada é apenas sobre a taxa de código do código corretor de erro e quando o número de retransmissões permitidas é considerado sem limites, ou seja, pode tender ao infinito dependendo da condição do canal de comunicação.

**Figura 2 – Esquema de funcionamento de ARQ.**



**Fonte: Autoria própria.**



### 3 DESENVOLVIMENTO

Normalmente um nó sensor possui três componentes básicos: um sistema de aquisição, um sistema de processamento e um sistema sem fio de transmissão de dados (ANASTASI et al., 2009). Para calcular os gastos de energia relacionados a esses componentes básicos é necessário um modelo de consumo que leve em consideração os principais elementos presentes no transmissor e no receptor. Este trabalho considera uma comunicação entre apenas dois nós, ou seja, do tipo ponto-a-ponto, onde para cada pacote enviado pelo transmissor existe um *feedback* devolvido pelo receptor, informando se a transmissão foi bem sucedida ou não. Considera-se que este *feedback* sempre é entregue sem erros, uma vez que normalmente é composto por poucos bits. Portanto, o *feedback* pode ser enviado fazendo uso de um alto índice de redundância ao aplicar um código corretor de erro e o uso de uma baixa taxa de transmissão, levando a uma probabilidade de erro que se aproxima de zero. Além disso considera-se a existência de um número máximo de retransmissões que podem ser realizadas.

A seguir são detalhados os elementos de consumo de energia presentes no modelo considerado, as estatísticas de retransmissão e o equacionamento final para o consumo total de energia por bit que é entregue com sucesso.

#### 3.1 ELEMENTOS DE CONSUMO DE ENERGIA

Levando em consideração um transmissor enviando um pacote e recebendo uma confirmação de *feedback*, os elementos envolvidos no consumo desse dispositivo são especificados a seguir.

##### 3.1.1 Energia de Inicialização

Será considerado que o transmissor normalmente está em modo de economia de energia, chamado de modo *sleep*, e para que possa realizar uma transmissão ele precisa ser inicializado. A quantidade de energia gasta para inicializar o dispositivo depende da arquitetura e dos componentes eletrônicos desse aparelho. Essa energia será denotada por  $\epsilon_{st}$  e por conveniência seu valor será dividido pelo número de bits de *payload* afim de encontrar o consumo por bit.

### 3.1.2 Energia dos Componentes Eletrônicos de Pré-Processamento

Para determinar a energia consumida por alguns componentes leva-se em conta o tempo médio gasto para transmitir ou receber um bit de informação, o qual é definido por  $T_b$ . A duração de tempo para encaminhar um pacote é determinado em (ROSAS et al., 2014) pela soma dos tempos de envio de todos componentes dessa comunicação, onde são eles:  $T_O$  segundos gastos para enviar os sinais de controle, que servem, por exemplo, para realizar estimativas do canal e sincronização,  $T_H$  segundos para enviar o cabeçalho do pacote, que aqui assume-se que é enviado utilizando uma modulação binária e finalmente o tempo para enviar os bits de *payload*,  $T_L$ . Dado que são enviados  $L_P$  bits de *payload* com uma taxa de código  $r$ , resultando em  $L = rL_P$  bits de dados, é possível expressar o tempo médio para enviar um bit de informação como:

$$T_b = \frac{T_L + T_H + T_O}{rL_P}. \quad (2)$$

Considerando que a modulação aplicada na transmissão é de  $M$ -ésima ordem, obtém-se um símbolo de *payload* com  $\log_2(M)$  bits. Determinando  $R_s$  como a taxa de símbolo da comunicação, (ROSAS et al., 2014) reescreve (2) da seguinte maneira:

$$T_b = \frac{1}{rR_s} \left( \frac{1}{\log_2(M)} + \frac{L_H + L_O}{L_P} \right), \quad (3)$$

Onde  $L_H$ ,  $L_O$  e  $L_P$  representam os tamanhos do cabeçalho do pacote, do *overhead* e do *payload*, respectivamente. No primeiro termo em 3 nota-se a divisão por  $\log_2(M)$  que surge para converter o número de símbolos do *payload* em bits, enquanto o segundo termo entre parêntesis representa o cabeçalho e o *overhead* do pacote, cuja transmissão é feita utilizando uma modulação binária, na qual o número de bits é igual ao número de símbolos.

Os componentes eletrônicos responsáveis pelo pré-processamento do sinal no momento da transmissão,  $\epsilon_{el,tx}$ , apresentam um gasto de energia dado por:

$$\epsilon_{el,tx} = P_{el,tx} T_b, \quad (4)$$

em que  $P_{el,tx}$  representa a potência gasta pelos circuitos eletrônicos de transmissão. De forma similar, a energia gasta para processar as mensagens recebidas de confirmação oriundas do outro lado da comunicação,  $\epsilon_{el,rx}$ , são dadas por:

$$\epsilon_{el,rx} = P_{el,rx} T_{fb}, \quad (5)$$

em que  $P_{el,rx}$  representa o consumo eletrônico dos circuitos de recepção e  $T_{fb}$  é referente aos bits que compõem o pacote de *feedback*, que por ser escrito como sendo:

$$T_{fb} = \frac{L_F}{rR_sL_p}, \quad (6)$$

onde  $L_F$  representa o tamanho do pacote de *feedback*.

### 3.1.3 Energia de Irradiação Eletromagnética

A irradiação do sinal apresenta um consumo de energia  $\epsilon_{PA}$  determinado pelo produto da potência dissipada pelo sistema de amplificação  $P_{PA}$  ao longo de um tempo  $T_b$  gasto para transmitir um bit da mensagem. Ou seja,

$$\epsilon_{PA} = P_{PA}T_b, \quad (7)$$

em que o consumo do amplificador de potência pode ser expressado como sendo:

$$P_{PA} = P_{tx} \frac{\xi}{\eta}, \quad (8)$$

onde  $P_{tx}$  é a potência de transmissão,  $\xi$  é a taxa de pico-a-média fornecida na saída do amplificador de potência e  $\eta$  é a eficiência de dreno do mesmo amplificador. Ainda é possível expressar  $P_{PA}$  em função da SNR média  $\bar{\gamma}$ :

$$P_{PA}(\bar{\gamma}) = \frac{\xi A_o \sigma_n^2}{\eta} d^\alpha \bar{\gamma}, \quad (9)$$

em que  $A_o$  é um parâmetro dependente do ganho apresentado pelas antenas de transmissão e recepção, além do comprimento de onda,  $\sigma_n^2$  representa a potência de ruído,  $d$  é a distância na qual se dá a comunicação entre os dois dispositivos, enquanto  $\alpha$  é o expoente de perda de percurso. A potência de ruído ainda pode ser definida por:

$$\sigma_n^2 = N_0 W N_f M_l, \quad (10)$$

em que  $N_0$  é a densidade espectral de potência do ruído,  $W$  é a largura de banda para transmissão,  $N_f$  é a figura de ruído presente na entrada do receptor e por fim  $M_l$  é a margem inserida na comunicação como garantia perante qualquer outro tipo de interferência ou ruído aditivo que possa estar presente.

### 3.1.4 Energia de Codificação e Decodificação em Banda Base

Os últimos elementos presentes no modelo são a energia de decodificação e codificação do código corretor de erro usado. Durante o processo de codificação são necessárias  $J$  diferentes tipos de operações aritméticas por  $n_j^{enc}(r)$  vezes, consumindo uma energia  $\epsilon_j$ . Dessa forma a energia consumida para codificar um frame é dada por:

$$\epsilon_{enc} = \sum_{j=1}^J \epsilon_j n_j^{enc} \cdot (r) \quad (11)$$

Uma vez que uma unidade de processamento aritmético (UPA) realiza as operações, é possível modelar o consumo de energia da  $j$ -ésima operação como  $\epsilon_j = V_{dd} I_0 \Delta t_j$ , onde  $V_{dd}$  é a tensão de operação da UPA e  $I_0$  é a corrente média durante o tempo de execução da operação,  $\Delta t_j$ , da  $j$ -ésima operação aritmética, o qual depende da frequência de operação da unidade de processamento,  $f_{UPA}$ , e o número de pulsos de *clock*,  $c_j$ , exigidos. Sendo assim o tempo de execução da  $j$ -ésima operação é dado por  $\Delta t_j = c_j / f_{UPA}$  (ROSAS et al., 2016). Realizando as substituições na equação (11) é possível encontrar a energia de codificação normalizada por bit,  $\epsilon_{enc}$ , ao dividir esta pelo número de bits de dados:

$$\epsilon_{enc} = \frac{V_{dd} I_0}{r L_P f_{UPA}} \sum_{j=1}^J c_j n_j^{enc} \cdot j(r) \quad (12)$$

Da mesma maneira, partindo de (12), é possível obter o consumo de energia para o processo de decodificação chamado  $\epsilon_{dec}$ , que também é normalizado pelo número de bits de dados e resultando em:

$$\epsilon_{dec} = \frac{V_{dd} I_0}{r L_P f_{UPA}} \sum_{j=1}^J c_j (n_j^{dec} + n_j^{arq}) \quad (13)$$

onde  $n_j^{dec}$  e  $n_j^{arq}$  determinam quantas vezes, para cada tentativa de transmissão, a  $j$ -ésima operação é realizada durante o algoritmo de decodificação e o método de retransmissão, respectivamente.

## 3.2 ESTATÍSTICAS DE RETRANSMISSÃO

Sempre que ocorre um erro o receptor tem a possibilidade de requisitar o reenvio daquela mensagem. Em (ROSAS; OBERLI, 2012) o número de retransmissões possíveis é considerado infinito, refletindo no equacionamento que leva a um número médio de

retransmissões. Com o intuito de estar mais próximo das condições encontradas na prática em um sistema com restrições no tempo de entrega, este estudo irá considerar que o número de transmissões é finito e dado por:

$$\tau = 1 + \sum_{n=1}^K (P_f)^n, \quad (14)$$

onde  $P_f$  representa a probabilidade de erro de pacote durante a  $n$ -ésima retransmissão e  $K$  indica o número máximo de retransmissões permitidas. A probabilidade de erro de pacote varia de acordo com a relação sinal-ruído, pois depende da probabilidade de erro de bit da transmissão do cabeçalho,  $P_{bin}$ , na qual considera-se o uso de uma modulação binária, além da probabilidade de erro de bit relativa a transmissão dos bits de informação,  $P_b$ , onde ambas as taxas de erro são função da SNR média. Dessa forma:

$$P_f(\bar{\gamma}) = [1 - P_{bin}(\bar{\gamma})]^{L_H} [1 - P_b(\bar{\gamma})]^{rL_P}. \quad (15)$$

### 3.3 ENERGIA TOTAL POR BIT ENTREGUE COM SUCESSO

A energia final total gasta para entregar um bit com sucesso ao receptor é apontada pela soma dos componentes de consumo citados anteriormente, levando em conta que as energias de processamento e de transmissão estão relacionadas ao número de retransmissões.

Um enlace de comunicação envolve os dois lados da troca de informações. Por este motivo, é necessário determinar a energia consumida pelo receptor e pelo transmissor para obter a energia total consumida. O transmissor precisa ser inicializado, codificar o pacote e na sequência fazer uso de seus circuitos eletrônicos e de amplificação para realizar o envio dos dados, além de utilizar os circuitos novamente para processar o pacote de *feedback* recebido, sendo que esse último processo pode ser repetido de acordo com o número de retransmissões exigidas. Assim, a energia total consumida pelo transmissor,  $\epsilon_T$ , é dada por:

$$\epsilon_T = \epsilon_{st,tx} + \epsilon_{enc} + [(P_{el,tx} + P_{PA})T_b + P_{el,tx}T_{fb}]\tau. \quad (16)$$

Por outro lado, a equação do consumo do receptor, leva em conta que este é inicializado, decodifica e processa os pacotes enviados pelo transmissor e utiliza seus circuitos para enviar um frame de feedback por um número de vezes necessárias. Portanto,

$$\epsilon_R = \epsilon_{st,rx} + [\epsilon_{dec} + P_{el,rx}T_b + (P_{el,tx} + P_{PA})T_{fb}]\tau. \quad (17)$$

Somando ambos os consumos apresentados por (16) e (17) é possível determinar a energia total consumida por bit entregue com sucesso como sendo:

$$\epsilon_b = C \{S + E_{enc} + [E_{dec} + (P_{el} + P_{PA})T]\tau\}, \quad (18)$$

onde  $S = \epsilon_{st,tx} + \epsilon_{st,rx}$ ,  $E_{enc} = \epsilon_{enc}/rL_p$ ,  $E_{dec} = \epsilon_{dec}/rL_p$ ,  $P_{el} = P_{el,tx} + P_{el,rx}$  e  $T = T_b + T_{fb}$ . Além disso, um custo  $C$  foi inserido para que as transmissões realizadas com sucesso compensem as eventuais perdas de pacotes, uma vez que não existem garantias de que um pacote foi entregue ao longo de um número de retransmissões. Este custo é dado por:

$$C = \frac{1}{1 - P_f^{K+1}}, \quad (19)$$

que representa a razão entre o número total de símbolos transmitidos e o percentual de símbolos entregue com sucesso ao destino.

### 3.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética,  $n_{EE}$ , é definida como a razão entre a taxa líquida transmitida e a energia total consumida durante um determinado intervalo de tempo (LI et al., 2011):

$$n_{EE} = \frac{1}{\epsilon_b} \cdot \frac{rL_p R_s}{(L_H + L_O + L_P + L_F)\tau} \quad (20)$$

### 3.5 RESTRIÇÃO DE ATRASO

Limitações em atraso muitas vezes exigem uma resposta rápida para certos acontecimentos monitorados por sensores ou envio de dados, dessa forma o tempo para que uma mensagem seja entregue ao destino deve ser limitado. Essa limitação será determinante no momento da seleção dos melhores parâmetros de comunicação. O tempo que o transmissor leva para entregar um pacote ao receptor é dado por:

$$T_L = \frac{1}{R_s} \left( L_H + L_O + \frac{L}{r \log_2(M)} \right), \quad (21)$$

ao passo que uma confirmação por parte do destinatário que envia um *feedback* com  $L_F$  bits é dado por:

$$T_F = \frac{L_F}{R_s}. \quad (22)$$

Portanto, o tempo total gasto na comunicação entre origem e destino, com

confirmação de entrega, é dada por:

$$\begin{aligned} T_T &= T_L + T_F \\ &= \frac{1}{R_s} \left( L_F + L_H + L_O + \frac{L}{r \log_2(M)} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

A primeira restrição de tempo que pode ser inserida diz respeito ao tempo máximo gasto para realizar a comunicação. Tendo em vista que os pacotes de *feedback* são transmitidos com taxa fixa e apenas a transmissão direta tem sua taxa que pode ser adaptada, o tempo máximo de duração da comunicação é dado por  $T_{Tmax} = T_F + T_{Lmax}$ . Assim, o tempo máximo para envio e confirmação de entrega de um pacote com  $L$  bits de informação chamado  $T_{Tmax}$  é obtido através da seguinte equação:

$$T_{Tmax} = \frac{1}{R_s} \left( L_F + L_H + L_O + \frac{L}{r_{min} \log_2(M_{min})} \right), \quad (24)$$

onde quanto menor a taxa de codificação  $r_{min}$  e a ordem da modulação,  $M_{min}$ , mais lenta será a comunicação.

## 4 RESULTADOS NUMÉRICOS

As simulações foram realizadas considerando um cenário com desvanecimento do tipo Rayleigh, utilizando o método de busca exaustiva para realizar as otimizações. Em um sistema com restrição de atraso, o tempo disponível para enviar mensagens normalmente se torna pequeno, dessa forma, é possível considerar que durante o intervalo de tempo em que se dá a comunicação o desvanecimento é sempre o mesmo, ou seja, utilizou-se o que é chamado de desvanecimento em bloco. Uma taxa de erro de pacote (FER) alvo também foi inserida como restrição para representar o grau de confiabilidade exigido na comunicação, e avaliar seu impacto na minimização do consumo. Para aproximar as simulações de um caso real foram utilizados parâmetros de dispositivos sem fio de baixa potência e comumente utilizados na prática em redes de sensores sem fio. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados, baseando-se na tabela encontrada em (ROSAS et al., 2016).

### 4.1 EXPLORANDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA

Em um primeiro instante avaliou-se um caso sem retransmissões, ou seja, considerando  $\tau = 1$  em em (14). A Figura 3 apresenta a energia consumida para diferentes ordens de modulação, fazendo uso de códigos corretores de erro convolucionais, considerando otimização de SNR e taxa e código, porém sendo permitida apenas a primeira transmissão sem nenhuma retransmissão. Com isso é possível perceber o impacto da restrição de confiabilidade, bem como o efeito das variações na ordem de modulação aplicada. À medida que é inserida uma FER alvo menor, o consumo tende a aumentar mais rapidamente, pois os parâmetros selecionados para garantir a entrega, por melhores que sejam, demandam maiores gastos de energia para garantir que a taxa de erro esteja dentro da restrição estabelecida. Para comparação, em (ROSAS et al., 2014) e (ROSAS et al., 2016) as simulações consideram que o tamanho do bloco codificado é fixo, enquanto o tamanho da palavra de informação é variável. Objetivando aproximar os resultados simulados dos encontrados em um ambiente real, ou seja, aquele encontrado na prática, este trabalho considerou que os bits de informação tem seu tamanho fixado em 100 bits e o bloco codificado é variável de acordo com as alterações na taxa.



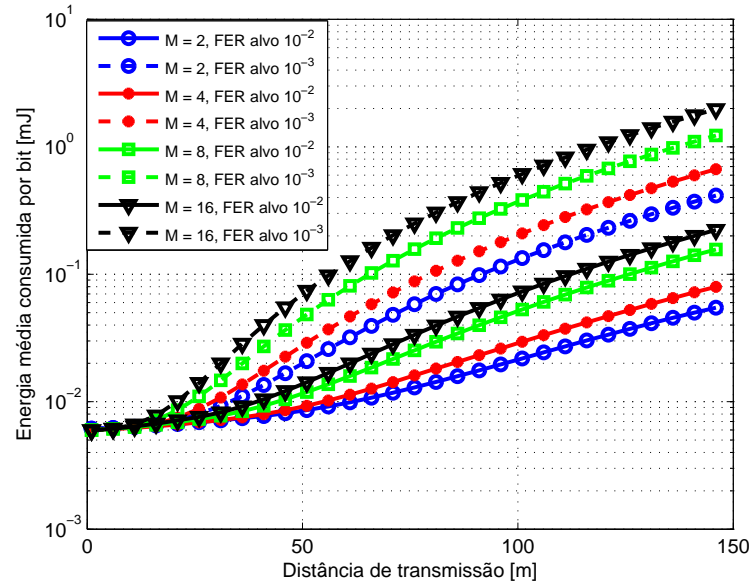
**Tabela 1 – Parâmetros de um dispositivo sem fio de baixa potência**

Descrição	Valor
Dados de Informação de um Pacote ( $L$ )	100 bits
Tamanho do Cabeçalho de Pacote ( $L_H$ )	2 bytes
<i>Overhead</i> ( $L_O$ )	5 bytes
Tamanho da Mensagem de <i>Feedback</i> ( $L_F$ )	11 bytes
Largura de Banda ( $W$ )	1 MHz
Taxa de Símbolo ( $R_s$ )	125 kBaud
Tempo de Inicialização ( $T_{st}$ )	20 ms
Coefficiente de Perda de Percurso ( $\alpha$ )	3,2
Perda de Percurso no Espaço Livre ( $A_0$ )	30 dB
Máxima Eficiência do Amplificador de Potência ( $n_{max}$ )	0,785
Consumo dos Componentes Eletrônicos de Tx ( $P_{el,tx}$ )	11,2 mW
Consumo dos Componentes Eletrônicos de Rx ( $P_{el,rx}$ )	16,6 mW
Densidade Espectral de Potência de Ruído ( $N_0$ )	-174 dBm/Hz
Figura de Ruído no Receptor ( $N_f$ )	4,4 dB
Margem de enlace ( $M_l$ )	30 dB
Frequência da UPA ( $f_{UPA}$ )	20 MHz
Tensão da UPA ( $V_{dd}$ )	3 V
Corrente Média ( $I_0$ )	6,37 mA

**Fonte:** (ROSAS et al., 2016)

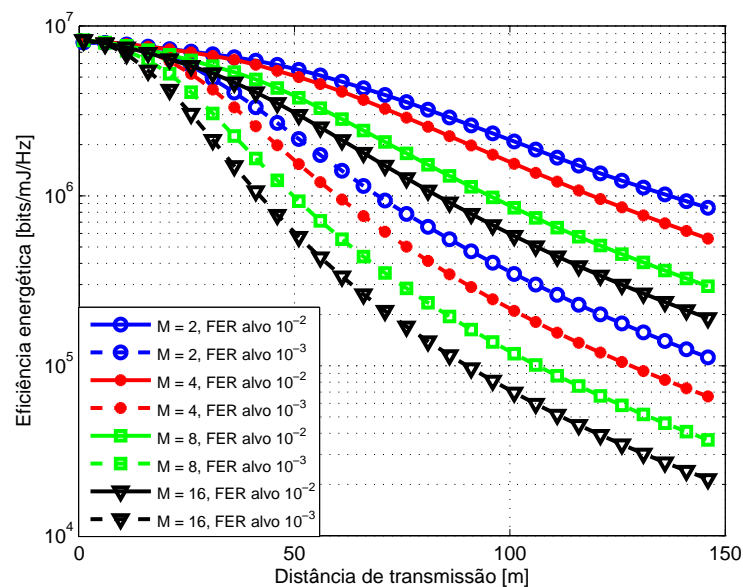
Para a Figura 3 traçou-se a energia consumida para cada ordem de modulação para uma melhor visualização do impacto no consumo, entretanto também é possível otimizar esse parâmetro como será observado adiante. Para maiores distâncias de comunicação entre os nós, as escolhas ótimas devem ser as menores ordens de modulação, pois a essas distâncias a potência dissipada para transmissão é dominante sobre os componentes eletrônicos. Quando a comunicação ocorre em curtas distâncias é possível utilizar taxas maiores ( $M$  maior), pois o consumo dos componentes eletrônicos domina sobre o consumo da irradiação (ROSAS; OBERLI, 2012).

Figura 3 – Energia consumida para entregar um bit com sucesso com otimização de SNR e taxa de código para diferentes ordens de modulação ( $M$ ) e valores de FER alvo. A palavra de informação foi considerada fixa, enquanto o bloco codificado variava seu tamanho, sem limitação de atraso.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4 – Eficiência energética com otimização de SNR e taxa de código para diferentes ordens de modulação ( $M$ ) e valores de FER alvo. A palavra de informação foi considerada fixa, enquanto o bloco codificado variava seu tamanho, sem limitação de atraso.



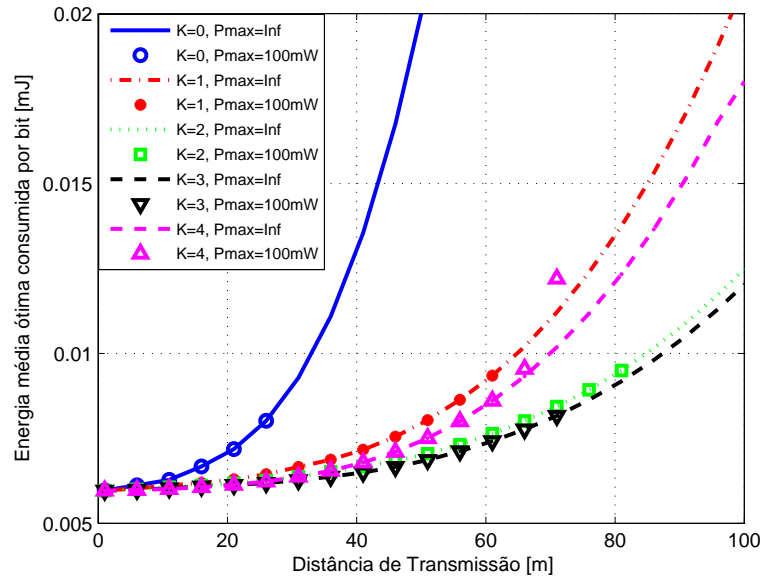
Fonte: Autoria própria.

Da mesma maneira é possível observar na Figura 4 que aumentar a confiabilidade do sistema, bem como elevar a constelação utilizada e a distância de comunicação implicam em reduções na eficiência energética, o que está de acordo com o aumento no consumo nessas mesmas situações conforme apresentado na Figura 3.

## 4.2 OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS

O uso códigos corretores de erro implica na consideração de  $E_{enc}$  e  $E_{dec}$  na Equação (18). Em um primeiro momento imagina-se um natural aumento no consumo em geral, devido aos gastos com a codificação e decodificação dos pacotes. Porém, ao utilizar códigos corretores de erro, é possível selecionar as melhores opções de taxa de código de acordo com a situação, para fazer com que a energia consumida para garantir a entrega daquele bit possa ser reduzida ainda mais, mesmo quando o tamanho do bloco codificado pode continuar crescendo como no caso explorado nesse estudo. Conforme descrito anteriormente, outra ferramenta utilizada em comunicações para reduzir o impacto de retransmissões é a técnica de S-HARQ, onde o receptor usa o código corretor para decifrar a mensagem recebida e, em caso de erro na decodificação, requisita uma nova versão daquela mensagem para o transmissor. Em todas as simulações adiante considera-se o uso do S-HARQ, permitindo que o consumo por bit entregue com sucesso seja reduzido ainda mais, visto que a chance de errar uma vez pode ser bem administrada pelas seleções da otimização de maneira a garantir uma melhora na eficiência. Além do mais como o intuito desse trabalho é explorar sistemas limitados em atraso é de extrema importância avaliar o impacto do número de retransmissões na comunicação.

Figura 5 – Energia ótima consumida para entregar um bit com sucesso ao variar o número de retransmissões, utilizando uma FER alvo de  $10^{-3}$ , S-HARQ e códigos convolucionais com a palavra de informação fixada em 100 bits, além de restrição de atraso de 7,5 ms. A otimização realizada foi de SNR, taxa de código e ordem de modulação.



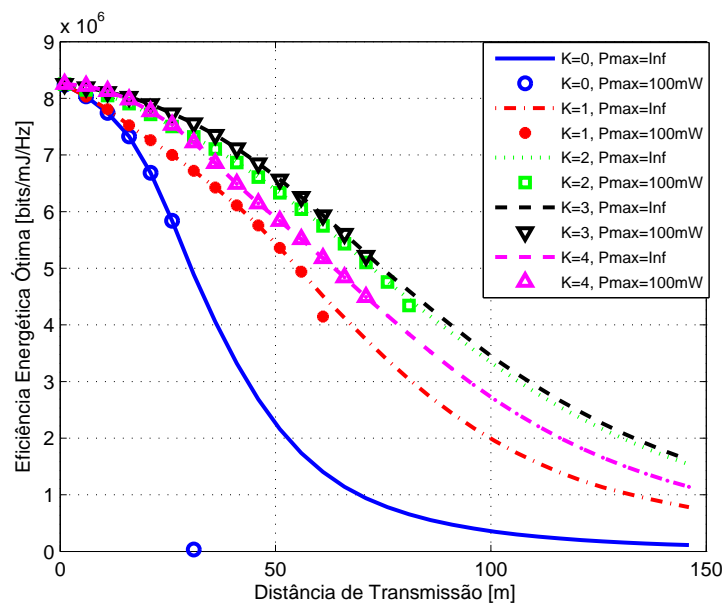
Fonte: Autoria própria.

Para estabelecer um limite de tempo base para a restrição de atraso considerou-se os piores casos de codificação e modulação utilizados durante as simulações, ou seja,  $r_{min} = 0,125$  e  $M = 2$ , resultando em um tempo total de aproximadamente 7,5 ms a partir da equação (24), valor este que foi utilizado como referência para a realização das simulações. Além disso determinou-se uma FER alvo de  $10^{-3}$  para as simulações realizadas adiante. A Figura 5 apresenta os ótimos valores de consumo de energia alcançados através da otimização da ordem de modulação, da taxa de código e SNR, para diferentes valores para o número máximo de retransmissões  $K$ , considerando que o dispositivo apresenta uma fonte de energia ilimitada para operar e também um caso onde a potência disponível para transmissão é limitada a 100 mW, valor entre os especificados pelos padrões da IEEE conforme pode ser observado em (FERRO; POTORTI, 2005). Um maior número de retransmissões permitidas facilita o gerenciamento do consumo do sistema, entretanto, quando o tempo para realizar a comunicação começa a se tornar reduzido, um número maior de retransmissões permitidas passa a não ser mais vantajoso, como observado para a curva quando  $K = 4$ . Tal fato ocorre porque com  $K = 4$  o tempo disponível para cada retransmissão é menor se comparado aos outros casos no qual o  $K$  é menor e isso pode implicar em uma obrigação de transmitir, por exemplo, com ordens de modulação

mais altas para longas distâncias, devido ao tempo limite para realizar a entrega estar se esgotando. Altas taxas de comunicação para longas distâncias resultam em mais erros de entrega e conseqüentemente maiores gastos de energia para continuar retransmitindo.

Ainda na Figura 5 observa-se a adição de uma potência limite de 100 mW para o dispositivo operar, visto que na prática os nós de uma WSN não possuem uma fonte de energia ilimitada. A limitação da potência reduz as opções de seleção de parâmetros, uma vez que a potência máxima se torna mais uma restrição e isso torna o consumo maior para  $K = 4$ , e quando não aumenta o consumo ao longo de outro valor de  $K$ , ainda assim ela limita a distância na qual a comunicação é viável, representado pela descontinuidade nas curvas comparadas ao caso onde a potência era ilimitada. Em ambas as situações é possível observar que nem sempre aumentar o número de retransmissões disponíveis é a solução para reduzir o consumo quando o sistema exige a entrega dentro de um intervalo de tempo. Com esse resultado percebe-se que além dos parâmetros convencionalmente explorados em otimizações como a SNR, a constelação e taxa de código, também é possível otimizar o número de retransmissões máximas que o sistema pode permitir tomando conhecimento do tempo limite para entregar os dados.

**Figura 6 – Eficiência energética ao variar o número de retransmissões, utilizando uma FER alvo de  $10^{-3}$ , S-HARQ e códigos convolucionais, além de restrição de atraso de 7,5 ms e de potência de 100mW. A otimização presente foi de SNR, taxa de código e ordem de modulação.**



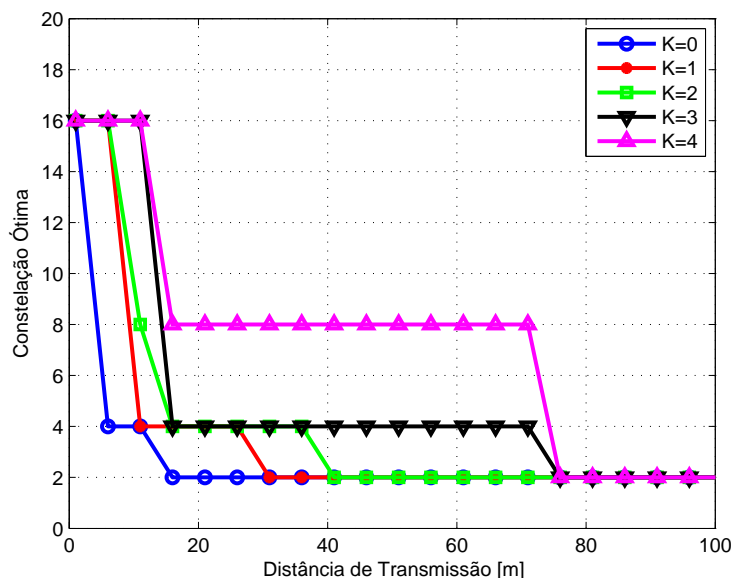
Fonte: Autoria própria.

Sobre a eficiência energética o impacto apresentado é um pouco diferente conforme

mostrado pela Figura 6. As curvas para  $K = 0$  e  $K = 1$  tem o desempenho prejudicado comparados ao caso sem uma potência limite. Nesses casos é necessário reduzir a eficiência para continuar operando de acordo com as restrições até que a comunicação ainda seja viável, porém todos os casos possuem seu alcance afetado pela limitação de potência. Assim como ocorre com a energia consumida, Figura 5, o aumento constante no número de retransmissões não se caracteriza como a melhor escolha do ponto de vista da eficiência energética, com uma nítida piora a partir de  $K = 4$ .

Ainda considerando 7,5 ms como limite de atraso para entrega e  $10^{-3}$  como FER alvo é possível explorar o impacto do número de retransmissões sobre outros parâmetros que são otimizados. Através da Figura 7 é possível observar as melhores escolhas de modulação para a mesma situação e verificar que mais retransmissões permitem o uso de constelações maiores por mais tempo, enquanto o consumo ainda continua sendo reduzido, porém quando o tempo limite de atraso se aproxima e o número de retransmissões permitidas é menor, é necessário reduzir a ordem de modulação para que a entrega seja garantida durante o restante do tempo disponível.

**Figura 7 – Melhores escolhas de constelação, variando o número de retransmissões  $K$ , utilizando uma FER alvo de  $10^{-3}$ , códigos convolucionais com a palavra de informação fixa e o tamanho de bloco variável, restrição de atraso de 7,5 ms, além de potência limite de 100mW.**

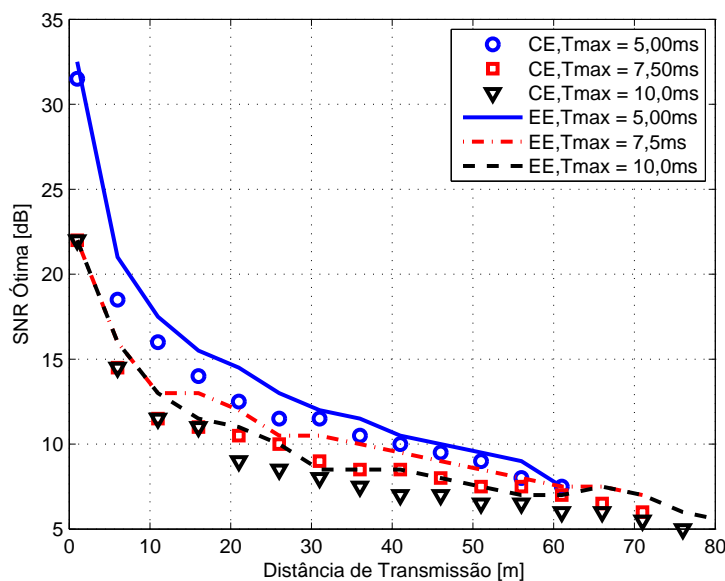


Fonte: Autoria própria.

Na Figura8, observa-se como a otimização da SNR acaba sendo influenciada pela inserção da limitação de atraso na comunicação. Quanto menor o tempo disponível

para entregar o pacote, maiores são os valores ótimos obtidos para a SNR, uma vez que quando o tempo é menor a tendência é dissipar mais potência para a garantir a entrega, consequentemente aumentando a SNR observada no receptor. Partindo-se do mesmo princípio, ao comparar os casos de maximização da eficiência energética e minimização do consumo de energia na Figura 8, verifica-se que ao estabelecer a redução de consumo como foco da otimização os valores de SNR passam a apresentar piores resultados.

**Figura 8 – Melhores escolhas de SNR para otimização de eficiência energética (EE) e consumo de energia (CE) por bit para diferentes restrições de atraso ( $T_{max}$ ).**



**Fonte: Autoria própria.**

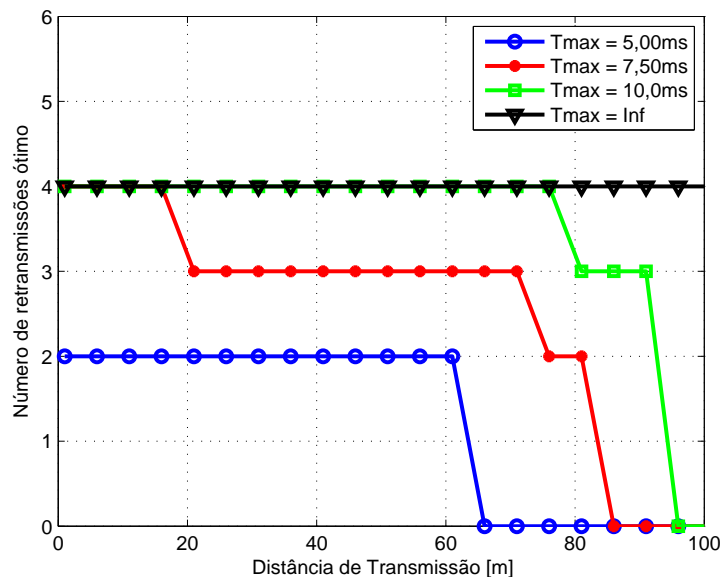
### 4.3 RESTRIÇÃO DO LIMITE DE ATRASO

De acordo com as figuras mostradas até aqui, percebe-se que é possível otimizar o número de retransmissões disponíveis para o transmissor, cuja análise é ilustrada pela Figura 9. Para pequenas distâncias de comunicação o número de retransmissões disponíveis é maior, visto que a troca de pacotes ocorre mais rapidamente, porque é possível utilizar modulações de ordem maior, assim existe mais tempo para tentar mais transmissões, o que significa também que um número de erros maior pode acontecer sem comprometer o consumo, pois a potência dissipada pela irradiação eletromagnética e o amplificador de potência é menor nessa faixa de distâncias (ROSAS et al., 2016). Na medida em que a distância de transmissão aumenta a potência consumida para transmitir os pacotes também aumenta proporcionalmente ao tempo de comunicação, resultando

em um menor número máximo de retransmissões que atenda às restrições de atraso e confiabilidade. Ainda é possível perceber que os valores ótimos para  $K$  coincidem com as curvas que apresentam os melhores valores de consumo e eficiência. A Figura 10 leva em conta o mesmo ambiente, porém para traçar esta curva considerou-se a maximização da eficiência energética apresentada pela equação (20). Nota-se que a diferença entre as Figuras 9 e 10 é muito pequena, onde a minimização do consumo consegue manter um número máximo de retransmissões maior, enquanto a maximização da eficiência reduz o número ótimo de retransmissões em distâncias de comunicação menores, uma vez que nessas regiões de transiente as perdas de dados se torna maiores, prejudicando o *throughput* que é levado em conta na eficiência energética.

Ainda é possível explorar o comportamento do número ótimo de retransmissões permitidas para variações no tempo limite em a troca de dados deve ocorrer. As Figuras 9 e 10 apresentam os ótimos valores de  $K$  para três valores diferentes de  $T_{Tmax}$ , além do caso com ausência de atraso limite. Quando  $T_{Tmax}$  se torna menor, o envio e confirmação de entrega precisa ser feito mais rapidamente enquanto economiza energia. Por outro lado se a limitação de atraso for relaxada os valores de  $K$  podem ser mantidos mais altos por mais tempo, bem como se torna possível estender o alcance do dispositivo transmissor.

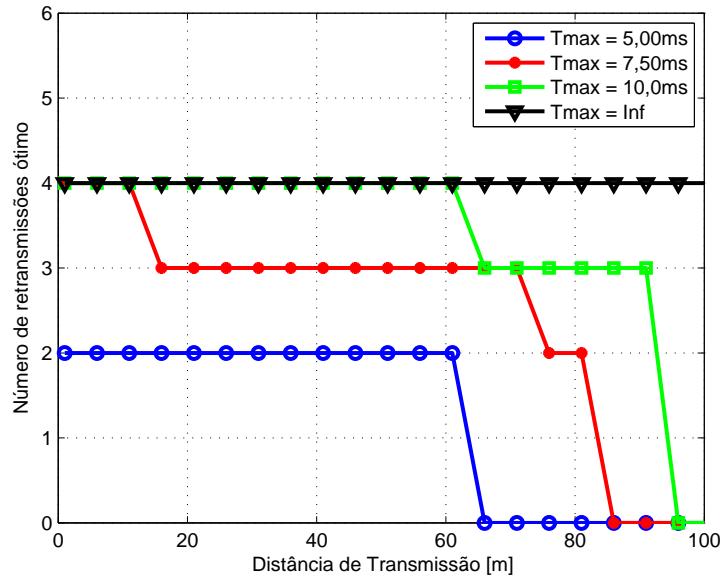
**Figura 9 – Número ótimo de retransmissões, considerando a minimização do consumo de energia para diferentes valores de  $T_{Tmax}$ .**



Fonte: Autoria própria.

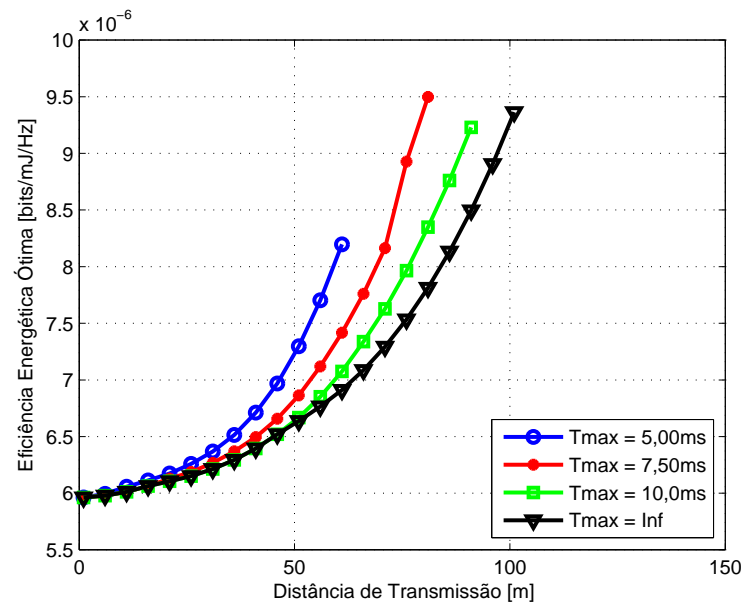


Figura 10 – Número ótimo de retransmissões para diferentes valores de  $T_{Tmax}$  considerando a maximização da eficiência energética.



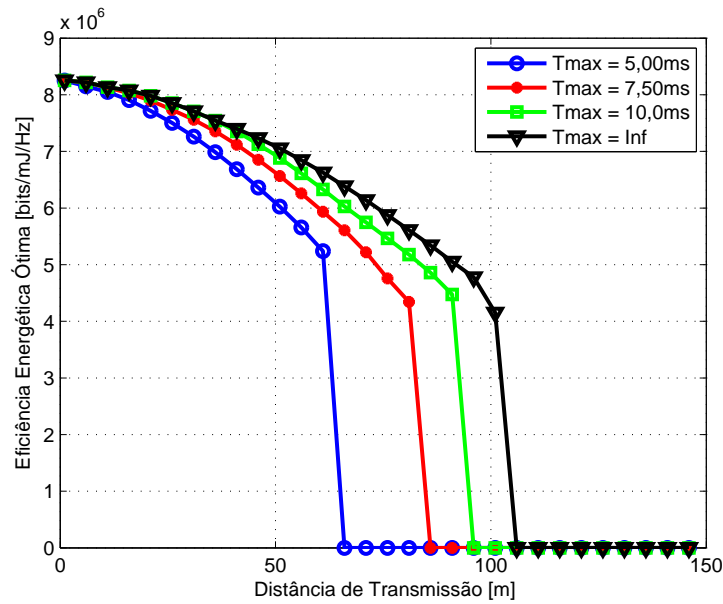
Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – Energia ótima consumida para entregar um bit com sucesso para diferentes valores de  $T_{Tmax}$ . A taxa de erro de *frame* alvo é de  $10^{-3}$  e a potência do dispositivo está limitada em 100mW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – Eficiência energética ótima para diferentes valores de  $T_{Tmax}$ . A taxa de erro de *frame* alvo é de  $10^{-3}$  e a potência do dispositivo está limitada em 100mW.



Fonte: Autoria própria.

Observou-se que com um limite de atraso fixo, ao permitir mais transmissões, é possível reduzir o consumo de energia até um determinado valor de  $K$ . Com isso, ao avaliar a Figura 11 que apresenta o consumo ótimo de energia por bit entregue, observa-se que aumentar o tempo de atraso, ou seja, oferecer mais tempo para o dispositivo se comunicar e, conseqüentemente, usar mais retransmissões como apresentado na Figura 9, o sistema se torna mais econômico. Ao aumentar o atraso máximo permitido estende-se o alcance do dispositivo e conseqüentemente ele necessitará de mais energia de irradiação para longas distâncias, entretanto mesmo assim um tempo de atraso maior ainda permite um ganho em economia. Com isso verifica-se que a escolha do limite de atraso do sistema restrito em tempo fará com que este enlace se torne mais econômico quando tal tempo for maior e menos econômico quanto menor for o tempo de atraso permitido.

Analisando a Figura 12 nota-se que ao exigir mais do sistema, diminuindo o tempo limite de atraso permitido na entrega do pacote, a eficiência energética também é comprometida, ao passo que, como observado até aqui, um menor tempo faz com que os gastos de energia aumentem com o intuito de garantir a entrega, certificando-se que as restrições sejam todas respeitadas dentro desse tempo limite.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho são estudados os efeitos da otimização de parâmetros como modulação, SNR, taxa de código e principalmente o número de retransmissões, em um ambiente que remete a uma comunicação entre dois dispositivos de baixa potência, operando em uma rede sem fio que apresenta restrições de atraso e confiabilidade. O estudo leva em consideração um canal do tipo Rayleigh e o uso de códigos convolucionais. A otimização é feita com o intuito de reduzir o consumo de energia ou maximizar a eficiência energética dos nós envolvidos em uma troca de informação, que nessa dissertação é avaliada para diferentes distâncias de comunicação.

Para representar a operação em um sistema com limitações de atraso na entrega de mensagens, inseriu-se estatísticas de retransmissão que apontam para um número limitado de retransmissões possíveis dentro do período de tempo que o sistema tolera, o que impacta diretamente nos resultados atingíveis de economia de energia ou aumento de eficiência. O consumo do transmissor e do receptor é modelado baseando-se nos principais componentes de consumo de dispositivos de baixa potência e nas tentativas de retransmissão dos pacotes entregues com erro. É apresentado o equacionamento para determinar o tempo total de duração da troca de um pacote entre dois nós, a partir do qual é inserida uma restrição de tempo no sistema, baseada nos parâmetros de comunicação usados na simulação que levam a comunicação mais lenta possível dentro do ambiente simulado. A confiabilidade de entrega dos dados é representada pela consideração de uma FER alvo, que interfere diretamente no consumo da comunicação, não obstante ainda é adicionada uma limitação de potência na comunicação para aproximar-se mais de um caso prático.

Os resultados demonstram que a limitação de atraso no sistema impacta diretamente nas seleções de parâmetros de comunicação como SNR, ordem de modulação e o próprio número de retransmissões. Também é possível observar que normalmente elevar o número de retransmissões permitidas faz com que o consumo passe a ser reduzido, porém nem sempre aumentar o número de retransmissões possíveis é a melhor alternativa quando existem uma restrição de atraso para a comunicação ocorrer e o objetivo é reduzir o consumo do dispositivo ou maximizar a sua eficiência energética respeitando tal restrição. Ao fazer com que o atraso limite aumente o sistema consegue fazer uso de um número maior de retransmissões para distâncias maiores e inclusive consegue aumentar o alcance do dispositivo, por outro lado a diminuição da atraso máximo gera

o efeito contrário. Verificou-se que a determinação do atraso máximo de um sistema restrito em tempo irá impactar diretamente no consumo que seus enlaces de comunicação irão apresentar. Também observou-se que os resultados desse estudo corroboram com os obtidos por (CHEN et al., 2013), apontando que a existência de métodos que aumentam a confiabilidade da rede impactam de maneira a dificultar a comunicação do ponto de vista energético, visto que ao aumentar a confiabilidade o consumo também passou a aumentar.

Como trabalhos futuros é possível apontar a necessidade de estudo sobre o comportamento dos códigos convolucionais otimizados em em sistema como este, bem como investigar o uso de diferentes técnicas de retransmissões em sistemas com latência de entrega como explorado por (NUGGEHALLI et al., 2002), porém considerando também as otimizações de parâmetros. Em (ROSAS et al., 2016) é avaliado o uso de S-HARQ e *Chase Combining* como técnicas de retransmissão, porém não existem restrições de atraso naquele estudo. Ainda é possível estudar o impacto direto do atraso limite da rede sobre cada um dos parâmetros (SNR, modulação e código corretor), verificando suas relações. Além disso existem muitas relações de troca a serem exploradas, como a relação entre os níveis de potência disponíveis na fonte para variações no atraso permitido, e principalmente o *tradeoff* entre a confiabilidade e a latência, o que pode resultar em curvas que sejam úteis para o projeto de redes sem fio com demandas de ambas as características, através das quais seria possível estimar o quanto seria permitido dedicar para cada exigência.

## REFERÊNCIAS

- AERONAUTICS, R. T. C. for. **Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B)**. RTCA, Incorporated, 2002.
- AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. A survey on sensor networks. **IEEE Communications magazine**, IEEE, v. 40, n. 8, p. 102–114, 2002.
- AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. **Computer networks**, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002.
- ANASTASI, G.; CONTI, M.; FRANCESCO, M. D.; PASSARELLA, A. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. **Ad hoc networks**, Elsevier, v. 7, n. 3, p. 537–568, 2009.
- BRANTE, G. G. de O.; KAKITANI, M. T.; SOUZA, R. D. Energy efficiency analysis of some cooperative and non-cooperative transmission schemes in wireless sensor networks. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 59, n. 10, p. 2671–2677, 2011.
- CHEN, R.; HU, R. Q.; LI, Q.; WU, G. Energy efficiency in a delay constrained wireless network. In: IEEE. **Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE**. 2013. p. 836–841.
- CUI, S.; GOLDSMITH, A. J.; BAHAI, A. Energy-constrained modulation optimization. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 4, n. 5, p. 2349–2360, 2005.
- DROBCZYK, M.; MARTENS, H. A study on low-latency wireless sensing in time-critical satellite applications. In: IEEE. **SENSORS, 2016 IEEE**. 2016. p. 1–3.
- ERGEN, S. C.; VARAIYA, P. Optimal placement of relay nodes for energy efficiency in sensor networks. In: IEEE. **Communications, 2006. ICC'06. IEEE International Conference on**. 2006. v. 8, p. 3473–3479.
- FERRO, E.; POTORTI, F. Bluetooth and wi-fi wireless protocols: a survey and a comparison. **IEEE Wireless Communications**, IEEE, v. 12, n. 1, p. 12–26, 2005.
- GOLDSMITH, A. **Wireless communications**. Cambridge university press, 2005.
- GUTIERREZ, J. **Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks**. IEEE Press: New York, NY, USA, 2006.
- JAYAWEERA, S. K. Virtual mimo-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks. **IEEE Transactions on wireless communications**, IEEE, v. 5, n. 5, p. 984–989, 2006.

- 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**, IEEE, v. 13, n. 4, p. 584–616, 2011.
- KATABI, D.; KATTI, S.; HU, W.; RAHUL, H.; MEDARD, M. On practical network coding for wireless environments. In: IEEE. **Communications, 2006 International Zurich Seminar on**. 2006. p. 84–85.
- KIM, S.; PAKZAD, S.; CULLER, D.; DEMMEL, J.; FENVES, G.; GLASER, S.; TURON, M. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. In: ACM. **Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks**. 2007. p. 254–263.
- KRISHNAMACHARI, L.; ESTRIN, D.; WICKER, S. The impact of data aggregation in wireless sensor networks. In: IEEE. **Distributed Computing Systems Workshops, 2002. Proceedings. 22nd International Conference on**. 2002. p. 575–578.
- LI, G. Y.; XU, Z.; XIONG, C.; YANG, C.; ZHANG, S.; CHEN, Y.; XU, S. Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues. **IEEE Wireless Communications**, IEEE, v. 18, n. 6, 2011.
- LI, H.; LAI, L.; POOR, H. V. Multicast routing for decentralized control of cyber physical systems with an application in smart grid. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 30, n. 6, p. 1097–1107, 2012.
- LIN, S.; COSTELLO, D. J.; MILLER, M. J. Automatic-repeat-request error-control schemes. **IEEE Communications magazine**, IEEE, v. 22, n. 12, p. 5–17, 1984.
- LIU, A.; REN, J.; LI, X.; CHEN, Z.; SHEN, X. S. Design principles and improvement of cost function based energy aware routing algorithms for wireless sensor networks. **Computer Networks**, Elsevier, v. 56, n. 7, p. 1951–1967, 2012.
- LOU, H.-L. Implementing the viterbi algorithm. **IEEE Signal processing magazine**, IEEE, v. 12, n. 5, p. 42–52, 1995.
- MAINWARING, A.; CULLER, D.; POLASTRE, J.; SZEWCZYK, R.; ANDERSON, J. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: ACM. **Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications**. 2002. p. 88–97.
- MARCELLONI, F.; VECCHIO, M. A simple algorithm for data compression in wireless sensor networks. **IEEE communications letters**, IEEE, v. 12, n. 6, 2008.
- MENON, M.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D.; SOUZA, F. A. de; PELLENZ, M. E. Energy efficiency and payload size optimization for wireless sensor networks employing convolutional coding. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 32, n. 1, 2017.
- MILENKOVIĆ, A.; OTTO, C.; JOVANOVIĆ, E. Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation. **Computer communications**, Elsevier, v. 29, n. 13, p. 2521–2533, 2006.

- NUGGEHALLI, P.; SRINIVASAN, V.; RAO, R. R. Delay constrained energy efficient transmission strategies for wireless devices. In: IEEE. **INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE**. 2002. v. 3, p. 1765–1772.
- PELLENZ, M. E.; SOUZA, R. D.; FONSECA, M. S. P. Error control coding in wireless sensor networks. **Telecommunication Systems**, Springer, v. 44, n. 1, p. 61–68, 2010.
- RAPPAPORT, T. S. et al. **Wireless communications: principles and practice**. Prentice Hall PTR New Jersey, 1996.
- RASHID, B.; REHMANI, M. H. Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, Elsevier, v. 60, p. 192–219, 2016.
- RAULT, T.; BOUABDALLAH, A.; CHALLAL, Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. **Computer Networks**, Elsevier, v. 67, p. 104–122, 2014.
- ROSAS, F.; BRANTE, G.; SOUZA, R. D.; OBERLI, C. Optimizing the code rate for achieving energy-efficient wireless communications. In: IEEE. **Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE**. 2014. p. 775–780.
- ROSAS, F.; OBERLI, C. Modulation and SNR optimization for achieving energy-efficient communications over short-range fading channels. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 11, n. 12, p. 4286–4295, 2012.
- ROSAS, F.; SOUZA, R. D.; PELLENZ, M. E.; OBERLI, C.; BRANTE, G.; VERHELST, M.; POLLIN, S. Optimizing the code rate of energy-constrained wireless communications with HARQ. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 15, n. 1, p. 191–205, 2016.
- SADI, Y.; ERGEN, S. C.; PARK, P. Minimum energy data transmission for wireless networked control systems. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 13, n. 4, p. 2163–2175, 2014.
- SANKARASUBRAMANIAM, Y.; AKYILDIZ, I. F.; MCLAUGHLIN, S. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks. In: IEEE. **Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on**. 2003. p. 1–8.
- SEAH, W. K.; EU, Z. A.; TAN, H.-P. Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (wsn-heap)-survey and challenges. In: IEEE. **Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on**. 2009. p. 1–5.
- STANOJEV, I.; SIMEONE, O.; BAR-NESS, Y.; KIM, D. H. Energy efficiency of non-collaborative and collaborative hybrid-arq protocols. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 8, n. 1, p. 326–335, 2009.

TANG, V. W.; ZHENG, Y.; CAO, J. An intelligent car park management system based on wireless sensor networks. In: IEEE. **Pervasive Computing and Applications, 2006 1st International Symposium on**. 2006. p. 65–70.

ĐURIŠIĆ, M. P.; TAFA, Z.; DIMIĆ, G.; MILUTINOVIĆ, V. A survey of military applications of wireless sensor networks. In: IEEE. **Embedded Computing (MECO), 2012 Mediterranean Conference on**. 2012. p. 196–199.

VITERBI, A. J.; OMURA, J. K. **Principles of digital communication and coding**. Courier Corporation, 2013.

VULLERS, R. J.; SCHAIJK, R. V.; VISSER, H. J.; PENDERS, J.; HOOFF, C. V. Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks. **IEEE Solid-State Circuits Magazine**, IEEE, v. 2, n. 2, p. 29–38, 2010.

WALTER, M.; EILEBRECHT, B.; WARTZEK, T.; LEONHARDT, S. The smart car seat: personalized monitoring of vital signs in automotive applications. **Personal and Ubiquitous Computing**, Springer, v. 15, n. 7, p. 707–715, 2011.

WILLIG, A. Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. **IEEE Transactions on industrial informatics**, IEEE, v. 4, n. 2, p. 102–124, 2008.