

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

**JORGE FELIPE GRYBOSI**

***AGE OF INFORMATION: PONTUALIDADE DA INFORMAÇÃO  
EM APLICAÇÕES DE MONITORAMENTO REMOTO***

**TESE**

**CURITIBA**

**2022**

**JORGE FELIPE GRYBOSI**

***AGE OF INFORMATION: PONTUALIDADE DA INFORMAÇÃO  
EM APLICAÇÕES DE MONITORAMENTO REMOTO***

**Age of Information: Information Freshness  
in Remote Monitoring Applications**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial(CPGEI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito à obtenção do título de "Doutor em Ciências" - Área de concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Rebelatto  
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.



JORGE FELIPE GRYBOSI

**AGE OF INFORMATION: PONTUALIDADE DA INFORMAÇÃO EM APLICAÇÕES DE MONITORAMENTO REMOTO**

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

Data de aprovação: 19 de Dezembro de 2022

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

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

Dr. Guilherme De Santi Peron, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Marcelo Eduardo Pellenz, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

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 19/12/2022.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que desde 2011 proporcionou-me um ambiente acolhedor, de desenvolvimento pessoal e profissional incomparável. Do mesmo modo, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI) pela oportunidade e por demonstrar a responsabilidade e o papel do professor e pesquisador para que a sociedade evolua de forma sustentável. Adicionalmente, agradeço à CAPES pelo auxílio financeiro no período do doutorado.

Agradeço ao meu orientador, Professor João Luiz Rebelatto, pela incansável e exemplar disponibilidade, pela amizade e sinceridade. Ao meu coorientador Professor Guilherme Luiz Moritz, pela receptividade e pelo grande apoio durante o Mestrado. Agradeço a todos os professores, os amigos e colegas que de qualquer forma auxiliaram a renovar as energias nos momentos em que não haviam mais respostas.

Finalmente, meu sincero agradecimento à minha família. Primeiramente à minha esposa Lilian, pela compreensão durante os diversos momentos do Doutorado e da vida. Agradeço a meus pais, que sempre entenderam e ensinaram a importância do conhecimento e sabedoria para o crescimento pessoal.

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

“I could tell you my adventures — beginning from this morning, said Alice a little timidly; but it’s no use going back to yesterday, because I was a different person then.” (Lewis Carroll).

## RESUMO

GRYBOSI, Jorge Felipe. **Age of Information: Pontualidade da Informação em Aplicações de Monitoramento Remoto**. 2022. 66 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

Este trabalho propõe a utilização da métrica AoI (do inglês *Age of Information*) como critério para avaliar o quão recente é a informação obtida no destino com relação ao processo monitorado em uma fonte. Essa ferramenta tornou-se relevante no contexto de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*), pois, em contraste com métricas tradicionais como *throughput* e *delay*, permite quantificar a importância de uma mensagem com relação à novidade e pontualidade de seu conteúdo. Atualizar o destino de forma pontual implica em utilizar os recursos disponíveis na rede da melhor forma possível para garantir um desempenho aceitável. Ao longo do trabalho, são abordados dois contextos de aplicação da métrica em conjunto com análises numéricas e analíticas, verificando os parâmetros que podem ser otimizados para em média obter-se uma melhor AoI. O primeiro cenário compreende avaliar o compromisso entre energia consumida e a AoI média, considerando uma fonte atualizando um destino utilizando retransmissões. De forma complementar, a proposta de utilizar diversidade na recepção em conjunto com a replicação de mensagens apresentou um compromisso melhor entre a energia utilizada nas transmissões e a AoI média obtida no destino. Na sequência é apresentado um cenário mais complexo, onde a AoI média é analisada quando múltiplos dispositivos buscam atualizar um destino em um canal sem fio comum a todos. Portanto, a decodificação de uma mensagem depende, além das características em larga e pequena escala do canal, também da transmissão simultânea de outros dispositivos, o que causa uma colisão e as mensagens transmitidas são perdidas. Buscando recuperar alguns dados mesmo no caso de uma colisão, propõe-se a utilização da técnica de cancelamento sucessivo de interferência (SIC, do inglês *Successive Interference Cancellation*) no destino. Com esse propósito, resultados numéricos e analíticos são apresentados para avaliar as vantagens de tal implementação. Adicionalmente, são apresentadas expressões para a probabilidade de acesso ao canal que minimiza a AoI média da rede. É possível concluir que todas as propostas apresentadas no decorrer do trabalho incorrem em melhorias considerando a AoI média como métrica de desempenho. Ademais, as extensões propostas implicam em processamento adicional apenas no destino, que geralmente não possui limitações de processamento, portanto não incorre em aumento de consumo na fonte, que geralmente possui restrições de consumo/processamento.

**Palavras-chave:** Age of Information. IoT. redes de sensores.

## ABSTRACT

GRYBOSI, Jorge Felipe. **Age of information: Information Freshness in Remote Monitoring Applications**. 2022. 66 p. Thesis (Doctorate in Electrical Engineering and Industrial Informatics) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

This work proposes using the Age of Information (AoI) as a metric to evaluate how fresh is the decoded information at the destination when compared to the monitored process at the information source. This metric became relevant in the Internet of Things (IoT) context, as, in contrast to traditional metrics such as throughput and delay, it quantifies the importance of an update regarding the freshness and timeliness of its content. Timely updating a destination incurs in using the available resources in the network in the best manner to guarantee a reasonable performance. Throughout the work, two application scenarios are presented with numerical and analytical analysis, emphasizing optimization parameters in a remote monitoring network to obtain a better average AoI. The first scenario intends to evaluate the trade-off between average AoI and energy consumption, considering a source that updates a destination adopting retransmissions. In a complementary manner, the proposition of using receive diversity in addition to the diversity gain obtained by the retransmissions presented a better trade-off between the energy used in the transmissions and the average AoI at the destination. The next topic is a more complex scenario, where the average AoI is evaluated when multiple devices update a destination to a common wireless channel. Therefore, the message decoding depends not only on the large and small channel fading aspects but on the simultaneous transmission of other devices, which causes a collision, and all the transmitted messages are lost. Seeking to recover some information even when a collision happens, the Successive Interference Cancellation (SIC) technique is proposed. With this in mind, numerical and analytical results are presented to evaluate the advantages of such an extension. Additionally, closed expressions for the channel access probability that minimizes the network average AoI are presented. It is possible to infer that all the presented extensions throughout the work incur advantages considering the average AoI as a performance metric. Furthermore, the increased processing incurred by the extensions is only on the destination side, which generally has no processing constraints, thus not increasing power consumption on the message source, which often has power/processing restrictions.

**Keywords:** Age of Information. IoT. sensor networks.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de aplicação da AoI, composto por um dispositivo (ED) enviando informações para um monitor (AP) através de uma rede. . . . .	16
Figura 2 – Evolução da AoI em função do tempo contínuo. . . . .	17
Figura 3 – Evolução da AoI para um sistema organizado em <i>time slots</i> . . . . .	18
Figura 4 – Comparação entre AoI, <i>delay</i> e <i>throughput</i> para diferentes valores de carga oferecida, considerando $\mu = 1$ e um modelo M/M/1-FCFS. . . . .	23
Figura 5 – AoI instantânea em função do índice de <i>time slot</i> para um esquema com retransmissões. . . . .	27
Figura 6 – Exemplo da evolução de $K_i$ , para $i = 2$ e considerando $L = 3$ . Em (a) a mensagem gerada no tempo $g_2$ é decodificada corretamente, sem ocorrer preempção ou excedendo o número máximo de retransmissões; Em (b) ocorre preempção no tempo $g_3$ ; Em (c) o número máximo de retransmissões é atingido e a mensagem é descartada. . . . .	33
Figura 7 – AoI média em função da (a) potência de transmissão $P$ , para $p = 0.2$ e (b) probabilidade de geração de mensagens $p$ , para $P = 30$ dBm. . . . .	36
Figura 8 – (a) AoI média em função do número de antenas de recepção e (b) AoI média (eixo esquerdo) e consumo médio (eixo direito) em função do número máximo de retransmissões $L$ . . . . .	36
Figura 9 – Compromisso AoI-energia: (a) valor ótimo de $L$ que minimiza a AoI para uma determinada restrição de potência $P_C$ , para $p = 0.05$ ; e (b) AoI mínima obtida com $L$ otimizado. Para efeitos de comparação, o caso ideal $L \rightarrow \infty$ está ilustrado por uma linha pontilhada preta. . . . .	37
Figura 10 – Relação entre AoI média e potência de transmissão $P$ , para $p = 0.1$ e número máximo de transmissões $L \in \{1,2,4\}$ . . . . .	37
Figura 11 – AoI média em função do número máximo de retransmissões $L$ , para $P = 28$ dBm e taxa de geração de mensagens $p \in \{0.4,0.6\}$ . . . . .	38
Figura 12 – AoI média em função da probabilidade de geração de mensagens $p$ , para $P = 28$ dBm e número máximo de retransmissões $L \in \{1,2,4\}$ . . . . .	39
Figura 13 – Evolução da AoI instantânea em função do índice de <i>time slot</i> para o ED $i$ . . . . .	43
Figura 14 – Relação entre AoI média e probabilidade de acesso ao canal ( $p$ ) para AIRA, ADRA e AIRA-SIC, considerando $P = 20$ dBm e $d_i = 600$ m. . . . .	53
Figura 15 – Probabilidade ótima de acesso ao canal em função da potência de transmissão $P$ . . . . .	53
Figura 16 – AoI média ótima em função da potência de transmissão $P$ , com $N \in \{10, 40\}$ e $d_i = 600$ m, $\forall i$ para os esquemas AIRA, ADRA e AIRA-SIC. . . . .	54
Figura 17 – AoI média ótima em função do número de dispositivos, considerando $P = 20$ dBm para os esquemas AIRA, ADRA e AIRA-SIC com a) $d_i = 600$ m, $\forall i$ ; b) $d_i \in \{500, 600, 715\}$ m. . . . .	54
Figura 18 – AoI média ótima em função de $\sigma_\epsilon^2$ , para $P = 30$ dBm e $N \in \{10,40\}$ . . . . .	55



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### SIGLAS

ACK	confirmação de recebimento, do inglês <i>acknowledgment</i>
ADRA	do inglês <i>Age-Dependent Random Access</i>
AIRA	do inglês <i>Age-Independent Random Access</i>
AoI	do inglês <i>Age of Information</i>
AP	ponto de acesso, do inglês <i>Access Point</i>
ARQ	do inglês <i>Automatic Repeat reQuest</i>
AWGN	ruído aditivo gaussiano, do inglês <i>Additive White Gaussian Noise</i>
CAP	do inglês <i>Channel Access Probability</i>
CRRA	do inglês <i>Collision-Resolution Random Access</i>
CRC	do inglês <i>Cyclic Redundancy Check</i>
CRDSA	do inglês <i>Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA</i>
CSI	do inglês <i>Channel State Information</i>
DSA	do inglês <i>Diversity Slotted ALOHA</i>
D2D	dispositivo-a-dispositivo, do inglês <i>Device-to-Device</i>
ED	do inglês <i>End-Device</i>
FCFS	do inglês <i>First-Come-First-Served</i>
HARQ	protocolo ARQ híbrido, do inglês <i>hybrid ARQ</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
IRSA	do inglês <i>Irregular Repetition Slotted ALOHA</i>
LCFS	do inglês <i>Last-Come-First-Served</i>
mMTC	do inglês <i>massive Machine-Type Communications</i>
MRC	combinação de máxima razão, do inglês <i>Maximal Ratio Combining</i>
NOMA	do inglês <i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>
OMA	do inglês <i>Orthogonal Multiple Access</i>
pdf	função densidade de probabilidade, do inglês <i>probability density function</i>
pmf	função massa de probabilidade, do inglês <i>probability mass function</i>
SC	combinação de seleção, do inglês <i>Selection Combining</i>
SIC	cancelamento sucessivo de interferência, do inglês <i>Successive Interference Cancellation</i>
SNR	relação sinal-ruído, do inglês <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TARQ	do inglês <i>Truncated Automatic Repeat reQuest</i>
UAV	do inglês <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
URLLC	do inglês <i>Ultra-Reliable Low-Latency Communications</i>
TS	do inglês <i>time slot</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	14
<b>2</b>	<b>CONCEITOS PRELIMINARES</b>	<b>15</b>
2.1	MODELO GERAL PARA <i>AGE OF INFORMATION</i>	15
2.1.1	AoI para tempo discreto ( <i>time slots</i> )	18
2.1.2	AoI média da rede	19
2.2	TÉCNICAS DE DIVERSIDADE	19
2.2.1	Probabilidade de <i>outage</i>	19
2.2.2	Diversidade Espacial	20
2.2.3	Diversidade Temporal	21
2.3	<i>AGE OF INFORMATION, THROUGHPUT E DELAY</i>	22
2.4	COMENTÁRIOS	23
<b>3</b>	<b><i>AGE OF INFORMATION</i> COM ARQ TRUNCADO</b>	<b>24</b>
3.1	MODELO DO SISTEMA	25
3.2	TARQ	26
3.3	TARQ COM DIVERSIDADE NA RECEPÇÃO	28
3.4	COMPROMISSO ENTRE AOI E CONSUMO ENERGÉTICO	29
3.5	TARQ-CC: ARQ TRUNCADO COM COMBINAÇÃO DE CHASE	31
3.6	RESULTADOS NUMÉRICOS	34
3.7	COMENTÁRIOS	39
<b>4</b>	<b><i>AGE OF INFORMATION</i> E ACESSO ALEATÓRIO</b>	<b>40</b>
4.1	MODELO DO SISTEMA	42
4.1.1	Probabilidade de <i>outage</i> em um canal livre de colisões	42
4.1.2	<i>Age of Information</i> : AoI média	43
4.2	AOI MÉDIA PARA O ESQUEMA AIRA	45
4.3	AOI MÉDIA PARA O ESQUEMA ADRA	45
4.4	AOI MÉDIA PARA O ESQUEMA AIRA-SIC	46
4.4.1	Otimização da probabilidade de acesso ao canal	50
4.4.2	CSI imperfeita	51
4.5	RESULTADOS NUMÉRICOS	52
4.6	COMENTÁRIOS	55
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>56</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS	57
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A comunicação sem fio é um segmento em constante crescimento na indústria da informação (GOLDSMITH, 2005; CISCO, 2020), principalmente pela necessidade da humanidade em atingir a excelência digital (WIGGBERG *et al.*, 2022) para preservar o ecossistema de forma sustentável (KUTNJAK, 2021). Conforme (VISWANATHAN; MOGENSEN, 2020), os requisitos necessários para que haja uma real interconexão entre os mundos físico, biológico e digital em escala global requer explorar ainda mais esse meio de transmissão.

Essa interconexão entre objetos do cotidiano torna-se cada vez mais parte da realidade humana, principalmente depois do padrão 5G expandir seus serviços para incluir mMTC (do inglês *massive Machine-Type Communications*) e URLLC (do inglês *Ultra-Reliable Low-Latency Communications*) com o objetivo de padronizar a conectividade da Internet das Coisas, IoT (do inglês *Internet of Things*) (3GPP, 2017).

O meio sem fio apresenta uma natureza aleatória, além de ser limitado em espectro (GOLDSMITH, 2005). Dessa forma, para que as demandas da IoT sejam atendidas com tais limitações, soluções são propostas a todo momento para futuramente serem adicionadas aos padrões já estabelecidos. Nesse contexto, formas de avaliar um determinado sistema de comunicação são relevantes para definir e comparar o comportamento de sistemas de comunicação em situações mais próximas à realidade.

Apesar da capacidade do canal sem fio (GOLDSMITH, 2005, Capítulo 4) determinar a máxima taxa que pode ser transmitida em um canal sem fio com uma probabilidade de erro arbitrária, dependendo do escopo/aplicação, outras métricas podem tornar-se relevantes. Dentre as métricas mais estabelecidas na literatura, pode-se citar a *throughput*, ou taxa de transferência efetiva de um sistema, e *delay* ou latência do sistema.

De acordo com (GOLDSMITH, 2005), a *throughput* (geralmente apresentada em bits/s) pode ser definida como a quantidade de informação recebida com sucesso em um determinado intervalo de tempo. Adicionalmente, o *delay* ou latência pode ser definido como o intervalo de tempo entre a geração de uma informação em um ponto da rede e a confirmação de recebimento (ACK, do inglês *acknowledgment*) dos dados.

Conforme apresentado em (SUN *et al.*, 2017), tanto *throughput* quanto latência avaliam sistemas de comunicação com uma visão de dados, de forma que todos os dados possuem a mesma importância na rede. Porém, conforme (MAATOUK *et al.*, 2022; Kaul *et al.*, 2012),

aplicações relacionadas à IoT como gerenciamento de ocupação de vagas em estacionamentos, localização de veículos em sistemas de transporte e monitoramento remoto de ambientes (para prevenção de incêndios, por exemplo) necessitam de métricas que avaliem a importância e pontualidade da informação, no sentido que um pacote é importante na rede apenas se esse traz conteúdo novo e atual ao destino.

Na última década, uma métrica que avalia a pontualidade da informação tornou-se relevante em redes de sensores, denominada AoI, do inglês *Age of Information*. O conceito foi inicialmente apresentado em (KAUL *et al.*, 2011) direcionado à análise de desempenho em redes veiculares, porém mostrou-se importante em diversos setores por conseguir representar as características de uma rede desde a geração até a decodificação da informação.

O conceito de quantificar a idade de uma informação já era abordado em trabalhos como (SONG; LIU, 1990), por exemplo, onde dispositivos adicionam *timestamps* às mensagens para que o destino possa estimar o tempo desde a geração da informação. Porém, a definição formal da AoI como um processo aleatório em (KAUL *et al.*, 2011) e nos trabalhos subsequentes foi o que transformou essa métrica em objeto de estudo e otimização.

Analisando os trabalhos de (SHREEDHAR *et al.*, 2022; BAE; BAEK, 2022), é possível perceber que otimizar um sistema de comunicação de acordo com um critério baseado em AoI implica em obter informações mais atualizadas e utilizando uma ocupação de banda menor, ou seja, utilizando os recursos da rede de forma mais eficiente.

Por esse motivo, a AoI torna-se útil em outras áreas, por exemplo, para avaliar o compromisso entre consumo energético e pontualidade em aplicações com *energy-harvesting* (FENG; YANG, 2021; HATAMI *et al.*, 2021; ZHENG *et al.*, 2021), em ambientes com monitoramento remoto (ELDEEB *et al.*, 2022) e sistemas de controle (KOSTA *et al.*, 2017), as quais podem possuir um tempo de atualização crítico e recursos limitados para realizar transmissões. Em (LIU *et al.*, 2022), por exemplo, o problema de otimização de largura de banda foi investigado em termos de AoI, para que haja garantia de AoI mínima para as informações transmitidas.

Em termos gerais, a AoI vem sendo utilizada como método de avaliação de desempenho em vários cenários de rede, sendo que os modelos analíticos desenvolvidos até o momento baseiam-se em teoria de filas (Yates; Kaul, 2017; YANG *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2020; Gu *et al.*, 2019; YU *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2022), incluindo características do sistema desde a geração até a entrega de mensagens e diferentes configurações de rede, tanto no sentido do *uplink* quanto *downlink* e também incluindo dispositivos cooperativos.

Um cenário onde a AoI é avaliada tanto no *uplink* quanto no *downlink* é apresentado no trabalho (HU; DONG, 2019), em um contexto de transferência de energia sem fio. Nesse caso, o objetivo é obter informações atualizadas em ambos os sentidos da rede, e além disso determinar prioridades na atualização de informações. Adicionalmente, em (LI *et al.*, 2020) a AoI é avaliada em um cenário com transmissões *multicast*, ou seja, onde uma fonte envia dados de forma simultânea para múltiplos destinos.

Outro cenário em que a AoI é utilizada como ferramenta é em redes com dispositivos cooperativos (*relays*) e comunicação dispositivo-a-dispositivo (D2D, do inglês *Device-to-Device*) (Abd-Elmagid; Dhillon, 2019; LI *et al.*, 2021; ZHENG *et al.*, 2021; MIRIDAKIS *et al.*, 2021; PAN *et al.*, 2022a). Em (Abd-Elmagid; Dhillon, 2019), a trajetória de um *relay* UAV (do inglês *Unmanned Aerial Vehicle*) é obtida por meio de um algoritmo que busca minimizar a AoI. Em (MIRIDAKIS *et al.*, 2021) extensões para modelos de canais com desvanecimento Rician em um contexto D2D são apresentadas, incluindo expressões em forma fechada para a AoI.

O cenário abordado no decorrer do trabalho envolve aplicações de monitoramento remoto, ou seja, no sentido do *uplink* da rede. Para referência, em (YATES *et al.*, 2021) é apresentada uma revisão dos trabalhos na área.

Na perspectiva do *uplink*, uma das soluções para reduzir a AoI é utilizar retransmissões para aumentar a ordem de diversidade. De forma a simplificar a implementação e obter baixo custo, os trabalhos (Gu *et al.*, 2019; Chen; Huang, 2016) consideram um esquema de replicação de mensagens, onde o dispositivo retransmite a mesma mensagem indefinidamente até uma nova ser gerada como em (Chen; Huang, 2016), ou um número máximo de retransmissões ser atingido conforme (Gu *et al.*, 2019). Esquemas mais avançados de retransmissão, conhecidos com ARQ (do inglês *Automatic Repeat reQuest*) híbridos - HARQ, são analisados em (NAJM *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2022; CHOI, 2016). Conforme a análise em (Gu *et al.*, 2019), limitar o número máximo de retransmissões traz vantagens também em termos de consumo energético.

Apesar de as propostas em (Chen; Huang, 2016; Gu *et al.*, 2019) incluírem percepções relevantes para melhorar a AoI por meio de retransmissões, essas análises possuem a limitação de apenas uma fonte de mensagens, sendo que redes IoT são compostas por uma quantidade massiva de dispositivos. Para tal, em (Yates; Kaul, 2017) é apresentado um modelo para múltiplas fontes.

Em (Yates; Kaul, 2017) é realizada uma comparação entre acesso aleatório ALOHA e acesso ao meio controlado pelo AP (ponto de acesso, do inglês *Access Point*) em *time slots*.

Apesar dos autores em (Yates; Kaul, 2017) demonstrarem que o acesso ao meio controlado é superior em relação ao acesso aleatório (denominado AIRA, do inglês *Age-Independent Random Access*) em termos de AoI, modelos de acesso descentralizado são mais simples de implementar em redes distribuídas, apresentando um melhor compromisso entre AoI e complexidade de implementação.

Extensões de protocolos de acesso aleatório como o AIRA são analisadas em (MUNARI, 2021), onde um esquema IRSA (do inglês *Irregular Repetition Slotted ALOHA*) é utilizado para recuperar informações que foram retransmitidas. Da mesma forma, em (PAN *et al.*, 2022b) há uma análise da AoI para o protocolo CRRA (do inglês *Collision-Resolution Random Access*).

Também buscando aprimorar o conceito de acesso descentralizado ao meio, em (CHEN *et al.*, 2020) é apresentado o protocolo ADRA (do inglês *Age-Dependent Random Access*), cujo objetivo é utilizar a AoI disponível no dispositivo como parâmetro para ajustar de forma dinâmica a probabilidade de acesso ao meio sem fio. Outros trabalhos tratam do ADRA de forma similar, como em (CHEN *et al.*, 2020a; AHMETOGLU *et al.*, 2022; YAVASCAN; UYSAL, 2021). Ademais, resultados experimentais obtidos em (Han *et al.*, 2020) suportam as vantagens do ADRA em relação ao AIRA. Adicionalmente, o trabalho de (AHMETOGLU *et al.*, 2022) apresenta uma adaptação de (CHEN *et al.*, 2020), onde para cada *time slot* há a adição de um *minislot* no início para validar quantos dispositivos estão ativos na rede e ajustar a probabilidade de transmissão de acordo com essa informação.

Este documento refere-se à análise de desempenho em redes direcionadas para a IoT em um contexto de monitoramento remoto, considerando como métrica principal a AoI. Para tal, objetiva-se incrementar os cenários inicialmente apresentados em (Gu *et al.*, 2019) e (Yates; Kaul, 2017; CHEN *et al.*, 2020) de forma a obter informações mais atualizadas no destino, portanto uma AoI menor, porém preservando as características de processamento e transmissão de dados na fonte, a qual geralmente possui restrições de consumo energético.

Uma oportunidade para incrementar (Gu *et al.*, 2019) é utilizar técnicas de diversidade (GOLDSMITH, 2005, Capítulo 7) por meio de múltiplas antenas de recepção no destino. Observa-se que esquemas ARQ conseguem reduzir a AoI por meio do ganho de diversidade obtido pelas retransmissões. Portanto, obter uma ordem de diversidade ainda maior com o auxílio de múltiplas antenas pode reduzir a AoI ainda mais, sem causar aumento de processamento na fonte, que geralmente possui restrições de consumo.

Os trabalhos de (Yates; Kaul, 2017; CHEN *et al.*, 2020) são mais próximos de uma

realidade com uma rede massiva de dispositivos, em contraste com que foi proposto em (Gu *et al.*, 2019). Nesse caso, múltiplas fontes utilizam um meio sem fio comum e a transmissão dos dados sofre tanto efeitos do desvanecimento quanto colisão com outros dispositivos, já que não há alocação de recursos. Nesse contexto, a técnica de Cancelamento Sucessivo de Interferência (do inglês *Successive Interference Cancellation* (SIC)) (LI; DAI, 2016; GAO *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018; GUPTA; VENKATESH, 2022) é uma forma de reduzir a AoI, pois é possível recuperar determinadas mensagens mesmo quando ocorre uma colisão.

## 1.1 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está organizado com base nas publicações e pesquisas realizadas durante o período de Doutorado. Portanto, cada Capítulo trata de temas diferentes e possui sua notação particular. Para facilitar o entendimento, no início de cada Capítulo é apresentada uma tabela com a notação utilizada.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos preliminares a respeito de comunicação sem fio, em conjunto com uma descrição geral das métricas de desempenho abordadas no trabalho. O Capítulo 3 está relacionado com as publicações (GRYBOSI *et al.*, 2020a; GRYBOSI *et al.*, 2020b) e trata da análise da relação (*trade-off*) entre AoI e consumo energético em sistemas de monitoramento remoto, que consiste em um dispositivo enviando atualizações (*uplink*) para seu respectivo AP. Mais especificamente, com base no trabalho (Gu *et al.*, 2019), extensões com técnicas de diversidade espacial (GRYBOSI *et al.*, 2020a) e temporal (GRYBOSI *et al.*, 2020b) no AP são propostas para melhorar o compromisso entre a AoI e consumo energético.

No Capítulo 4, cuja publicação relacionada é (GRYBOSI *et al.*, 2021), um cenário onde vários dispositivos associados a um AP compartilham o mesmo canal sem fio (*uplink*) é analisado por meio da AoI para diferentes técnicas de acesso ao meio. Nesse cenário, as técnicas de acesso ao meio inicialmente propostas em (Yates; Kaul, 2017) e (CHEN *et al.*, 2020) são comparadas com a proposta de utilizar SIC com o objetivo de reduzir a AoI média.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões finais do trabalho e possíveis sugestões para trabalhos futuros.

## 2 CONCEITOS PRELIMINARES

Este Capítulo inclui os fundamentos que serão utilizados no decorrer do trabalho para análise da AoI em redes sem fio. As expressões genéricas apresentadas neste Capítulo servirão de base para determinar a AoI média nos capítulos subsequentes e também podem ser aplicadas para outros modelos de sistema. De forma específica, a Seção 2.1 apresenta os fundamentos sobre AoI, contendo o modelo geral usualmente utilizado para análise em tempo contínuo e os casos específicos para tempo em *time slots* e a AoI da rede para casos com múltiplas fontes. A Seção 2.2 apresenta os conceitos de probabilidade de *outage* e diversidade que serão na sequência utilizados para desenvolver expressões analíticas para a AoI. Na Seção 2.3 é apresentada uma comparação entre AoI, *throughput* e *delay* utilizando como base a teoria de filas.

**Tabela 1 – Notação utilizada no Capítulo 2.**

Símbolo	Definição	Símbolo	Definição
$r(t)$	Timestamp da última informação no AP	$\Delta(t)$	AoI instantânea no instante $t$
$t_n$	Geração da mensagem $n$	$t'_n$	Momento da decodificação da mensagem $n$
$T_n$	Tempo de sistema para a mensagem $n$	$D_n$	Intervalo entre decodificação de mensagens
$Y_n$	Intervalo entre geração de mensagens	$\mathcal{T}$	Intervalo de tempo
$\bar{\Delta}^c$	AoI média para tempo contínuo	$\mathbb{E}[\cdot]$	Valor esperado
$\bar{\Delta}^d$	AoI média para tempo discreto	$\bar{\Delta}^N$	AoI média da rede
$N_D$	Número de dispositivos na rede	$P_{\text{out}}$	Probabilidade de <i>outage</i>
$R$	Taxa de transmissão em (bps/Hz)	$\bar{\gamma}$	SNR média
$N_A$	Número de antenas de recepção	$\Gamma(a,b)$	Função gama superior incompleta
$\Gamma(a)$	Função gama completa	$\lambda$	Taxa de geração de mensagens
$\mu$	Taxa de processamento de mensagens	$\rho$	Utilização do servidor

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

### 2.1 MODELO GERAL PARA AGE OF INFORMATION

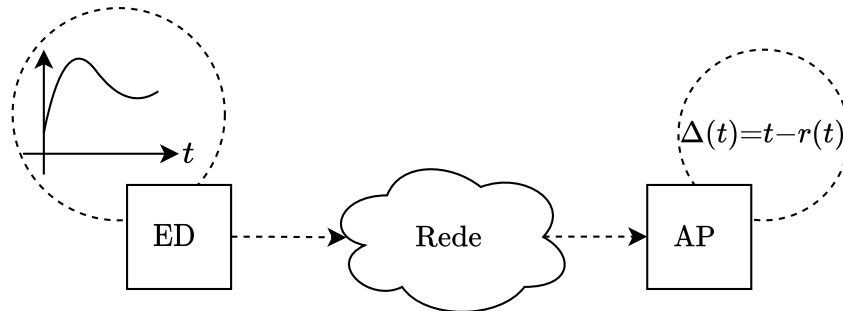
Conforme (KOSTA *et al.*, 2017), além da AoI ter se tornado um conceito notável e amplamente estudado, ela assumiu um papel relevante como métrica e ferramenta de análise de desempenho. Obter a taxa de atualização ótima em termos de AoI tem recebido grande interesse em diversos ramos da comunicação sem fio, pois, de forma geral, o objetivo de um sistema de comunicação envolve obter dados recentes no destino com uma eficiência cada vez maior.

Um modelo comum de aplicação da AoI é demonstrado na Figura 1, onde um dispositivo (ED, do inglês *End-Device*) possui uma variável de interesse para um monitor (AP), o qual recebe mensagens de atualização do estado da variável por meio de um canal sem fio. Apesar de ser um modelo simplificado, é possível estendê-lo para modelos mais complexos, com múltiplos



dispositivos na rede e perdas em larga e pequena escala do meio sem fio.

**Figura 1 – Modelo de aplicação da AoI, composto por um dispositivo (ED) enviando informações para um monitor (AP) através de uma rede.**



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Yates *et al.* (2021).

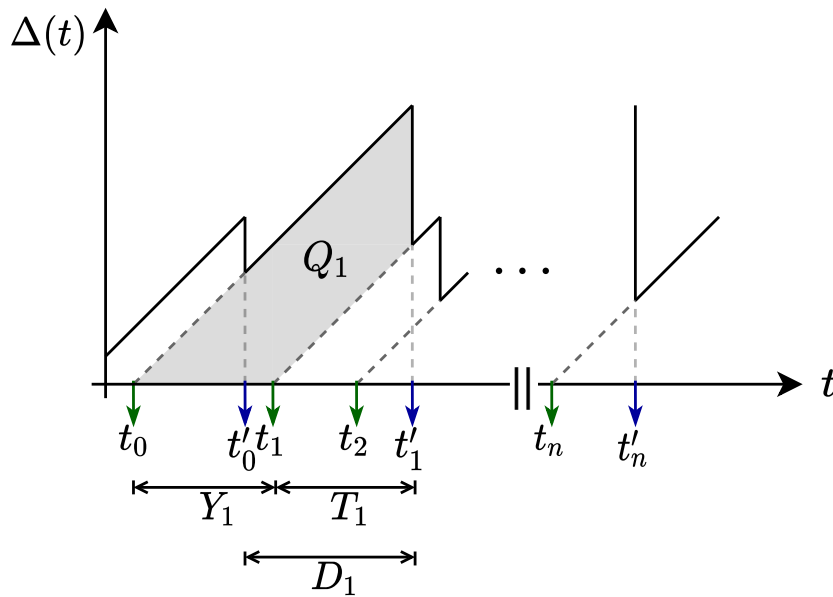
Otimizar o modelo apresentado na Figura 1 de forma a melhorar a pontualidade das informações recebidas no destino pode ser mais complexo do que maximizar a *throughput* ou minimizar o *delay*. Conforme (KOSTA *et al.*, 2017), maximizar a taxa de geração de mensagens (maximizar a utilização da rede) pode causar atrasos na entrega das mensagens devido ao sobrecarregamento do sistema. Por outro lado, reduzir a taxa de geração (minimizando o tempo de espera até o envio da mensagem) pode ocasionar em informações desatualizadas no destino, esse compromisso entre taxa de atualização, *throughput*, *delay* e AoI é também apresentado na Seção 2.3.

Considera-se que o ED gera uma mensagem em um *timestamp*  $r \geq 0$ . Em um determinado momento  $t (t \geq r)$  o intervalo de tempo desde a geração da informação é definido como  $t - r$ . Do ponto de vista do AP, considera-se  $r(t)$  como o *timestamp* da informação mais recente recebida corretamente pelo AP, no tempo  $t$ . Dessa forma, a AoI é definida como o processo aleatório  $\Delta(t) = t - r(t)$  (Yates; Kaul, 2017).

Na Figura 2 é ilustrado um exemplo da evolução da AoI para um dado intervalo de tempo contínuo  $t$ , onde é possível visualizar a evolução em um formato de dente de serra. O dispositivo gera novas informações<sup>1</sup> nos tempos  $t_n$ , e o monitor decodifica as mensagens correspondentes no tempo  $t'_n$ . Nos intervalos em que não há mensagens transmitidas com sucesso a AoI cresce linearmente, e ao receber um dado novo, a AoI instantânea no monitor recebe o valor  $\Delta(t'_n) = t'_n - t_n$ , que corresponde ao tempo de sistema  $T_n$ . O intervalo  $Y_n$  representa o tempo entre a geração consecutiva de mensagens, e  $D_n$  é o intervalo desde a decodificação da mensagem  $n - 1$  até a decodificação da mensagem  $n$ .

<sup>1</sup> Tem-se em mente nesse momento que o dado obtido pelo ED representa o estado real da variável monitorada, desconsiderando condições como amostragem e *delay* no processamento do sinal.

Figura 2 – Evolução da AoI em função do tempo contínuo.



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Yates *et al.* (2021).

Conforme (KOSTA *et al.*, 2017; YATES *et al.*, 2021), a partir do conceito da AoI como processo  $\Delta(t)$ , é possível definir a métrica AoI média, cujo objetivo é quantificar o comportamento esperado em estabilidade da AoI no destino. Dessa forma, para um dado intervalo de tempo  $\mathcal{T}$ , a AoI média pode ser descrita como:

$$\bar{\Delta}^c = \lim_{\mathcal{T} \rightarrow \infty} \frac{1}{\mathcal{T}} \int_0^{\mathcal{T}} \Delta(t) dt. \quad (1)$$

Nota-se que (1) pode ser calculada com base em métodos geométricos, decompondo  $\Delta(t)$  em diversos trapézios  $Q_n$ , conforme a área  $Q_1$  destacada na Figura 2. Assim, é possível relacionar  $Y_n$  e  $T_n$  com a área do trapézio da seguinte forma<sup>2</sup> (YATES *et al.*, 2021, Eq. (2)):

$$Q_n = \frac{1}{2}(T_n + Y_n)^2 - \frac{1}{2}T_n^2 = Y_n T_n + \frac{Y_n^2}{2}, \quad (2)$$

a qual, considerando que o comportamento médio corresponde ao valor esperado (KOSTA *et al.*, 2017), resulta na seguinte AoI média (YATES *et al.*, 2021, Eq. (3)):

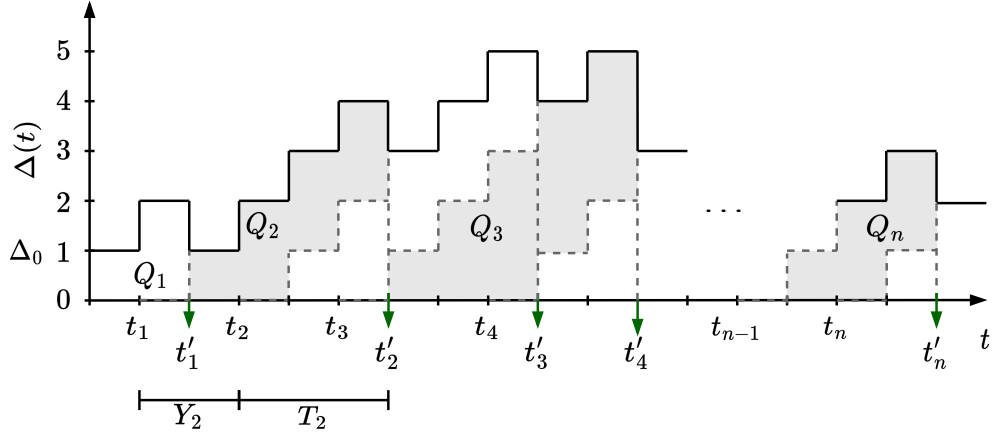
$$\bar{\Delta}^c = \frac{\mathbb{E}[Q_n]}{\mathbb{E}[Y_n]} = \frac{\mathbb{E}[Y_n T_n] + \mathbb{E}[Y_n^2]/2}{\mathbb{E}[Y_n]}. \quad (3)$$

A partir de (3), é possível representar vários sistemas, considerando as características de geração de mensagens, tempo de sistema e tipo de fila a ser utilizada. Por exemplo, em (KOSTA *et al.*,

<sup>2</sup> Observa-se que o trapézio  $Q_1$  na Figura 2 pode ser decomposto pela área compreendida entre dois triângulos-retângulos com lados iguais, sendo o maior com lado  $(Y_1 + T_1)$  e o menor com lado  $T_1$ . Portanto, tem-se que  $Q_1 = (Y_1 + T_1)^2/2 - T_1^2/2$ .

2017) estratégias como FCFS (do inglês *First-Come-First-Served*) e LCFS (do inglês *Last-Come-First-Served*) são analisadas a partir de (3).

**Figura 3 – Evolução da AoI para um sistema organizado em *time slots*.**



**Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Kosta *et al.* (2017).**

### 2.1.1 AoI para tempo discreto (*time slots*)

Para sistemas baseados em *time slots*, a evolução da AoI ocorre em valores discretos. Dessa forma, conforme ilustrado na Figura 3, a AoI evolui em um formato de escada. Similarmente a (1) é possível definir a métrica AoI média como:

$$\bar{\Delta}^d = \lim_{\mathcal{T} \rightarrow \infty} \frac{1}{\mathcal{T}} \sum_{t=1}^{\mathcal{T}} \Delta(t). \quad (4)$$

Uma forma alternativa de obter-se uma expressão para (4) é considerar a área sob  $\Delta(t)$ , que é composta pelas áreas  $Q_i$ . Entende-se que  $Q_i$  é compreendida entre um triângulo maior com lado  $Y_i + T_i - 1$  e um triângulo menor com lado  $T_i - 1$ , de forma que:

$$Q_i = \frac{(Y_i + T_i - 1)^2 + (Y_i + T_i - 1)}{2} - \frac{(T_i - 1)^2 + (T_i - 1)}{2}, \quad (5)$$

e após algumas simplificações, tem-se:

$$Q_i = \frac{Y_i^2 - Y_i + 2T_i Y_i}{2}. \quad (6)$$

Que considerando  $\bar{\Delta}^d = \mathbb{E}[Q_n]/\mathbb{E}[Y_n]$  é simplificado como:

$$\bar{\Delta}^d = \frac{\mathbb{E}[Y_i^2] + 2\mathbb{E}[T_i Y_i] - 1}{2\mathbb{E}[Y_i]}. \quad (7)$$

### 2.1.2 AoI média da rede

Em casos que há mais de um dispositivo na rede, cada um possui uma evolução da AoI similar à apresentada na Figura 3 e possui uma AoI média correspondente, de acordo com a expressão (7). Dessa forma, para se obter uma visão geral da interação entre os dispositivos e suas respectivas AoIs, pode ser utilizada como referência a AoI média da rede, onde adiciona-se o índice do ED  $i$  em (7) e calcula-se a média aritmética da rede na forma de:

$$\bar{\Delta}^N = \frac{1}{N_D} \sum_{i=1}^{N_D} \bar{\Delta}_i^m, \quad (8)$$

onde  $m \in \{c,d\}$  representa o modelo de AoI utilizado (contínuo ou discreto, respectivamente),  $N_D$  é o número de dispositivos na rede e  $\bar{\Delta}_i^m$  é a AoI média para cada dispositivo  $i$ .

## 2.2 TÉCNICAS DE DIVERSIDADE

De modo geral, técnicas de diversidade buscam amenizar os efeitos do desvanecimento. Como o desvanecimento possui característica aleatória, ao obter múltiplas cópias de um mesmo sinal (que percorre percursos diferentes) é possível combiná-las e obter um sinal resultante melhor. Cópias de uma mesma mensagem podem ser obtidas por diversidade espacial, onde múltiplas antenas separadas por uma distância suficientemente grande recebem o sinal, ou por diversidade temporal, em que o transmissor retransmite a mesma informação em tempos diferentes, separados pelo tempo de coerência do canal (GOLDSMITH, 2005). Assim, o objetivo com a utilização dessas técnicas é obter uma redução da probabilidade de *outage* do meio de transmissão.

### 2.2.1 Probabilidade de *outage*

Aliada às métricas *throughput* e *delay*, a probabilidade de *outage* é importante para avaliar o desempenho do sistema de comunicação. Define-se um evento de *outage* quando a taxa alvo de transmissão é maior do que a capacidade instantânea do canal, a qual varia de forma aleatória devido ao desvanecimento (GOLDSMITH, 2005). A probabilidade de *outage*  $P_{\text{out}}$  para canais com distribuição *Rayleigh* pode ser definida como:

$$P_{\text{out}} = 1 - \exp(-\Lambda), \quad (9)$$

em que  $\Lambda = (2^R - 1)/\bar{\gamma}$ , sendo  $R$  a taxa de transmissão em (bps/Hz) e  $\bar{\gamma}$  a relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) média.

Conforme (GOLDSMITH, 2005), o conceito de ordem de diversidade está relacionado com a inclinação da curva de probabilidade de outage de (9) em função da SNR. Por exemplo, para uma curva com inclinação  $\exp(-\nu\Lambda)$  há uma ordem de diversidade  $\nu$ . A ordem de diversidade pode ser interpretada como o número de cópias *independentes* do sinal do receptor (GOLDSMITH, 2005).

Ao diminuir a probabilidade de *outage*, há uma probabilidade menor de falhas na comunicação, portanto, aumentar a ordem de diversidade é uma das soluções para melhorar o desempenho do sistema e obter uma redução da AoI.

## 2.2.2 Diversidade Espacial

A técnica de SC (combinação de seleção, do inglês *Selection Combining*), utilizada na recepção, consiste em selecionar apenas a cadeia de recepção que possui a melhor relação sinal-ruído, dessa forma é necessário apenas uma cadeia de recepção para realizar a decodificação. Apesar de sua simplicidade, apresenta ordem de diversidade equivalente à técnica do MRC (do inglês *Maximal Ratio Combining*). Considerando que todas as antenas possuem a mesma SNR média, a probabilidade de *outage* resultante para o caso SC pode ser definida como (GOLDSMITH, 2005, Eq. (7.8)):

$$P_{\text{out}}^{\text{SC}} = [1 - \exp(-\Lambda)]^{N_A}, \quad (10)$$

onde  $N_A$  é o número de antenas de recepção.

Em contraste com a técnica do SC, para o esquema MRC é realizada uma média ponderada dos sinais de cada cadeia de recepção, onde um sinal com melhor SNR possui um peso maior. Com essa técnica é possível atingir um ganho maior em SNR média, ao custo de maior processamento na recepção e maior consumo energético para receber todas as cópias nas  $N_A$  antenas e combiná-las. Apesar de possuir um ganho em SNR média maior, a ordem de diversidade para MRC é equivalente a SC, dessa forma, espera-se um valor menor de probabilidade de *outage*, porém a taxa de diminuição é equivalente para as duas técnicas. A probabilidade de *outage* resultante para MRC pode ser representada como (GOLDSMITH, 2005, Eq. (7.19)):

$$P_{\text{out}}^{\text{MRC}} = 1 - \frac{\Gamma(N_A, \Lambda)}{\Gamma(N_A)}, \quad (11)$$

sendo  $\Gamma(N_A, \Lambda)$  a função gama superior incompleta e  $\Gamma(N_A)$  a função gama completa (GRADSH-TEYN; RYZHIK, 2007, Eq. (8.352.4)).

### 2.2.3 Diversidade Temporal

Para soluções que envolvem retransmissões, é notável a importância do mecanismo de retransmissão automática (ARQ). Nesse cenário, ao decodificar uma mensagem com sucesso, o receptor informa ao transmissor por meio de um canal de retorno que a mensagem foi aceita. Caso contrário, o receptor envia um pedido de retransmissão da mensagem. Para o ARQ, cada retransmissão contém a mesma informação e codificação, no qual é adicionado um código com boa capacidade de detecção de erros, por exemplo códigos de verificação de redundância cíclica (CRC, do inglês *Cyclic Redundancy Check*) (LIN; COSTELLO, 2004).

Em trabalhos como (FENG; YANG, 2021; MUNARI; BADIA, 2022), a importância do canal de retorno do receptor para o transmissor é avaliada em termos de AoI. Em cenários mais práticos de IoT como por exemplo LoRaWAN (LORA, 2017), onde as transmissões são mais escassas, escutar uma mensagem de confirmação pode ser tão complexo quanto a própria transmissão dos dados.

Nesse caso, sem o canal de retorno a fonte pode retransmitir a mesma informação indefinidamente, até gerar uma nova. Essa abordagem, apesar de conter vantagens em termos de alocação de recursos no *downlink*, pode ser onerosa em termos de consumo energético, pois a fonte continua retransmitindo a mesma informação mesmo que o destino já tenha conseguido decodificar a mensagem.

Outro mecanismo relevante é utilizar o conceito de Combinação de Chase (Chase, 1985), onde é possível obter um ganho de diversidade armazenando as retransmissões anteriores que contém os mesmos dados e combinando-as para aumentar a probabilidade de decodificação da mensagem<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Nesse caso, considera-se que o destino consegue identificar se a mensagem é uma retransmissão ou possui dados novos. Essa informação pode ser adicionada ao cabeçalho da mensagem, o qual possui uma probabilidade de decodificação maior.

### 2.3 AGE OF INFORMATION, THROUGHPUT E DELAY

Conforme (Yates; Kaul, 2017), em termos de pontualidade de informação pode-se dizer que utilizar os recursos visando reduzir a AoI pode ser diferente de otimizar *throughput* ou *delay*. Nesse contexto, é importante comparar a AoI caso outras métricas fossem utilizadas como referência para otimizar os recursos do sistema.

A partir da expressão em (7), é necessário determinar as características do sistema para se obter uma expectativa da AoI média. Nesse ponto, a teoria de filas é uma ferramenta auxiliar para obter expressões para a AoI<sup>4</sup>.

Um exemplo clássico de modelos de sistema nesse contexto é a fila M/M/1-FCFS (KOSTA *et al.*, 2017). Esse modelo representa um sistema composto por uma fonte e um servidor, com mensagens sendo geradas de acordo com um processo de Poisson com taxa de geração de mensagens  $\lambda$ . Adicionalmente, o tempo de serviço é uma variável aleatória com distribuição exponencial com média  $1/\mu$ . Portanto, pode-se dizer que a utilização dos recursos do sistema é definida como  $\rho = \lambda/\mu$ . Essas premissas podem ser vislumbradas com base na Figura 1, onde o ED atualiza o AP com uma taxa  $\lambda$ , e o AP consegue processar informações com uma taxa  $\mu$ <sup>5</sup>.

Considerando que o sistema esteja operando em estabilidade ( $\rho < 1$ ), pode-se dizer que a *throughput* é igual à taxa de geração de mensagens. Por outro lado, com base em (LIU, 2009, Eq. (4.20)), é possível representar o *delay* como  $1/(\mu(1 - \rho))$ . Da mesma forma, a expressão para AoI média nesse sistema pode ser definida como (KOSTA *et al.*, 2017, Eq. (2.19)):

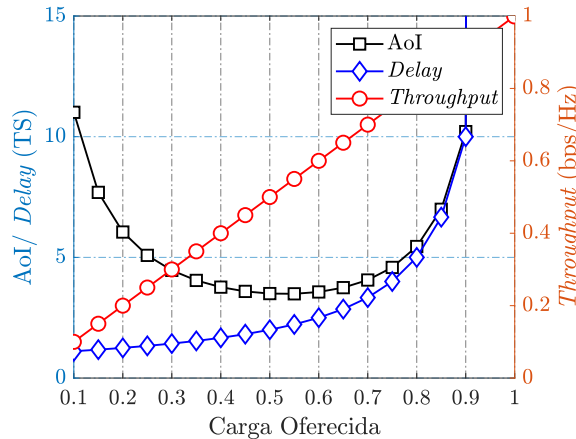
$$\bar{\Delta}^{M/M/1} = \frac{1}{\mu} \left( 1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1 - \rho} \right) \quad (12)$$

Com base nessas informações, na Figura 4 é apresentada uma comparação entre *throughput*, *delay* e AoI com o aumento da carga oferecida considerando  $\mu = 1$ . Nota-se que, nesse caso, a *throughput* cresce de acordo com o aumento da utilização do servidor, pois a fonte está inserindo mais informações no sistema (já que  $\mu$  é constante nesse caso). Uma outra visão é obtida quando o *delay* é analisado, pois quanto menor a utilização do servidor, menor será o tempo de espera de uma informação. Por outro lado, a AoI traz uma visão de pontualidade de

<sup>4</sup> A elucidação sobre teoria de filas não faz parte do escopo do trabalho. Nesse ponto, a referência (LIU, 2009) pode ser utilizada como leitura prévia.

<sup>5</sup> Assim como em (Gu *et al.*, 2019), o tempo de serviço depende da probabilidade de sucesso da transmissão, o que inclui a probabilidade de *outage* e outras características do sistema.

**Figura 4 – Comparação entre AoI, *delay* e *throughput* para diferentes valores de carga oferecida, considerando  $\mu = 1$  e um modelo M/M/1-FCFS.**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

informação, onde, de acordo com (Yates; Kaul, 2017), o ponto de utilização dos recursos do sistema que implica em informações mais atuais no destino é em torno de  $\rho \approx 0,53^6$ . Para pontos em que  $\rho < 0,5$ , há o efeito conhecido como penalidade da AoI, onde essa métrica é penalizada por intervalos grandes sem atualização de dados. Por outro lado, para  $\rho > 0,6$ , o tempo de espera começa a aumentar, o que causa aumentos tanto em *delay* quanto em AoI.

## 2.4 COMENTÁRIOS

Neste Capítulo foram apresentados os conceitos preliminares necessários para compreender a métrica AoI. Mais especificamente, a partir da definição do cenário de aplicação, foram obtidas expressões genéricas para a AoI média para tempo contínuo e para tempo discreto, que serão utilizadas como base para as deduções dos próximos capítulos. A partir de então, foi definido o conceito de probabilidade de *outage* e a importância de técnicas de diversidade para aumentar a confiabilidade de sistemas de comunicação sem fio. Adicionalmente, foi realizada uma comparação da AoI com outras métricas conhecidas, como *throughput* e *delay* para diferentes valores de utilização dos recursos do sistema. Foi possível concluir que a métrica AoI traz uma visualização mais completa de um sistema de comunicação, desde a geração até a decodificação das mensagens. Ademais, as expressões para AoI média apresentadas neste Capítulo são genéricas e podem ser aplicadas em diversos modelos de sistema, inclusive os que serão evidenciados no Capítulo 3 e no Capítulo 4.

<sup>6</sup> Nesse caso, a AoI média ótima é obtida com o sistema ligeiramente mais ocupado do que ocioso.



### 3 AGE OF INFORMATION COM ARQ TRUNCADO

Conforme apresentado em (Chen; Huang, 2016), em cenários em que os transmissores não recebem *feedback* algum dos receptores, transmitir réplicas ilimitadas da mesma mensagem minimiza a AoI. Porém, esta abordagem implica em custos elevados do ponto de vista de consumo energético, sendo inviável em cenários onde os dispositivos operam com baterias. Nesse sentido, os estudos em (Gong *et al.*, 2018; Gu *et al.*, 2019) investigam o compromisso entre AoI e consumo energético em esquemas baseados em retransmissões.

Em (Gu *et al.*, 2019), os autores propuseram a estratégia denominada TARQ (do inglês *Truncated Automatic Repeat reQuest*), em que o número de retransmissões é limitada a uma quantidade pré-definida igual a  $L$ . Como resultado, os autores mostram que o esquema TARQ apresenta um melhor compromisso entre consumo energético e AoI média do que o esquema com ilimitadas retransmissões de (Chen; Huang, 2016).

Da mesma forma, consideram-se os efeitos de adicionar a preempção nos dispositivos ou não. Por preempção, entende-se o efeito de descartar a mensagem atual quando uma mensagem nova é gerada. Conforme a análise realizada pelos autores em (Kaul *et al.*, 2012), observa-se que adicionar a preempção, ou seja, descartar a mensagem atual quando uma nova informação é gerada, pode trazer benefícios em termos de AoI média.

Um fato comum em técnicas baseadas em ARQ é que a AoI é menor devido ao aumento da diversidade temporal oferecida pelas retransmissões. Portanto, é de se imaginar que essa melhora no desempenho seja potencializada ao se considerar de forma conjunta outras formas de diversidade, tais como a diversidade espacial obtida pela utilização de múltiplas antenas (GOLDSMITH, 2005, Capítulo 7). Outra potencial fonte de melhora é considerar a possibilidade de combinar diversas retransmissões ao invés de tratá-las de forma individual como em (Chen; Huang, 2016; Gu *et al.*, 2019). Assim, neste capítulo são apresentadas extensões do trabalho (Gu *et al.*, 2019), que culminaram nas publicações (GRYBOSI *et al.*, 2020a) e (GRYBOSI *et al.*, 2020b).

Inicialmente, a Seção 3.1 define o modelo de sistema utilizado, cuja notação está resumida na Tabela 2. Na sequência, as Seções 3.2 e 3.3 incluem uma análise do esquema TARQ original e a extensão com diversidade espacial na recepção, respectivamente. De forma complementar, a Seção 3.4 inclui uma análise do compromisso entre AoI e consumo energético, resultados estes baseados em (GRYBOSI *et al.*, 2020a). Na Seção 3.5 é apresentada a exten-

são do TARQ utilizando um *buffer* de recepção com a possibilidade de combinar as últimas retransmissões, baseado no trabalho (GRYBOSI *et al.*, 2020b). Finalmente, na Seção 3.6 são apresentados e discutidos alguns resultados numéricos.

**Tabela 2 – Notação utilizada no Capítulo 3.**

Símbolo	Definição	Símbolo	Definição
$N$	Número de antenas de recepção	$\mathbf{y}_n$	Sinal recebido pela antena $n$
$\mathbf{x}$	Mensagem transmitida	$P$	Potência de transmissão
$\kappa$	Perdas em larga escala	$\mathbf{w}_n$	Ruído gaussiano para a antena $n$
$N_0$	Densidade espectral do ruído	$h_n$	Coef. de desvanecimento para a antena $n$
$\gamma_n$	SNR para a antena $n$	$\bar{\gamma}$	SNR média
$B$	Largura de banda	$p$	Prob. de geração de novas mensagens
$g_j$	Geração da mensagem $j$	$t'_i$	Decodificação da mensagem $i$
$Y_n$	Intervalo entre $t'_n$ e $t'_{n-1}$	$S_n$	Tempo de sistema da mensagem $n$
$\Delta(t)$	AoI instantânea em $t$	$\bar{\Delta}(L)$	AoI média para o esquema TARQ original
$L$	Número máximo de retransmissões	$R$	Taxa de transmissão
$q$	Probabilidade de <i>outage</i>	$\Gamma(a,b)$	Função gama superior incompleta
$\Gamma(a)$	Função gama completa	$q_{SC}(N)$	Prob. de <i>outage</i> para SC
$q_{MRC}(N)$	Prob. de <i>outage</i> para MRC	$\Delta(L,N)$	AoI média para o esquema TARQ-div
$\mathbb{E}[\cdot]$	Valor esperado	$\mathbb{E}[\Phi]$	Consumo energético médio esperado
$P_C$	Requisito de restrição de potência	$q_{CC}(l)$	Prob. de <i>outage</i> para CC
$\bar{\Delta}_{CC}$	AoI média para o esquema TARQ-CC		

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1 MODELO DO SISTEMA

Considera-se um cenário de *uplink*, em que um único ED<sup>1</sup> com uma antena transmite mensagens para um AP que possui  $N \geq 1$  antenas de recepção. As transmissões são organizadas em *time slots* (TS), sendo que cada transmissão ocupa um TS, o qual por simplicidade foi assumido possuir tamanho unitário. Dessa forma, omitindo o índice do TS, o sinal recebido pela  $n$ -ésima antena do AP pode ser descrito como:

$$\mathbf{y}_n = \sqrt{P\kappa} h_n \mathbf{x} + \mathbf{w}_n, \quad (13)$$

em que  $\mathbf{x}$  é a mensagem transmitida (com energia unitária),  $P$  é a potência de transmissão,  $\kappa$  representa as perdas em larga escala (considera-se o modelo de Hata em uma área urbana assim como em (Gu *et al.*, 2019))  $\mathbf{w}_n \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$  é o ruído aditivo gaussiano complexo (AWGN, do inglês *Additive White Gaussian Noise*), sendo  $N_0$  a densidade espectral de potência do ruído (por antena). O coeficiente de desvanecimento (pequena escala) é modelado como  $h_n \sim \mathcal{CN}(0,1)$ , isto é, sua envoltória segue uma distribuição Rayleigh de variância unitária. Além disso, considera-se

<sup>1</sup> O cenário com apenas um dispositivo pode também ser vislumbrado como uma rede com múltiplos dispositivos que possuem acesso ortogonal (OMA). Caso houvesse o compartilhamento dos recursos da rede, o desempenho seria menor, pois as transmissões estariam sujeitas à colisão entre os dispositivos.

neste Capítulo desvanecimento em bloco, em que  $h_n$  permanece constante durante um TS, e varia de forma independente e identicamente distribuída (i.i.d.) no tempo (a cada novo TS) e espaço (entre as antenas de recepção).

Assim sendo, a SNR na  $n$ -ésima antena de recepção pode ser representada como

$$\gamma_n = |h_n|^2 \bar{\gamma} = |h_n|^2 \frac{P\kappa}{N_0 B}, \quad (14)$$

em que  $\bar{\gamma} = P\kappa/(N_0 B)$  é a SNR média (assume-se ser igual para todas as antenas), e  $B$  é a largura de banda (em Hz).

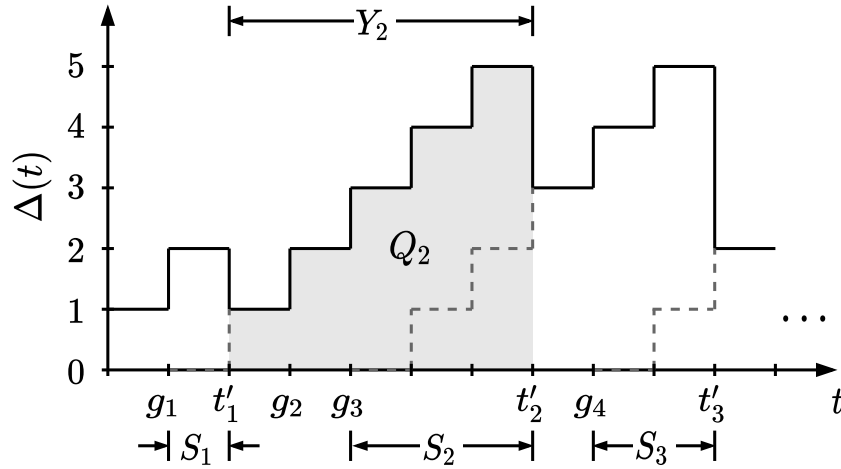
Assim como em (Gu *et al.*, 2019), mensagens são geradas de acordo com um processo de Bernoulli, isto é, a cada início de TS, uma nova informação é gerada com probabilidade  $p$ . Considera-se que a mensagem  $j$  é gerada no tempo  $g_j$ , e pode ser decodificada com sucesso caso o meio sem fio não esteja em *outage*, ou seja, caso a SNR instantânea na saída do combinador esteja acima da SNR limiar de decodificação. Assim, a probabilidade de um evento de *outage* depende da técnica de combinação que será utilizada no receptor.

A Figura 5 apresenta a evolução instantânea da AoI, que considerando o modelo em *time slots*, cresce de forma unitária. Considera-se  $g_j$  como o tempo em que a mensagem  $j$  foi gerada, sendo que, devido à aleatoriedade do meio sem fio, esta pode ser ou não decodificada pelo AP. Adicionalmente é possível definir  $t'_i$  como o tempo em que a mensagem foi decodificada no AP. O intervalo de tempo entre duas mensagens decodificadas com sucesso é definido por  $Y_i = t'_i - t'_{i-1}$ . É importante notar que dentro do intervalo  $Y_i$  a AoI cresce linearmente, e ao decodificar com sucesso a AoI recebe o valor de  $S_i = t'_i - g_j$ , com  $g_j = \max_j \{g_j | g_j < t'_i\}$ . Na Figura 5, por exemplo,  $Y_2 = 5$  e  $S_2 = 3$ . Adicionalmente, observa-se o efeito da preempção no momento da geração da mensagem  $g_3$ , onde o dispositivo passa a transmitir a mensagem nova e  $g_2$  é descartada.

### 3.2 TARQ

Para obter-se uma expressão para a AoI do esquema TARQ, considera-se como base a expressão em (7). A partir de então, é necessário obter expressões para  $\mathbb{E}[Y_i^2]$ ,  $\mathbb{E}[Y_i]$  e  $\mathbb{E}[S_{i-1}Y_i]$ . Adicionalmente, como apresentado em (Gu *et al.*, 2019, Lema 1), é possível demonstrar que  $E[S_{i-1}Y_i] = E[S_{i-1}]E[Y_i]$ , ou seja, o tempo de serviço da última informação decodificada com sucesso  $S_{i-1}$  depende apenas da probabilidade de decodificação com sucesso da informação, independentemente da taxa de geração de mensagens  $p$  devido ao efeito da preempção.

Figura 5 – AoI instantânea em função do índice de *time slot* para um esquema com retransmissões.



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Gu *et al.* (2019).

Dessa forma, obtêm-se a seguinte expressão simplificada para a AoI (Gu *et al.*, 2019, Eq. (12)):

$$\bar{\Delta} = \mathbb{E}[S_{i-1}] + \frac{\mathbb{E}[Y_i^2]}{2\mathbb{E}[Y_i]} - \frac{1}{2}. \quad (15)$$

A partir de então, pode-se definir a probabilidade de sucesso de uma mensagem ser decodificada após  $l, 0 < l \leq L$  transmissões a partir das seguintes premissas:

- Não há geração de mensagens nas transmissões anteriores, que ocorre com probabilidade  $(1 - p)^{l-1}$ ;
- Não ocorre *outage* na última transmissão, que ocorre com probabilidade  $(1 - q)$ , sendo  $q = 1 - \exp(-\lambda)$  e  $\lambda = (2^R - 1)/\bar{\gamma}$ ;
- A transmissão das mensagens anteriores falhou, que ocorre com probabilidade  $q^{l-1}$ ;

Como a probabilidade de *outage*  $q$  e a taxa de geração  $p$  são independentes, pode-se representar a probabilidade de sucesso de uma transmissão após  $l$  transmissões como:

$$d(l) = q^{l-1}(1 - p)^{l-1}(1 - q) \quad (16)$$

Considerando (16) e partir das deduções em (Gu *et al.*, 2019), é possível representar a AoI como (Gu *et al.*, 2019, Eq. (33))

$$\bar{\Delta}(L) = \frac{1 - q + pq}{(p - pq)(1 - (q - pq)^L)}. \quad (17)$$

### 3.3 TARQ COM DIVERSIDADE NA RECEPÇÃO

Uma das formas de reduzir a probabilidade de *outage* e consequentemente aumentar a probabilidade de decodificação é aumentando a ordem de diversidade. Tendo em vista que os dispositivos transmissores geralmente são sensores alimentados por baterias e com restrições não somente de consumo como também de tamanho, uma alternativa para aumentar a ordem de diversidade é através da utilização de múltiplas antenas devidamente espaçadas no AP. Nesse contexto, ao receber múltiplas réplicas de cada mensagem em diferentes antenas, o AP pode combiná-las, por exemplo, utilizando alguns dos esquemas SC ou MRC. No decorrer do capítulo é utilizada a notação TARQ-sch para identificar o esquema de diversidade, onde  $sch \in \{SC, MRC\}$ .

Como a utilização das múltiplas antenas na recepção é transparente para o transmissor e não influencia na probabilidade de transmissão  $p$ , a AoI média da rede para os diferentes métodos de diversidade varia apenas com a probabilidade de *outage*  $q$ , como apresentado no Teorema 1 a seguir.

**Teorema 1.** *A AoI média do esquema TARQ-sch operando com  $N$  antenas no receptor, com  $sch \in \{SC, MRC\}$ , é dada por*

$$\bar{\Delta}_{sch}(L, N) = \frac{1 - (1 - p)q_{sch}(N)}{p(1 - q_{sch}(N)) \left(1 - [(1 - p)q_{sch}(N)]^L\right)}, \quad (18)$$

em que

$$q_{sch}(N) = \begin{cases} [1 - \exp(-\lambda)]^N, & \text{se } sch = SC \\ 1 - \frac{\Gamma(N, \lambda)}{\Gamma(N)}, & \text{se } sch = MRC \end{cases} \quad (19)$$

é a probabilidade de *outage* para um receptor com  $N$  antenas, sendo  $\Gamma(N, \lambda)$  a função gama superior incompleta e  $\Gamma(N)$  a função gama completa (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2007, Eq. (8.352.4)).

*Demonstração:* Considerando que a diversidade no tempo e espaço são independentes, a demonstração de (18) é obtida substituindo  $q$  em (17) pelas probabilidades de *outage* para SC ou MRC, apresentadas em (10) e (11), respectivamente.  $\square$

**Corolário 1.**  $\bar{\Delta}_{sch}(1, N) \leq \bar{\Delta}(L)$  para  $L = N$ .

*Demonstração:* Considerando que  $\bar{\Delta}_{MRC}(L, N) \leq \bar{\Delta}_{SC}(L, N)$ , é necessário provar que  $\bar{\Delta}(L) - \bar{\Delta}_{SC}(1, N) \geq 0$  para  $L = N$ , ou seja, a AoI média atingida exclusivamente pelas repetições é

maior do que a obtida apenas pelas múltiplas antenas operando em modo de diversidade SC. Considerando (17) e (18), tem-se portanto:

$$\frac{1 - q(1 - p)}{p(1 - q)(1 - q^L(1 - p)^L)} - \frac{1 - q^N(1 - p)}{p(1 - q^N)(1 - q^N(1 - p))} \geq 0. \quad (20)$$

Substituindo  $L = N$  em (20), e após algumas manipulações, tem-se:

$$\frac{1 - q(1 - p)}{1 - q} - \frac{1 - q^N(1 - p)^N}{1 - q^N} \geq 0. \quad (21)$$

Então, utilizando a desigualdade de Bernoulli (MITRINOVIĆ *et al.*, 1993, Ch. 3) e substituindo  $(1 - p)^N$  por  $(1 - Np) \leq (1 - p)^N$  no segundo termo de (21) tem-se

$$f(q, N) = Nq^N - q^N - Nq^{N-1} + 1 \geq 0. \quad (22)$$

Observando que  $\partial f(q, N)/\partial q = (N - 1)(q - 1)q^{N-2} \leq 0$  nos intervalos  $0 \leq q \leq 1$  e  $N \geq 1$ , tem-se que  $f(q, N)$  é uma função decrescente em  $q$ , com um mínimo em  $q = 1$ . Então, verificando que  $f(1, N) = 0$  satisfaz (22), conclui-se a demonstração.  $\square$

O Corolário 1 indica para que dado  $L = N$ , a utilização de múltiplas antenas na recepção operando em diversidade SC ou MRC pode ser mais vantajosa que o esquema de retransmissões de (Gu *et al.*, 2019), que está relacionado com a preempção, impedindo que uma mensagem seja transmitida  $L$  vezes. Novamente, devido à preempção, é possível provar em (17) que  $\bar{\Delta} \rightarrow 1/(1 - q)$  quando  $p \rightarrow 1$ , ou seja, a AoI média do TARQ apresenta um valor mínimo relacionado à  $q$  que não pode ser reduzido aumentando  $L$ . Porém, diversidade na recepção pode diminuir ainda mais tal mínimo, como apresentado abaixo:

**Corolário 2.**  $\bar{\Delta}_{sch}(L, N) \rightarrow 1/(1 - q_{sch}(N))$  quando  $p \rightarrow 1$ .

*Demonstração:* A demonstração é possível substituindo  $p = 1$  em (18).  $\square$

De acordo com o Corolário 2, considerando que  $q_{sch}(N) \leq q$ , o valor mínimo da AoI pode ser reduzido utilizando múltiplas antenas de recepção. Ademais, como  $q_{SC}(N) \geq q_{MRC}(N)$ , espera-se obter valores ainda menores com diversidade MRC quando comparado à SC.

### 3.4 COMPROMISSO ENTRE AOI E CONSUMO ENERGÉTICO

Assumindo que o ED transmite com uma potência fixa  $P$ , para transmitir uma informação em um *time slot* uma energia  $P$  é consumida, já que o *time slot* é unitário, e enquanto o ED

permanece ocioso (não possui informação a transmitir ou o número máximo de transmissões já foi atingido) não há gasto energético. Adicionalmente, considera-se que a energia necessária para gerar novas mensagens é pequena, quando comparada com a energia consumida nas transmissões.

Avaliar o consumo energético médio do TARQ é uma tarefa complexa, pois, dependendo do valor do número máximo de transmissões  $L$  e da probabilidade de geração  $p$ , o ED alterna entre estados de transmissão e ocioso, ou seja, obter o número médio de transmissões em um período depende de diversas condições do sistema. Felizmente, em (Gu *et al.*, 2019), os autores apresentam a seguinte expressão para o consumo energético médio:

$$\mathbb{E}[\Phi] = P (1 - (1 - p)^L) . \quad (23)$$

Observa-se que o consumo médio não depende da probabilidade de *outage*, ou seja, é independente do estado do canal. Essa expressão condiz com o comportamento do dispositivo, pois como não há uma confirmação de recebimento pelo AP, o ED retransmite a mensagem até que sejam atingidas  $L$  transmissões ou ao obter uma nova informação. Ainda, o termo  $1 - (1 - p)^L$  representa a probabilidade que ao menos uma mensagem foi gerada dentro de  $L$  *time slots*.

Apesar do modelo de consumo energético utilizado não levar em conta as perdas por processamento e no circuito, adicionar mais antenas não influenciaria na estimativa do melhor compromisso entre energia e AoI, já que as múltiplas antenas estão localizadas no AP, que geralmente não possui restrições de energia.

Dessa forma, é possível formular o problema de otimização como minimizar a AoI média por meio da otimização de  $P$  e  $L$  dada uma restrição de potência  $P_C$ , e adicionalmente um dado número de antenas de recepção  $N$ , ou seja:

$$\begin{aligned} \min_L \quad & \bar{\Delta}_{\text{sch}}(L, N) \\ \text{s.t.} \quad & P^* = P_C / (1 - (1 - p)^L) \\ & L \geq 1 \end{aligned} \quad (24)$$

Encontrar uma solução analítica para (24) considerando (17) é complexo, e nesse caso é mais conveniente utilizar uma busca unidimensional para encontrar o valor ótimo de retransmissões  $L$ .

### 3.5 TARQ-CC: ARQ TRUNCADO COM COMBINAÇÃO DE CHASE

As premissas dos trabalhos apresentados anteriormente (Chen; Huang, 2016; Ceran *et al.*, 2019; Gong *et al.*, 2018; Gu *et al.*, 2019) consideram que cada réplica recebida no AP é decodificada individualmente, ou seja, o receptor descarta réplicas da mesma mensagem caso elas não sejam decodificadas corretamente. Todavia, essas réplicas poderiam ser combinadas para aumentar a probabilidade de decodificação.

Dentre as possibilidade de aperfeiçoamento, poderia-se incluir esquemas baseados em HARQ (WU *et al.*, 2022), porém isso implicaria em um gerenciamento mais complexo das mensagens, tanto do ponto de vista do AP quanto do ED, já que tais técnicas variam os parâmetros de codificação a cada retransmissão. Outra possível alternativa seria realizar a Combinação de Chase (CC) (Chase, 1985), pois a taxa de codificação permanece constante entre as retransmissões, sendo necessário apenas um cabeçalho para identificar se é uma nova mensagem ou uma retransmissão para o AP combinar com os dados já armazenados.

Assim, com o intuito de avaliar potenciais ganhos obtidos exclusivamente ao combinar retransmissões, no restante desta Seção considera-se o caso particular com  $N = 1$ , isto é, o receptor é provido de apenas uma antena receptora. Portanto, é possível adaptar o modelo do sistema desenvolvido em (13) apenas eliminando o índice das antenas  $n$ . Dessa forma, considerando CC, obtém-se no domínio temporal um desempenho análogo ao obtido pela técnica MRC no domínio espacial, de forma que a probabilidade de *outage* é obtida como (GOLDSMITH, 2005)(GRADSHTEYN; RYZHIK, 2007, Eq. (8.352.4)):

$$\begin{aligned} q_{CC}(l) &= 1 - e^{-\lambda} \sum_{k=0}^{l-1} \frac{\lambda^k}{k!} \\ &= 1 - \frac{\Gamma(l, \lambda)}{\Gamma(l)}, \end{aligned} \quad (25)$$

onde  $l$ ,  $1 \leq l \leq L$  é o número de cópias da mesma mensagem.

Todavia, nota-se que diferentemente do caso com diversidade espacial, em que todas as réplicas recebidas em diferentes antenas possuem a mesma AoI instantânea, no caso com CC elas possuem AoI diferentes, isto é, as primeiras réplicas recebidas são mais “frescas” que as demais. Essa característica do sistema CC resulta em uma interessante (e não trivial) troca de benefícios: aumentar o número de réplicas aumenta a probabilidade de recuperação da mensagem. Porém, esse aumento também impacta em uma AoI maior, visto que quanto maior o índice da réplica recebida, mais antiga ela é.



Antes de apresentar a AoI média do esquema TARQ-CC, é necessário apresentar a Conjectura a seguir.

**Conjectura 1.** *Para o esquema ARQ truncado com preempção proposto em (Gu et al., 2019), o qual foi adotado neste trabalho, a AoI média é igual ao valor esperado do intervalo entre mensagens subsequentes decodificadas com sucesso, ou seja*

$$\bar{\Delta} = \mathbb{E}[Y_i]. \quad (26)$$

É possível deduzir (26) por meio de uma comparação entre a AoI média apresentada em (Gu et al., 2019, Eq. (33)) com o valor esperado de  $Y_i$  em (Gu et al., 2019, Eq. (24)).

A partir de então, é possível determinar a AoI média para o TARQ-CC como apresentado no Teorema 2 a seguir.

**Teorema 2.** *A AoI média para o esquema TARQ-CC pode ser definida como:*

$$\bar{\Delta}_{cc} = \frac{1-p}{p} + \frac{p \left( \Psi + \sum_{l=1}^L f(l) l \right) + f(L) (1-p)(L+1/p)}{p \left( 1 - \sum_{l=1}^L f(l) \right) - f(L) (1-p)}, \quad (27)$$

em que

$$f(l) = q_{cc}(l) (1-p)^{l-1} p \quad (28a)$$

e

$$\Psi = e^{-\lambda p} (\Lambda + 1) (1 - q_{cc}(L)) - \frac{e^{-\lambda}}{\Gamma(L)} \Lambda^L, \quad (28b)$$

sendo  $\Lambda = \lambda(1-p)$ .

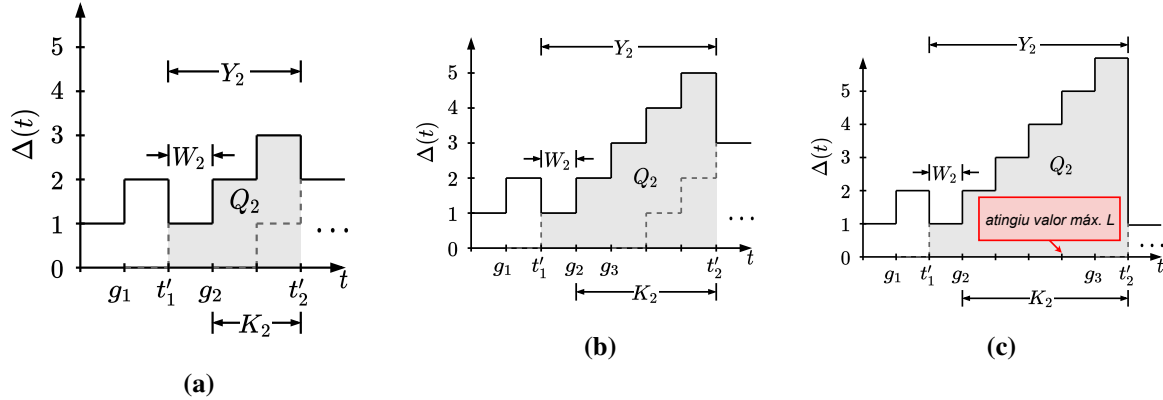
*Demonstração:* Assumindo que a Conjectura 1 é válida, é necessário obter o valor esperado para  $Y_i$ , que é o intervalo de tempo entre a geração de mensagens consecutivas. Sendo  $W_i$  o tempo de espera para a mensagem  $(i-1)$  até  $G_i$  (o tempo o que a próxima mensagem foi gerada), e  $K_i$  sendo o tempo desde  $G_i$  até que a mensagem seja decodificada corretamente no AP. Tem-se, portanto:

$$\mathbb{E}[Y_i] = \mathbb{E}[W_i] + \mathbb{E}[K_i]. \quad (29)$$

Como a geração de mensagens é representada por um processo de Bernoulli com probabilidade de geração  $p$ , tem-se que  $\Pr\{W_i = k\} = (1-p)^k p$ , de forma que o valor esperado  $W_i$  pode ser representado como: (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2007, Eq. (0.231.2))(Gu et al., 2019, Eq. (12))

$$\mathbb{E}[W_i] = \sum_{k=1}^{\infty} \Pr\{W_i = k\} = \frac{1-p}{p}. \quad (30)$$

**Figura 6 – Exemplo da evolução de  $K_i$ , para  $i = 2$  e considerando  $L = 3$ . Em (a) a mensagem gerada no tempo  $g_2$  é decodificada corretamente, sem ocorrer preempção ou excedendo o número máximo de retransmissões; Em (b) ocorre preempção no tempo  $g_3$ ; Em (c) o número máximo de retransmissões é atingido e a mensagem é descartada.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na perspectiva da primeira mensagem gerada após a mensagem  $(i - 1)$  ser decodificada corretamente, existem três possibilidades que determinam o comportamento de  $K_i$  (Gu *et al.*, 2019):

**Caso 1:** A mensagem em questão é decodificada corretamente pelo AP;

**Caso 2:** Ocorre preempção por uma ou mais mensagens, e esta é descartada;

**Caso 3:** Após  $L$  retransmissões não foi possível decodificar, sendo a mensagem descartada e o ED aguarda uma nova informação.

Tais eventos estão ilustrados na Figura 6. Portanto, como os eventos são complementares, o valor esperado de  $K_i$  é

$$\mathbb{E}[K_i] = \sum_{a=1}^3 \mathbb{E}[K_i^a], \quad (31)$$

onde  $\mathbb{E}[K_i^a] \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{E}[K_i | \text{Caso } a] \Pr\{\text{Caso } a\}$ , com  $a \in \{1, 2, 3\}$ , sendo  $\Pr\{\text{Caso } a\}$  a probabilidade do **Caso**  $a$  e  $\mathbb{E}[K_i | \text{Caso } a]$  o valor esperado correspondente.

Quando utiliza-se CC, a probabilidade do AP decodificar a mensagem na transmissão  $l$  (com  $l \leq L$ ) é dada por:

$$d(l) = (1 - p)^{l-1} q_{\text{CC}}(l - 1) \left( 1 - \frac{q_{\text{CC}}(l)}{q_{\text{CC}}(l - 1)} \right), \quad (32)$$

onde  $(1 - p)^{l-1}$  é a probabilidade de nenhuma mensagem ser gerada nos  $l - 1$  intervalos de tempo anteriores (não ocorre preempção),  $q_{\text{CC}}(l - 1)$  é a probabilidade de *outage* da combinação de máxima razão (MRC) das  $l - 1$  mensagens anteriores calculada por (25) (implicando que as

$l-1$  transmissões anteriores não foram decodificadas) e  $(1 - q_{\text{CC}}(l)/q_{\text{CC}}(l-1))$  é a probabilidade da mensagem ser decodificada na transmissão  $l$ , sendo que não foi decodificada nas  $(l-1)$  transmissões anteriores. Portanto,  $\mathbb{E}[K_i^1]$  é obtido como:

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[K_i^1] &= \sum_{l=1}^L d(l) l \\ &= \sum_{l=1}^L l (1-p)^{l-1} [q_{\text{CC}}(l-1) - q_{\text{CC}}(l)] \\ &= e^{-\lambda p} (\Lambda + 1) (1 - q_{\text{CC}}(L)) - \frac{e^{-\lambda} \Lambda^L}{(L-1)!},\end{aligned}\tag{33}$$

onde a última igualdade é obtida com o auxílio de (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2007, Eq. 8.352.6) e  $\Lambda \stackrel{\text{def}}{=} \lambda(1-p)$ .

Conforme os autores mencionam em (Gu *et al.*, 2019), os Casos 2 e 3 possuem uma condição que  $K_i$  pode atingir o infinito devido à múltiplas preempções. A solução adotada em (Gu *et al.*, 2019) (a qual foi derivada de (Chen; Huang, 2016)) considera um método recursivo que leva a

$$\mathbb{E}[K_i^2] = \sum_{l=1}^{L-1} q_{\text{comb}}(l) (1-p)^{l-1} p (l + \mathbb{E}[K_i])\tag{34}$$

e

$$\mathbb{E}[K_i^3] = q_{\text{comb}}(L) (1-p)^{L-1} (L + \mathbb{E}[W_i] + \mathbb{E}[K_i]),\tag{35}$$

onde  $q_{\text{comb}}(l)$  é a probabilidade de *outage* do esquema de combinação utilizado no AP, depois de  $l$  transmissões. No esquema TARQ original de (Gu *et al.*, 2019), tem-se que  $q_{\text{comb}}(l) = q^l$ , enquanto para CC tem-se  $q_{\text{comb}}(l) = q_{\text{CC}}(l)$ . Para mais detalhes sobre (34) e (35), referir-se a (Gu *et al.*, 2019, Eq. (17)).

Substituindo (30) em (35), utilizando (33), (34) e (35) em (31), isolando  $\mathbb{E}[K_i]$  e substituindo em (29) juntamente com (30), é possível finalmente obter a AoI média do TARQ-CC apresentada em (27), com mais algumas manipulações matemáticas, concluindo a demonstração.  $\square$

### 3.6 RESULTADOS NUMÉRICOS

Na sequência é apresentada uma análise do desempenho dos esquemas propostos em comparação com o TARQ original em (Gu *et al.*, 2019), e portanto são adotados parâmetros de uma rede narrowband-IoT (NB-IoT), apresentados na Tabela 3. Resultados analíticos são obtidos utilizando (17) para o TARQ original, (18) para TARQ com diversidade SC ou MRC e (27) para

**Tabela 3 – Parâmetros utilizados nos resultados numéricos do Capítulo 3 (Gu *et al.*, 2019).**

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Frequência da portadora $f_c$	940 MHz	Largura de Banda $B$	200 kHz
Densidade de ruído $N_0$	-174 dBm/Hz	Distância	2000 m
Perda de percurso $\kappa$	158 dB (Hata)	Taxa de transmissão $R$	100 kbps/Hz

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

o TARQ-CC. Resultados numéricos são obtidos via simulações Monte Carlo, com  $10^6$  *time slots* simulados.

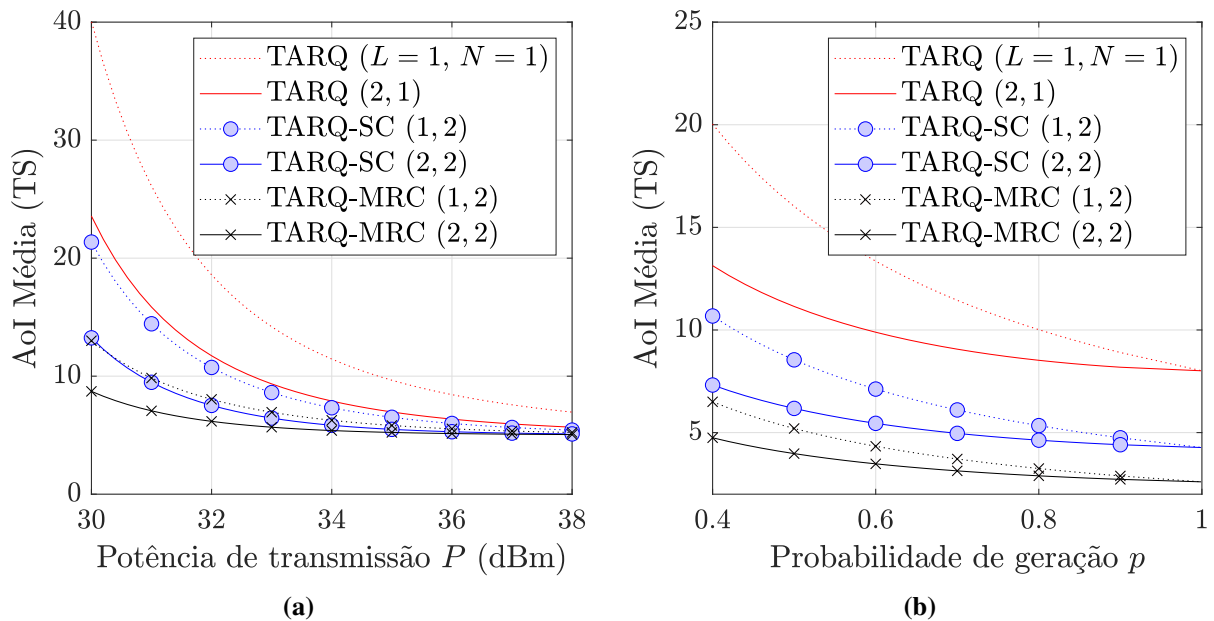
Na Figura 7(a) é apresentada a AoI para diferentes valores de potência de transmissão. De acordo com o esperado, a AoI reduz consideravelmente com o aumento de  $P$  (devido à redução da probabilidade de *outage*), adicionalmente, os esquemas com diversidade apresentam ganhos consideráveis em termos de AoI, sendo o TARQ-MRC o esquema com a menor AoI.

Conforme observa-se na Figura 7(a), é possível melhorar a AoI aumentando o número de retransmissões  $L$  ou o número de antenas receptoras  $N$ . Porém, em cenários com alta taxa de atualização, ou seja, para valores maiores de  $p$ , aumentar  $L$  não irá reduzir a AoI, devido à preempção da mensagem antiga pela mais recente, onde provavelmente o ED não irá conseguir atingir  $L$  retransmissões. Esse conceito é ilustrado na Figura 7(b), a qual apresenta a AoI para diferentes valores de probabilidade de geração de mensagens.

Na Figura 8(a) é ilustrada a influência da quantidade de antenas de recepção  $N$  na AoI, onde é perceptível que a AoI decresce exponencialmente com o aumento do número de antenas de recepção, sendo a AoI ainda menor para diversidade MRC do que para SC. O compromisso entre AoI e consumo energético é apresentado na Figura 8(b). Como o consumo utilizado na recepção não é computado nesse modelo, pois geralmente o AP não possui restrições de consumo, conforme esperado o TARQ-MRC apresenta o melhor compromisso entre AoI e consumo energético.

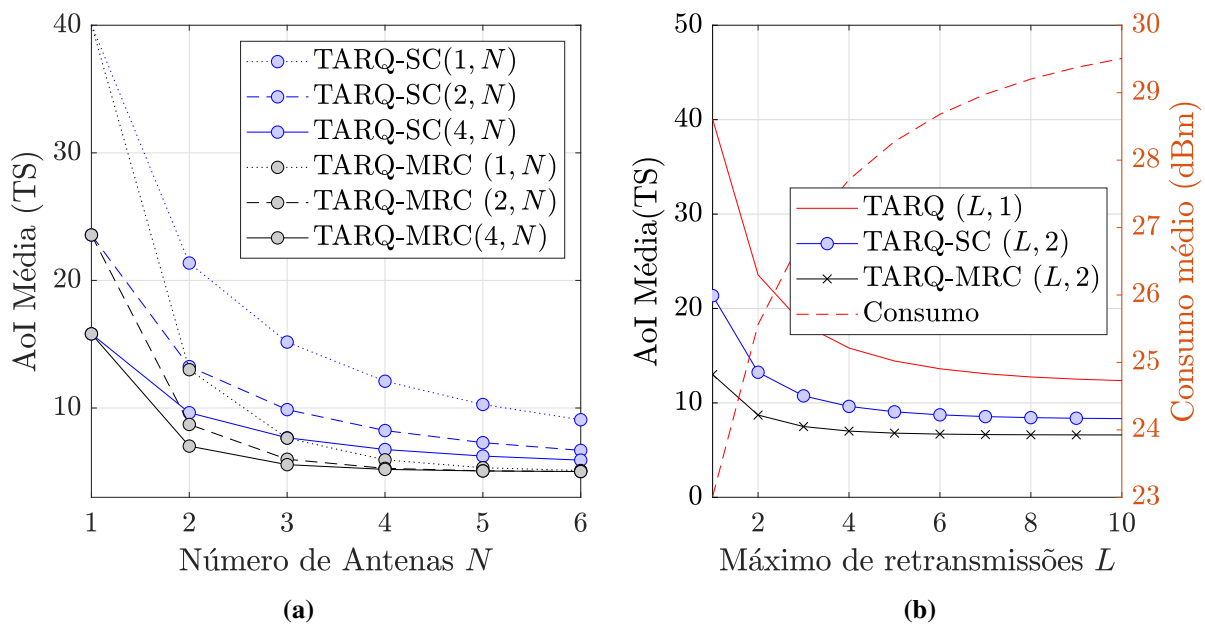
Para potências de transmissão maiores, o consumo energético aumenta ainda mais com o número de retransmissões  $L$ , porém sem decrementar a AoI média. Dessa forma, espera-se obter um valor ótimo de  $L$ . Para tal, a Figura 9(a) apresenta o valor ótimo de  $L$  que minimiza a AoI média para determinada restrição de potência  $P_C$  e número de antenas  $N$ . Observa-se que os esquemas TARQ-SC e TARQ-MRC geralmente necessitam de menos retransmissões do que o TARQ, além de atingirem uma AoI menor, conforme apresentado na Figura 9(b).

**Figura 7 – AoI média em função da (a) potência de transmissão  $P$ , para  $p = 0.2$  e (b) probabilidade de geração de mensagens  $p$ , para  $P = 30$  dBm.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

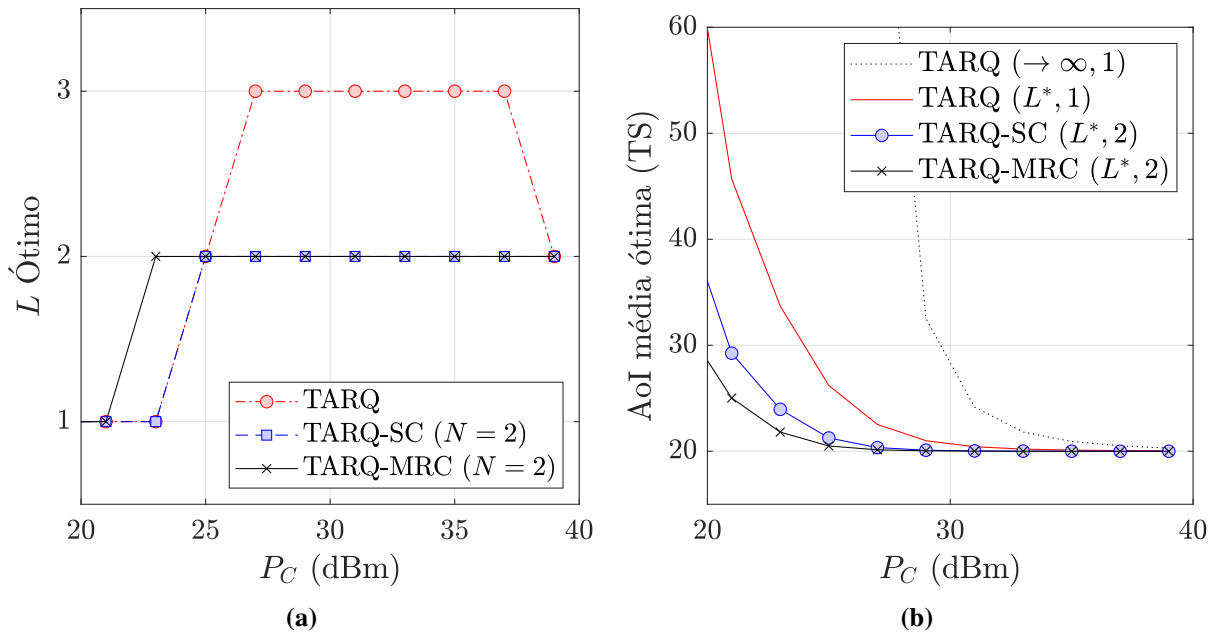
**Figura 8 – (a) AoI média em função do número de antenas de recepção e (b) AoI média (eixo esquerdo) e consumo médio (eixo direito) em função do número máximo de retransmissões  $L$ .**



Fonte: Elaborado pelo autor.

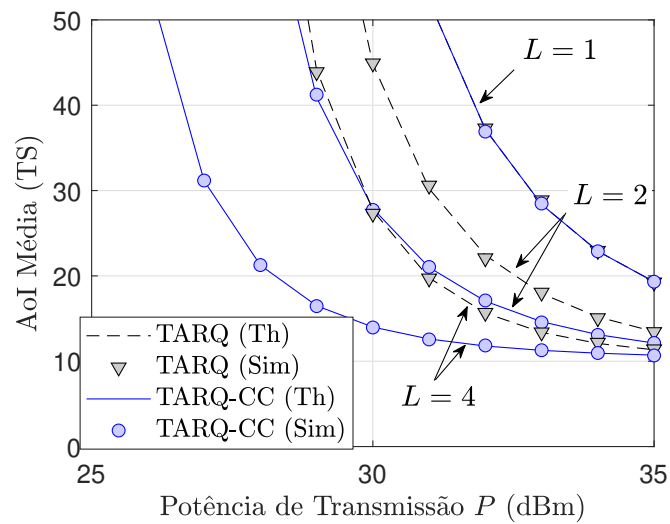
A Figura 10 apresenta a relação entre a AoI e a potência de transmissão para  $p = 0.1$  e número máximo de retransmissões  $L \in \{1, 2, 4\}$ , comparando o esquema TARQ original com o TARQ-CC proposto. Observa-se a combinação adequada das múltiplas réplicas pode reduzir a AoI média quando comparado ao esquema TARQ. Por exemplo, o esquema TARQ-CC com apenas  $L = 2$  é capaz de atingir praticamente a mesma AoI que o esquema TARQ com  $L = 4$ .

**Figura 9 – Compromisso AoI-energia:** (a) valor ótimo de  $L$  que minimiza a AoI para uma determinada restrição de potência  $P_C$ , para  $p = 0.05$ ; e (b) AoI mínima obtida com  $L$  otimizado. Para efeitos de comparação, o caso ideal  $L \rightarrow \infty$  está ilustrado por uma linha pontilhada preta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

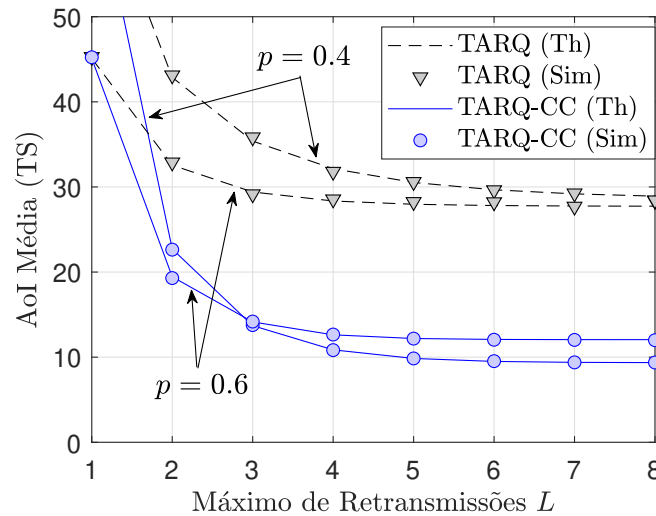
**Figura 10 – Relação entre AoI média e potência de transmissão  $P$ , para  $p = 0.1$  e número máximo de transmissões  $L \in \{1,2,4\}$ .**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, percebe-se que a Conjectura 1 é válida, já que os resultados analíticos e simulados estão coerentes.

**Figura 11** – AoI média em função do número máximo de retransmissões  $L$ , para  $P = 28$  dBm e taxa de geração de mensagens  $p \in \{0.4, 0.6\}$ .

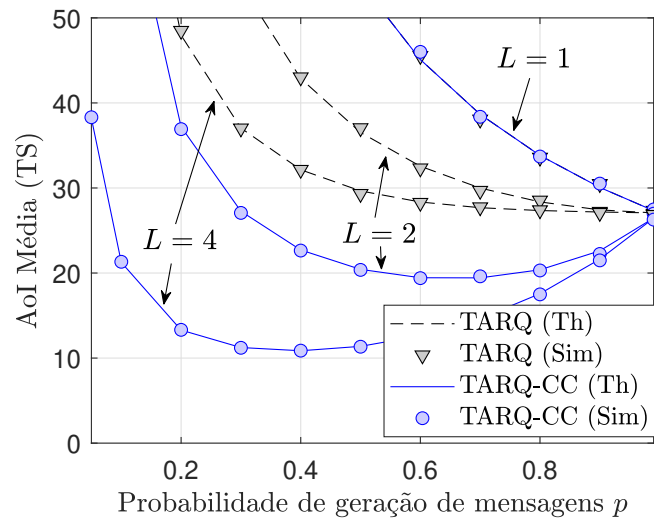


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 11 é apresentada a AoI para variações de  $L$  com uma potência de transmissão  $P = 28$  dBm e probabilidade de geração de mensagens  $p \in \{0.4, 0.6\}$ . Enquanto a AoI para ambas propostas diminui com o aumento das retransmissões  $L$ , observa-se que o valor de saturação final é consideravelmente menor para o TARQ-CC. Uma interessante observação é que para o TARQ aumentar o valor de  $p$  (ou seja, ocorrer mais preempção das mensagens) pode ser mais vantajoso por enviar informações mais recentes. Porém, para o TARQ-CC há um comportamento diferente, já que o valor mínimo atingido nesse caso é menor para  $p = 0.4$ . Portanto, demonstrando que há um ponto de otimização/compromisso entre gerar mais mensagens e enviar dados mais recentes ou aumentar a probabilidade de decodificação retransmitindo a mesma mensagem e re combinado os dados no destino.

Para visualizar com mais detalhes o ponto de otimização de  $p$ , na Figura 12 é apresentada a AoI em função da probabilidade de geração de mensagens para  $P = 28$  dBm e  $L \in \{1, 2, 4\}$ . Conforme esperado, a AoI para o esquema TARQ diminui com o valor de  $p$ , atingindo o valor mínimo  $\bar{\Delta} = 1/(1 - q)$  em  $p = 1$ , independentemente do valor de  $L$ . Por outro lado, o esquema TARQ-CC tende para o mesmo valor  $1/(1 - q)$  com o aumento de  $p$ , este apresenta um valor de  $p$  ótimo que minimiza a AoI e varia com o número de retransmissões  $L$ . Pode-se entender esse efeito como um compromisso entre transmitir uma mensagem (mais antiga) mais vezes e aumentar a probabilidade de decodificação, ou transmitir dados mais recentes com uma probabilidade de sucesso menor.

**Figura 12 – AoI média em função da probabilidade de geração de mensagens  $p$ , para  $P = 28$  dBm e número máximo de retransmissões  $L \in \{1,2,4\}$ .**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Embora o modelo apresentado forneça uma análise interessante do compromisso entre consumo energético relacionado ao envio de múltiplas cópias da mesma mensagem e as técnicas de diversidade na recepção, este é limitado à idealidade de apenas um dispositivo transmitindo para o destino. No próximo Capítulo será abordado um cenário com múltiplos dispositivos transmitindo de forma aleatória, sujeitos a colisão.

### 3.7 COMENTÁRIOS

Neste Capítulo foi avaliada uma rede composta de um dispositivo que transmite informações para um *Access Point* que possui a capacidade de aumentar a ordem de diversidade por meio da combinação de múltiplas cópias independentes de um mesmo sinal, seja em tempos distintos (diversidade temporal) ou com múltiplas antenas de recepção (diversidade espacial). Os esquemas propostos, denominados TARQ-SC, TARQ-MRC e TARQ-CC atingem um desempenho melhor do que a proposta original. Uma limitação do modelo apresentado neste Capítulo é que considera-se apenas um dispositivo ocupando o meio sem fio, enquanto que o conceito de monitoramento remoto em IoT implica em uma quantidade massiva de dispositivos, sujeitos a interferência e/ou colisão dos sinais entre si. Para tal, no Capítulo 4 é apresentado um modelo com múltiplas fontes de informação.



## 4 AGE OF INFORMATION E ACESSO ALEATÓRIO

Neste Capítulo considera-se um cenário em que múltiplos dispositivos compartilham um mesmo canal para transmitir aleatoriamente informações para um AP em comum (cenário de *uplink*). Técnicas de controle do acesso ao meio sem fio tornam-se relevantes nesse sentido, pois deve haver um ponto de operação onde todos os dispositivos conseguem transmitir mensagens com um risco de colisão menor, o que pode reduzir a AoI.

A proposta de (MUNARI, 2021) e outros métodos modernos baseados em ALOHA como (NGO *et al.*, 2021; LIVA, 2011; CASINI *et al.*, 2007) demonstram que soluções *grant-free*, e portanto distribuídas, ainda são competitivas com relação à esquemas centralizados *grant-based*. Adicionalmente, conforme (BERTSEKAS; GALLAGER, 1992), quando compara-se técnicas de multiplexação no tempo ou em frequência, o desempenho em termos de *delay* médio ou AoI pode ser pior do que ALOHA, principalmente quando algumas filas estão vazias e outras estão com pacotes a transmitir, ou seja, alguns canais com acesso ortogonal (do inglês *Orthogonal Multiple Access* (OMA)) podem não estar sendo utilizados, enquanto outros estão com atraso no envio dos pacotes.

Nesse contexto, técnicas de acesso não ortogonais (do inglês *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA)) podem ser relevantes (YUAN *et al.*, 2022). O trabalho de (Maatouk *et al.*, 2019) realizou uma comparação entre NOMA e OMA em termos de AoI. Conforme (Maatouk *et al.*, 2019), apesar de a estratégia NOMA atingir uma eficiência espectral maior, há casos em que o acesso ortogonal atinge uma AoI menor do que NOMA, porém, quando a quantidade de dispositivos é maior, NOMA consegue decodificar mais informações devido ao ganho em eficiência espectral.

A técnica do SIC (LI; DAI, 2016; GAO *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018; GUPTA; VENKATESH, 2022) em conjunto com NOMA vem tornando-se relevante, pois apresenta uma possível solução para a demanda crescente de espectro, já que possibilita que mais de um dispositivo ocupe o mesmo canal. Ademais, é um facilitador de protocolos *grant-free*, onde não é necessário alocação de recursos antes de uma transmissão.

Os autores em (Yates; Kaul, 2017) apresentam uma comparação entre utilizar estratégias simples como o ALOHA e esquemas centralizados, onde o AP controla o acesso ao meio. Apesar de esquemas centralizados apresentarem uma AoI média menor, devido à diminuição de perdas de pacotes por colisão, esquemas baseados em acesso ALOHA (os quais serão identificados

como AIRA no escopo deste trabalho) têm a característica de serem distribuídos, trazendo um compromisso melhor entre atualizações de informações e complexidade de implementação da rede.

Com o intuito de reduzir a quantidade de colisões, em (CHEN *et al.*, 2020) foi proposto o ADRA, sendo sua proposta utilizar a AoI como limiar para habilitar o dispositivo para a transmissão. A partir do momento em que a AoI do dispositivo é maior que um limiar  $\delta$ , o dispositivo envia pacotes com uma probabilidade  $p'$ , caso contrário o dispositivo não transmite.

Em (YATES, 2020) são apresentados os trabalhos anteriores nesse contexto. Porém, uma grande desvantagem é a carência de modelos que incluam os efeitos de interferência de outros dispositivos e o desvanecimento do canal, fatores presentes na maioria das aplicações de redes sem fio.

Uma alternativa para suprir as perdas em eficiência espectral devido a colisões é utilizar técnicas como NOMA-SIC no domínio da potência no (*uplink*), que beneficia-se dos diferentes níveis de potência de cada mensagem no destino para conseguir criar uma ordem de decodificação e tratar mensagens com potência menor como interferência.

A partir dos conceitos apresentados na Seção 4.1, as Seções 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam a análise dos esquemas AIRA, ADRA e AIRA-SIC, respectivamente. Ao final, na Seção 4.5 os esquemas propostos são comparados por meio dos resultados numéricos e analíticos.

**Tabela 4 – Notação utilizada no Capítulo 4**

<b>Símbolo</b>	<b>Definição</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Definição</b>
$\delta$	Limiar de AoI para o ADRA	$p'$	Prob. de acesso ao canal para o ADRA
$N$	Número de dispositivos	$y$	Sinal recebido pelo AP
$h_i$	Coefficiente de canal para o ED $i$	$P$	Potência de transmissão
$s_i$	Mensagem transmitida para o ED $i$	$n$	Ruído AWGN
$\mathcal{M}$	Conjunto de EDs ativos em um TS	$M$	Cardinalidade de $\mathcal{M}$
$N_0$	Densidade espectral do ruído	$g_i$	Coef. de desvanecimento Rayleigh
$\kappa_i$	Perdas em larga escala para o ED $i$	$G$	Ganho combinado das antenas
$l$	Comprimento de onda da portadora	$c$	Velocidade da luz no vácuo
$d_i$	Distância do ED $i$ ao AP	$\gamma$	Expoente de perda de percurso
$f_c$	Frequência da portadora	$\hat{R}$	Taxa de transmissão em bps/Hz
$w$	Potência instantânea recebida no AP	$\mathbb{E}[\cdot]$	Valor esperado
$B$	Largura de banda	$\Delta_i$	AoI média para o ED $i$
$\varphi_i^{\text{sch}}$	Prob. de decodificação com sucesso	$\alpha_{i M}$	Prob. de <i>outage</i> para o ED $i$ para $M$ EDs ativos
$p$	Prob. de acesso ao canal para o AIRA	$\Delta_i(t)$	AoI instantânea para um ED $i$
$Z_i$	Intervalo entre decodificações com sucesso	$\pi^M$	Permutação de $M$ EDs
$\pi_m$	ED $m$ na ordem de decodificação	$\prod_M$	Conjunto de todas possibilidades de decodificação
$I_m$	Interferência observada pelo ED $m$	$E_{m \pi}^M$	Evento de decodificação da mensagem do ED $\pi_m$
$\hat{h}_i$	Estimativa do canal $h_i$	$\epsilon_i$	Erro na estimativa do canal do ED $i$
$R_{\pi_m}$	Taxa atingida pelo ED $\pi_m$	$p^*$	CAP ótima

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

## 4.1 MODELO DO SISTEMA

Considera-se um canal sem fio comum à  $N$  dispositivos enviando informação para um destino em *time slots*, sendo que todos os dispositivos possuem a mesma probabilidade de acessar o meio (CAP, do inglês *Channel Access Probability*)  $p^1$ , e caso esteja ativo, o dispositivo primeiramente coleta dados recentes da variável monitorada e gera uma mensagem. Desta forma, é possível representar o sinal recebido  $y$  no AP como (GAO *et al.*, 2017, Eq. (2)):

$$y = \sum_{i \in \mathcal{M}} h_i \sqrt{P_i} s_i + n, \quad (36)$$

onde  $\mathcal{M}$  é o conjunto de dispositivos ativos em um TS, com cardinalidade  $|\mathcal{M}| = M \leq N$ ,  $s_i$  é a mensagem com energia unitária transmitida pelo ED  $i$ ,  $P_i$  é a potência de transmissão para o ED  $i$  e  $n \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$  é o AWGN, onde  $N_0$  é a densidade espectral de ruído. O coeficiente do canal  $h_i = g_i / \sqrt{\kappa_i}$  é composto pelas perdas em larga escala  $\kappa_i = Gl^2 / (4\pi)^2 d_i^\gamma$  (GOLDSMITH, 2005), onde  $\gamma$  é o expoente de perda de percurso,  $G$  é o ganho das antenas combinado,  $d_i$  é a distância entre o ED  $i$  e o AP, e  $l = c/f_c$  é o comprimento de onda, sendo  $c$  a velocidade da luz no vácuo e  $f_c$  a frequência da portadora. O coeficiente de desvanecimento é modelado como  $g_i \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ , ou seja, desvanecimento Rayleigh em blocos, que permanece constante durante um *time slot* e varia de forma independente e identicamente distribuída (i.i.d.) entre *time slots*.

Inicialmente assume-se que o AP possui a CSI (do inglês *Channel State Information*) com relação ao dispositivos, porém não há *feedback* sobre o estado do canal para os EDs. Desta forma, como não há critérios para alocação de potência, assume-se que todos os dispositivos transmitem com a mesma potência  $P^2$  e com a mesma taxa de transmissão  $\hat{R}$  (dado em bps/Hz).

### 4.1.1 Probabilidade de *outage* em um canal livre de colisões

Assumindo-se momentaneamente que apenas o ED  $i$  está transmitindo em um determinado TS, ou seja, não há colisões e portanto  $M = 1$ . A potência instantânea recebida no

<sup>1</sup> Nota-se que essa hipótese é válida em redes que possuem um requisito de atualização de dados homogêneo, ou seja, monitoram variáveis semelhantes em termos de amostragem. Porém, esta pode ser heterogênea em casos que seja necessária uma diversidade de CAP entre os dispositivos para garantir a urgência de cada informação.

<sup>2</sup> É importante evidenciar que o processo do SIC requer diferença de potência entre os sinais recebidos, portanto controles de potência de transmissão (geralmente utilizados para equalizar a potência dos sinais recebidos de todos os dispositivos) não traz benefícios para o SIC (ALI *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2020). Adicionalmente, realizar controle e alocação de potência centralizado em uma rede IoT massiva traz grandes dificuldades de implementação (YUAN *et al.*, 2021; ZHOU *et al.*, 2022). Para os casos com CSI no transmissor, uma possibilidade seria adotar o esquema SIC fixo com um *back-off* de potência de (ZHANG *et al.*, 2016) ou os esquemas PDMA (do inglês *Power Domain Multiple Access*) apresentados em (CHOI, 2016; Choi, 2017; CHEN *et al.*, 2020b).

AP é  $w_i = P|h_i|^2$ , a qual possui valor esperado  $\mathbb{E}[w_i]$ . Dessa forma,  $w_i$  é uma variável com distribuição exponencial com parâmetro  $\lambda_i = 1/\mathbb{E}[w_i]$  e a SNR instantânea é  $w_i/(N_0B)$ , onde  $B$  é a largura de banda. A pdf (função densidade de probabilidade, do inglês *probability density function*) de  $w_i$  pode ser representada como (WANG *et al.*, 2018)

$$f_{w_i}(w) = \lambda_i e^{-\lambda_i w}. \quad (37)$$

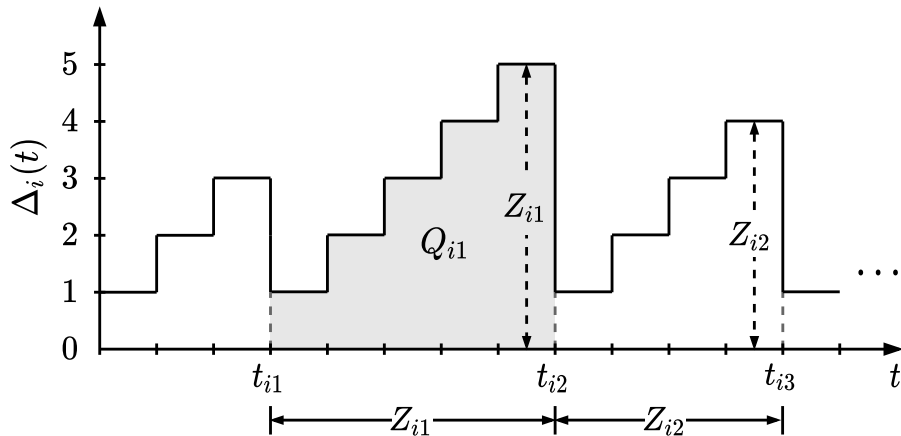
Adicionalmente, um evento de *outage* ocorre quando a potência recebida é menor que um limiar para decodificação com uma taxa de transmissão  $\hat{R}$ . Tal evento possui probabilidade (GOLDSMITH, 2005):

$$\begin{aligned} \alpha_{i|1} &= \Pr\{w_i < \beta N_0 B\} = \int_0^{\beta N_0 B} \lambda_i e^{-\lambda_i w_i} \mathbf{d}w_i \\ &= 1 - \exp(-\lambda_i \beta N_0 B), \end{aligned} \quad (38)$$

onde  $\beta = 2^{\hat{R}} - 1$  e  $\alpha_{i|M}$  é definido como a probabilidade de *outage* para o  $i$ -ésimo ED quando  $M$  dispositivos estão ativos, que nesse caso em particular se reduz a  $\alpha_{i|1}$  em (38) uma vez que  $M = 1$ .

#### 4.1.2 Age of Information: AoI média

**Figura 13 – Evolução da AoI instantânea em função do índice de *time slot* para o ED  $i$ .**



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 13 apresenta a evolução da AoI para um dispositivo  $i$ . Enquanto o AP não recebe informações atualizadas do ED  $i^3$ , a AoI cresce linearmente em formato de escada devido

<sup>3</sup> O AP não recebe uma informação nova caso o ED esteja inativo (de acordo com a probabilidade de ativação  $p$ ) ou houve uma falha na decodificação da mensagem (um evento de *outage* ocorre).

ao esquema em *time slots* conforme a Seção 2.1.1. Nos casos em que a mensagem é decodificada corretamente, a AoI assume o valor unitário no próximo TS, considerando que o ED coletou uma informação recente antes de realizar a transmissão. Para exemplificar, em  $t_{i1}$  a mensagem 1 do ED  $i$  é decodificada com sucesso, portanto  $\Delta(t_{i1}) = 1$  neste TS. Adicionalmente,  $Z_{ij}$  representa o tempo decorrido desde a decodificação da mensagem  $j - 1$  até a mensagem  $j$ .

Considerando a Figura 13 como referência, o objetivo é obter uma expressão para a AoI média  $\bar{\Delta}_i$  para o ED  $i$ . A partir das considerações sobre AoI média em tempo discreto apresentadas na Seção 2.1.1, sabe-se que tal expressão depende da área sob  $\Delta_i(t)$  e do intervalo entre as mensagens decodificadas com sucesso, conforme as expressões em (6) e (7).

Para tal, observa-se que a área destacada  $Q_{i1}$  na Figura 13, por exemplo, é composta por um triângulo com lados iguais com tamanho  $Z_{i1}$ . Dessa forma, tem-se  $Z_{i1} = 5$  e  $Q_{i1} = (25 + 5)/2 = 15$ , portanto:

$$Q_{ij} = \frac{Z_{ij}^2 - Z_{ij}}{2} + Z_{ij} = \frac{Z_{ij}^2 + Z_{ij}}{2}, \quad (39)$$

que pode ser considerando como um caso específico onde  $T_i = 1$  em (6), que condiz com o modelo de geração de novas mensagens adotado neste Capítulo. Portanto, a expressão para a AoI média nesse caso é definida como:

$$\bar{\Delta}_i = \frac{\mathbb{E}[Q_i]}{\mathbb{E}[Z_i]} = \frac{\mathbb{E}[Z_i^2] + \mathbb{E}[Z_i]}{2\mathbb{E}[Z_i]} = \frac{\mathbb{E}[Z_i^2]}{2\mathbb{E}[Z_i]} + \frac{1}{2}. \quad (40)$$

O intervalo entre decodificações  $Z_i$  é uma variável com distribuição geométrica, com valores esperados definidos como (Yates; Kaul, 2017)

$$\mathbb{E}[Z_i] = 1/\varphi_i^{\text{sch}} \quad (41a)$$

e

$$\mathbb{E}[Z_i^2] = 2/(\varphi_i^{\text{sch}})^2 - 1/\varphi_i^{\text{sch}}, \quad (41b)$$

onde  $\varphi_i^{\text{sch}}$  é a probabilidade da mensagem ser decodificada com sucesso para o ED  $i$  (Yates; Kaul, 2017) quando operando em um esquema sch. Substituindo (41) em (40), tem-se

$$\bar{\Delta}_i = \frac{1}{\varphi_i^{\text{sch}}}. \quad (42)$$

No decorrer deste Capítulo, considera-se a abreviação  $\text{sch} \in \{\text{AI}, \text{AD}, \text{AI} - \text{SIC}\}$  para representar os esquemas AIRA (Yates; Kaul, 2017), ADRA (CHEN *et al.*, 2020) e o esquema proposto AIRA-SIC, respectivamente. Portanto, para obter expressões analíticas para os esquemas propostos, é necessário encontrar a probabilidade de decodificação com sucesso  $\varphi_i^{\text{sch}}$  para  $\text{sch} \in \{\text{AI}, \text{AD}, \text{AI} - \text{SIC}\}$ .

## 4.2 AOI MÉDIA PARA O ESQUEMA AIRA

No esquema AIRA, todos os EDs possuem a mesma probabilidade de ativação  $p$ . Portanto, caso mais de um ED esteja ativo em um TS, uma colisão ocorre e todas as mensagens transmitidas são descartadas. Dessa forma, para que o destino seja capaz de decodificar uma mensagem transmitida pelo ED  $i$  em um determinado TS, são necessários três requisitos:

- O ED  $i$  deve transmitir no TS em questão, cuja probabilidade de ocorrência é  $p$ ;
- Os outros  $N$  dispositivos não devem transmitir, o que ocorre com probabilidade  $(1-p)^{N-1}$ ;
- O link de comunicação não pode estar em *outage*, que ocorre com probabilidade  $(1-\alpha_{i|1})$ .

Portanto, a probabilidade de sucesso na decodificação de determinada mensagem do usuário  $i$  pode ser definida como:

$$\varphi_i^{\text{AI}} = p q_i, \quad (43)$$

em que  $q_i = (1-p)^{N-1} (1-\alpha_{i|1})$ .

A partir de (43), é possível definir a AoI média para o ED  $i$  como:

$$\bar{\Delta}_i^{\text{AI}}(P,p,N) = \frac{1}{\varphi_i^{\text{AI}}} = \frac{1}{p(1-p)^{N-1}(1-\alpha_{i|1})}, \quad (44)$$

de forma que, assumindo que todos os EDs possuem o mesmo valor de  $p$ , a AoI média da rede pode ser representada como:

$$\bar{\Delta}^{\text{AI}}(P,p,N) = \frac{1}{Np(1-p)^{N-1}} \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1-\alpha_{i|1})}. \quad (45)$$

## 4.3 AOI MÉDIA PARA O ESQUEMA ADRA

No esquema proposto em (CHEN *et al.*, 2020), a probabilidade de acesso ao canal é definida de acordo com a AoI instantânea individual do ED. Especificamente, é definido um limiar de AoI  $\delta$ , e quando a AoI instantânea do ED é maior que  $\delta$  assume o valor  $p'$ , do contrário o dispositivo permanece inativo. Utilizando uma abordagem semelhante à apresentada em (CHEN *et al.*, 2020), é possível representar a AoI para o ADRA como:

$$\bar{\Delta}^{\text{AD}} = \frac{\delta}{2} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{p' q_i} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\delta}{2(p' q_i(\delta-1) + 1)}, \quad (46)$$

onde  $q_i$  é obtido pela seguinte relação:

$$q_i^{\frac{1}{(N-1)}} - \left(1 - \frac{1}{f(q_i)}\right) (1 - \alpha_{i|1})^{\frac{1}{(N-1)}} = 0, \quad (47)$$

sendo  $f(q_i) = \delta q_i + 1/p' - q_i$ . Observa-se que (47) é uma função implícita para a probabilidade de sucesso  $q_i$ . Porém, como os autores sugerem em (CHEN *et al.*, 2020), pode ser resolvida por métodos numéricos como bisseção.

Cabe ressaltar que, para que os EDs tenham o conhecimento de suas próprias AoIs instantâneas, é necessário que o AP envie alguma informação de *feedback* informando as mensagens que foram corretamente recebidas em casa TS, se alguma. Todavia, nota-se que essa mensagem de *feedback* é composta de apenas poucos bits, podendo ser desprezada em comparação aos pacotes de informação transmitidos pelos EDs, como também assumida ser livre de erros (CHEN *et al.*, 2020).

#### 4.4 AOI MÉDIA PARA O ESQUEMA AIRA-SIC

Diferentemente do SIC fixo proposto em (ZHANG *et al.*, 2016), considera-se que a ordem de decodificação é alterada de acordo com a potência instantânea recebida, conforme (GAO *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2016). Para tal, assume-se no momento que o AP possui o estado completo do canal (CSI), e posteriormente na Seção 4.4.2 é realizada uma breve análise da influência da CSI imperfeita na AoI.

Para o esquema AIRA-SIC proposto, ao detectar uma colisão, o AP primeiramente tenta decodificar o usuário com a maior potência de transmissão, enquanto trata os outros usuários como interferência no sinal. Caso obtenha sucesso na decodificação, o sinal deste usuário é removido do sinal composto recebido, e realiza-se outra iteração de decodificação para o segundo dispositivo em ordem de maior potência recebida para a menor, e assim sucessivamente até obter-se um sinal em *outage* ou ao recuperar o sinal de todos os dispositivos que transmitiram.

**Teorema 3.** *A AoI média do AIRA-SIC pode ser definida como:*

$$\bar{\Delta}^{\text{AI-SIC}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{M=1}^N \binom{N-1}{M-1} \frac{p^M (1 - \bar{\alpha}_{i|M})}{(1-p)^{M-N}} \right]^{-1}, \quad (48)$$

onde  $\bar{\alpha}_{i|M}$  está apresentado em (49), sendo  $\pi^M = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_M\}$  uma permutação em particular dos  $M$  EDs ativos, em ordem decrescente de potência instantânea recebida, de forma que

$\pi^M$  está incluso no conjunto de todas as possibilidades de decodificação  $\prod_M$ .

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{i|M} &= \frac{1}{\binom{N-1}{M-1}} \sum_{\substack{\pi \in \prod_M \\ i=\pi_i}} \sum_{\substack{\pi^M \in \prod_M \\ i=\pi_m}} \frac{\prod_{i=2}^M \lambda_{\pi_i}}{\prod_{i=2}^M \left( \sum_{k=1}^i \lambda_{\pi_k} \right)} \\ &\left[ 1 - \prod_{l=1}^m \Pr \left\{ \log \left( 1 + \frac{w_{\pi_m}}{N_0 B + \sum_{i=m+1}^M w_{\pi_i}} \right) \geq \hat{R} \mid \pi^M \right\} \right]. \end{aligned} \quad (49)$$

*Demonstração:* Considera-se  $\pi^M = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_M\}$  uma permutação em particular de  $M$  EDs ativos, em ordem decrescente de potência instantânea recebida, ou seja,  $w_{\pi_1} \geq w_{\pi_2} \geq \dots \geq w_{\pi_M}$ , de forma que  $\pi^M$  faz parte do conjunto com todas as possibilidades de ordem de decodificação  $\prod_M$ . Então, de (37), tem-se que  $\pi^M$  ocorre com probabilidade (WANG *et al.*, 2018, Eq. (9))

$$\begin{aligned} \Pr\{\pi^M\} &= \Pr\{w_{\pi_1} \geq w_{\pi_2} \geq \dots \geq w_{\pi_M}\} \\ &= \int_0^\infty \lambda_{\pi_M} e^{-\lambda_{\pi_M} w_{\pi_M}} dw_{\pi_M} \dots \int_{w_{\pi_2}}^\infty \lambda_{\pi_1} e^{-\lambda_{\pi_1} w_{\pi_1}} dw_{\pi_1} \\ &= \frac{\prod_{i=2}^M \lambda_{\pi_i}}{\prod_{i=2}^M \left( \sum_{k=1}^i \lambda_{\pi_k} \right)}. \end{aligned} \quad (50)$$

Para uma ordem de decodificação  $\pi^M$ , a taxa atingida pelo ED  $\pi_m$ , levando em conta a interferência causada pelos outros dispositivos na fila de decodificação, é dada por (WANG *et al.*, 2018, Eq. (3))

$$R_{\pi_m} = \log \left( 1 + \frac{w_{\pi_m}}{N_0 B + I_{\pi_m}} \right), \quad (51)$$

onde  $I_{\pi_m} = \sum_{i=m+1}^M w_{\pi_i}$  é a interferência para o ED  $\pi_m$ . Observa-se que o ED  $\pi_M$  não está sujeito à interferência, caso os outros  $M-1$  EDs sejam primeiramente decodificados com sucesso. Portanto, a decodificação com sucesso do dispositivo  $\pi_m$  é condicionada ao evento que sua taxa atingida em (51) seja maior que a taxa alvo da transmissão, assim como do evento em que todos os  $m-1$  EDs anteriores sejam decodificados com sucesso. Seja  $E_{m|\pi}^M$  o evento em que a mensagem do ED  $\pi_m$  é decodificada com sucesso pelo AP, dada a permutação  $\pi^M$ . Tal evento ocorre com probabilidade (WANG *et al.*, 2018, Eq. (5))

$$\Pr\{E_{m|\pi}^M\} = \Pr\{R_{\pi_m} \geq \hat{R} \mid \pi^M\}, \quad (52)$$

onde a taxa alvo de transmissão  $\hat{R}$  é a mesma para todos os EDs. Dessa forma, a probabilidade de *outage* para o ED  $\pi_m$  é (GAO *et al.*, 2017, Eq. (5))

$$\begin{aligned} \alpha_{\pi_m|M} &= 1 - \Pr\{E_{1|\pi}^M \cap \dots \cap E_{m|\pi}^M\} \\ &= 1 - \prod_{l=1}^m \Pr\{E_{l|\pi}^M\}, \end{aligned} \quad (53)$$



onde na segunda igualdade considera-se que os eventos  $E_{i|\pi}^M$  e  $E_{j|\pi}^M$  são mutuamente independentes para  $i \neq j$  (GAO *et al.*, 2017).

Como a ordem de decodificação varia de acordo com o estado instantâneo do meio sem fio, a probabilidade de *outage* média do ED  $i$  é obtida ponderando (53) com a probabilidade de ocorrência de cada ordem de decodificação (WANG *et al.*, 2018, Eq. (7))

$$\alpha_{i|M} = \sum_{\pi^M \in \prod_{M, i=\pi_m}} \Pr\{\pi^M\} \alpha_{\pi_m|M}. \quad (54)$$

Considerando que a probabilidade de um determinado ED transmitir simultaneamente com outros  $M - 1$  dispositivos é dada pela pmf - função massa de probabilidade, do inglês *probability mass function* da distribuição binomial na forma de  $\binom{N-1}{M-1} p^M (1-p)^{N-M}$ , a probabilidade de sucesso da mensagem do ED  $i$  para o esquema AIRA-SIC é:

$$\varphi_i^{\text{AI-SIC}} = \sum_{M=1}^N \binom{N-1}{M-1} p^M (1-p)^{N-M} (1 - \bar{\alpha}_{i|M}), \quad (55)$$

em que

$$\bar{\alpha}_{i|M} = \frac{1}{\binom{N-1}{M-1}} \sum_{\pi \in \prod_{M, i=\pi_i}} \alpha_{i|M} \quad (56)$$

inclui todos as possibilidades de usuários ativos e as respectivas ordens de decodificação, e  $\binom{N-1}{M-1}$  é o número de combinações que incluem o ED  $i^4$ . Portanto, a AoI média para o AIRA-SIC é finalmente obtida como

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}^{\text{AI-SIC}} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\varphi_i^{\text{AI-SIC}}} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{M=1}^N \binom{N-1}{M-1} p^M (1-p)^{N-M} (1 - \bar{\alpha}_{i|M}) \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (57)$$

que é (48), concluindo a demonstração.  $\square$

Para o caso específico de  $M = 1$  em (48), obtém-se a AoI do esquema AIRA de (45).

Considerando o caso particular onde todos os EDs possuem a mesma SNR média, a AoI média de (48) pode ser simplificada de acordo com o Corolário 3:

**Corolário 3.** *A AoI média do esquema AIRA-SIC quando todos os EDs possuem a mesma SNR média é dada por*

$$\bar{\Delta}^{\text{AI-SIC}} = \left[ \sum_{M=1}^N \binom{N-1}{M-1} \frac{p^M (1 - \alpha_M)}{(1-p)^{M-N}} \right]^{-1}, \quad (58)$$

<sup>4</sup> Observa-se que a combinação seleciona apenas  $M - 1$  EDs dos restantes  $N - 1$  EDs, pois o ED  $i$  já está incluído no conjunto.

onde  $\alpha_M$  é simplificado como

$$\alpha_M = 1 - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[ \prod_{l=1}^m \binom{M}{l} \frac{e^{-l\lambda\beta N_0 B}}{(\beta l + 1)^{M-l}} \right]. \quad (59)$$

*Demonstração:* Considerando uma SNR média igual,  $\lambda_{\pi_i} = \lambda \forall i$ , e  $\alpha_{i|M}$  pode ser simplificado como  $\alpha_M$ . Portanto, a probabilidade de ordem de decodificação em (50) pode ser simplificada como

$$\Pr\{\pi^M\} = \frac{\lambda^{M-1}}{M! \lambda^{M-1}} = \frac{1}{M!}, \quad (60)$$

pois existem  $M!$  combinações possíveis e com probabilidade igual. Na sequência, pode-se simplificar (WANG *et al.*, 2018, Eq. (12)) para cada evento de sucesso de decodificação (53), que resulta em

$$\Pr\{E_{m|\pi}^M\} = \binom{M}{m} \frac{e^{-m\lambda\beta N_0 B}}{(\beta m + 1)^{M-m}}. \quad (61)$$

Portanto, considerando que  $\Pr\{\pi^M\}$  é constante para um cenário de mesma SNR média, (54) é simplificada como:

$$\begin{aligned} \alpha_M &= \sum_{\pi^M \in \Pi_M, i=\pi_m} \Pr\{\pi^M\} \alpha_{\pi_m|M} \\ &= \Pr\{\pi^M\} \sum_{\pi^M \in \Pi_M, i=\pi_m} \alpha_{\pi_m|M}. \end{aligned} \quad (62)$$

Para levar em conta todas as possibilidades de ordem de decodificação  $\Pi_M$ , a soma em (62) é composta de  $M!$  termos. Porém, considerando SNR média equivalente para todos os EDs, os termos são reduzidos para  $M$ . Isso ocorre pois os conjuntos que possuem  $i = \pi_m$  possuem a mesma probabilidade de *outage* independentemente dos outros dispositivos no grupo. Portanto, para obter  $\alpha_M$  é necessário somar as probabilidades de *outage*  $\alpha_{\pi_m|M}$  multiplicadas por um fator  $(M - 1)!$ , que é o número de conjuntos que contêm o ED  $i = \pi_m$ .

$$\begin{aligned} \alpha_M &= \Pr\{\pi^M\} \sum_{\pi^M \in \Pi_M, i=\pi_m} \alpha_{\pi_m|M} \\ &= \Pr\{\pi^M\} (M - 1)! \sum_{m=1}^M \alpha_{\pi_m|M} \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \alpha_{\pi_m|M} \\ &= 1 - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[ \prod_{l=1}^m \binom{M}{l} \frac{e^{-m\lambda\beta N_0 B}}{(\beta m + 1)^{M-m}} \right], \end{aligned} \quad (63)$$

obtendo (59) e concluindo a demonstração.  $\square$

#### 4.4.1 Otimização da probabilidade de acesso ao canal

A probabilidade de acesso ao canal  $p$  pode ser entendida como o caso em que o ED sempre possui mensagens a transmitir, e  $p$  é a probabilidade do dispositivo acessar o canal em um *time slot*. Nesse caso, é importante analisar a importância de  $p$  na AoI média da rede. Nessa Seção, o objetivo é encontrar a probabilidade de acessar o canal  $p^*$  que otimiza a AoI média:

$$p^* = \underset{p}{\operatorname{argmin}} \quad \bar{\Delta}^{\text{AI-SIC}}. \quad (64)$$

Obter uma expressão para a CAP ótima  $p^*$  a partir de (64) pode não ser trivial em uma forma fechada. Uma possibilidade é obter uma solução utilizando métodos numéricos. Alternativamente, é possível simplificar o modelo de colisão do SIC para limitar até um número máximo de  $M$  EDs ativos com a SNR média igual. Apesar de tal simplificação ser restritiva, os resultados numéricos apresentados na Seção 4.5 apresentam que é uma aproximação válida mesmo em casos em que há uma diversidade de colisões e SNR.

**Teorema 4.** *A probabilidade de acesso ótima para o AIRA-SIC pode ser aproximada por:*

$$p^* \approx \frac{2b - a(N + 1) + \sqrt{a^2(N - 1)^2 - 4b(a - b)}}{2N(b - a)}, \quad (65)$$

em que  $a = (1 - \alpha_1)$  e  $b = (N - 1)(1 - \alpha_2)$ , sendo  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  obtidos a partir de (59).

*Demonstração:* Depois de limitar o número máximo de EDs em uma colisão para  $M = 2$ , a AoI média do AIRA-SIC em (58) é simplificada como

$$\bar{\Delta}^{\text{AI-SIC}} \approx \left[ p(1 - p)^{N-1}(1 - \alpha_1) + (N - 1)p^2(1 - p)^{N-2}(1 - \alpha_2) \right]^{-1}. \quad (66)$$

Então, o valor  $p^*$  em (65) é obtido como uma solução de

$$\frac{\partial}{\partial p} \left[ p(1 - p)^{N-1}(1 - \alpha_1) + (N - 1)p^2(1 - p)^{N-2}(1 - \alpha_2) \right]^{-1} = 0, \quad (67)$$

concluindo a demonstração.  $\square$

Para o cenário assintótico de alta SNR, a aproximação de (65) pode ser aproximada novamente como apresentado no Corolário 4.

**Corolário 4.** *Quando  $P \rightarrow \infty$ , a CAP ótima, que minimiza a AoI média no esquema AIRA-SIC pode ser assintoticamente aproximada como*

$$\overset{\rightarrow}{p}^* \approx \frac{1 + \sqrt{5}}{2N} \approx \frac{1.618}{N}. \quad (68)$$

*Demonstração:* Considerando  $P \rightarrow \infty$  com  $M \leq 2$ , (58) torna-se:

$$\bar{\Delta}^{\text{AI-SIC}} = \frac{(1-p)^{2-N}}{p((N-2)p+1)}. \quad (69)$$

Depois de expandir (69), é possível obter ótimo de  $p$  similarmente a (65), na forma de:

$$\vec{p}^* \approx \frac{-3 + N + \sqrt{5N^2 - 14N + 9}}{2(N-2)N}. \quad (70)$$

Aplicando a Série de Laurent (ABRAMOWITZ *et al.*, 1988) para expandir (70) considerando  $N \rightarrow \infty$ , obtém-se

$$\vec{p}^* \approx \frac{1 + \sqrt{5}}{2N} + \frac{3\sqrt{5} - 5}{10N^2} + O\left(\left[\frac{1}{N}\right]^3\right), \quad (71)$$

onde o primeiro (mais relevante) termo de (71) corresponde a (68), concluindo a demonstração.  $\square$

Para efeitos de comparação, a CAP ótima que minimiza a AoI para o esquema AIRA é obtida a partir de (45), sendo igual a  $p^* = 1/N$ , sendo condizente com o que é apresentado em (Yates; Kaul, 2017; CHEN *et al.*, 2020). Observa-se que o valor de  $p^*$  para o AIRA-SIC é ligeiramente maior do que o esperado para o AIRA, o que demonstra a capacidade do AIRA-SIC em aproveitar-se de colisões para diminuir a AoI média.

Obter uma expressão de CAP ótima para o esquema ADRA é mais complexo, pois envolve obter uma solução implícita da combinação de (47) e (46), porém esta pode ser obtida por métodos numéricos por meio de uma busca exaustiva.

#### 4.4.2 CSI imperfeita

Em termos práticos, pode não ser possível obter a CSI perfeita no AP, devido a possíveis erros de estimativa do canal e limitações de processamento (GAO *et al.*, 2018). Com base na análise realizada em (GAO *et al.*, 2018), pode-se assumir que erros na estimativa de canal degradam a probabilidade de decodificação de forma mais acentuada pela interferência adicional a cada iteração do SIC (a interferência da CSI imperfeita na ordem de decodificação é pequena e pode ser omitida nesse caso). Desta forma, o canal  $h_i$  em (36) está relacionado com a sua estimativa  $\hat{h}_i$  como (GAO *et al.*, 2018):

$$h_i = \hat{h}_i + \epsilon_i, \quad (72)$$

onde  $\epsilon_i \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\epsilon_i}^2)$  é o erro na estimativa do canal, sendo que o caso especial  $\epsilon_i = 0$  corresponde à CSI perfeita do canal. De forma similar, neste cenário a potência instantânea recebida é definida como  $\hat{w}_i = P|\hat{h}_i|^2$ , que é distribuída exponencialmente com parâmetro  $\hat{\lambda}_i = [P(\kappa_i - \sigma_{\epsilon_i}^2)]^{-1}$ .

**Tabela 5 – Parâmetros utilizados nos resultados numéricos do Capítulo 4 (Gu *et al.*, 2019).**

Parâmetro	Valor
Frequência da portadora $f_c$	940 MHz
Densidade de ruído $N_0$	-174 dBm/Hz
Taxa de transmissão $\hat{R}$	200kbps/Hz
Largura de Banda $B$	200 kHz
Expoente de perda de percurso ( $\gamma$ )	4

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Considerando a mesma abordagem utilizada para obter (59) e definindo a interferência no processo de decodificação do SIC como  $I_{\pi_m} = \sum_{i=m+1}^M w_{\pi_i} + m/v$ , onde  $v = 1/(P \sigma_{\epsilon_i}^2)$ , é possível demonstrar que a probabilidade de *outage* para CSI imperfeita assumindo SNR média é igual a:

$$\hat{\alpha}_M = 1 - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[ \prod_{l=1}^m \binom{M}{l} \frac{\exp[-l\lambda\beta(N_0B + \frac{l}{v})]}{(\beta l + 1)^{M-l}} \right]. \quad (73)$$

O termo  $l/v$ , que representa a interferência adicional causada pela CSI imperfeita, aumenta com o número de decodificações no processo do SIC. Enfim, a AoI média para o AIRA-SIC com CSI imperfeita é obtida combinando (73) e (58).

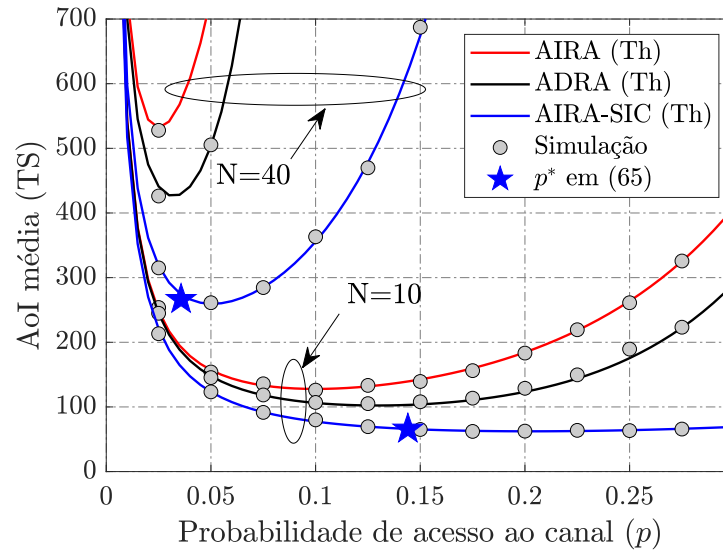
#### 4.5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta Seção são apresentados os resultados numéricos, obtidos por meio de simulações Monte Carlo com  $10^6$  *time slots* simulados, com o objetivo de validar a análise desenvolvida ao longo do Capítulo. Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros utilizados na simulação.

Na Figura 14 é apresentada a relação entre a AoI média e a probabilidade de acesso ao canal  $p$ , considerando  $P = 20$  dBm,  $N \in \{10,40\}$  e que todos os dispositivos possuem a mesma SNR média. Observa-se que o esquema AIRA-SIC apresenta a menor AoI média quando comparado aos outros esquemas, para um mesmo valor de  $N$ . Além disso, observa-se também que os valores numéricos estão de acordo com a expressão (58). Adicionalmente, pode-se perceber que, apesar do desvio associado à aproximação aproximação de  $M \leq 2$ , a simplificação obtida para o valor ótimo de  $p$  em (65) é útil em atingir valores de AoI próximos ao valor mínimo.

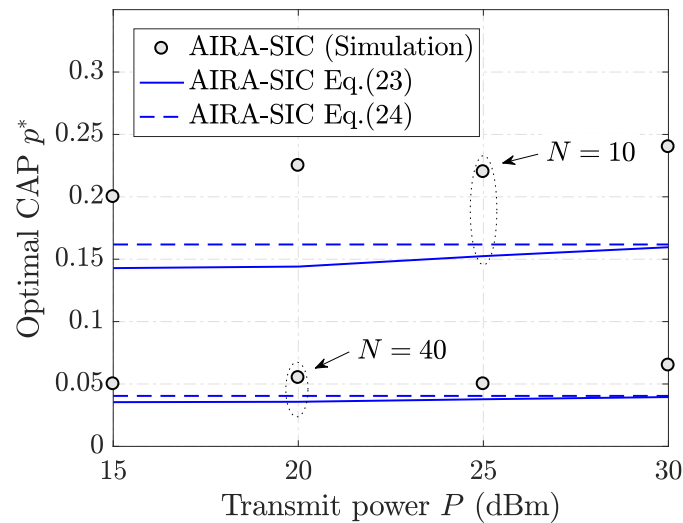
A Figura 15 e a Figura 16 apresentam a probabilidade de acesso ao canal ótima e a AoI média otimizada obtida em função da potência de transmissão  $P$  para  $N = \{10,40\}$ , respectivamente. A probabilidade de acesso ótima é obtida nas aproximações (65) e (68) e também por busca exaustiva. Enquanto a probabilidade de acesso ótima para o AIRA é constante

**Figura 14 – Relação entre AoI média e probabilidade de acesso ao canal ( $p$ ) para AIRA, ADRA e AIRA-SIC, considerando  $P = 20$  dBm e  $d_i = 600$  m.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

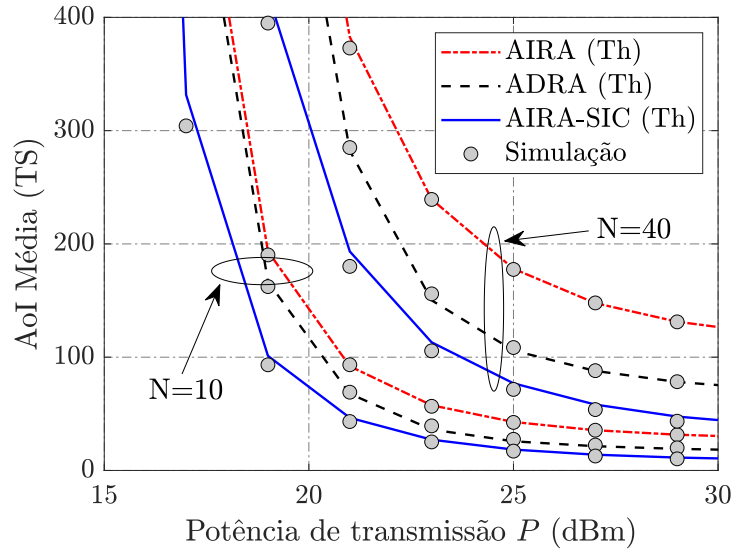
**Figura 15 – Probabilidade ótima de acesso ao canal em função da potência de transmissão  $P$ .**



Fonte: Elaborado pelo autor.

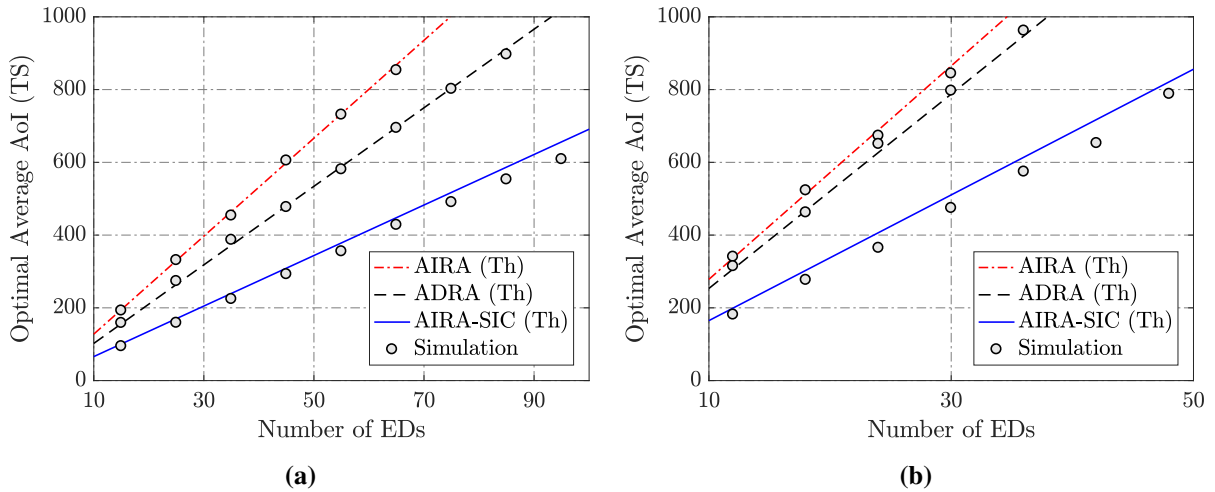
( $p = 1/N$ ), é possível observar que há uma variação de  $p^*$  com relação à potência de transmissão  $P$  para o AIRA-SIC. A Figura 16 sugere a vantagem do AIRA-SIC com relação ao número de dispositivos, mostrando que há uma saturação em termos de AoI mínima atingida com o aumento da potência, e que o valor mínimo atingido pelo esquema AIRA-SIC é menor que os outros esquemas.

**Figura 16 – AoI média ótima em função da potência de transmissão  $P$ , com  $N \in \{10, 40\}$  e  $d_i = 600$  m,  $\forall i$  para os esquemas AIRA, ADRA e AIRA-SIC.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 17 – AoI média ótima em função do número de dispositivos, considerando  $P = 20$  dBm para os esquemas AIRA, ADRA e AIRA-SIC com a)  $d_i = 600$  m,  $\forall i$ ; b)  $d_i \in \{500, 600, 715\}$  m.**



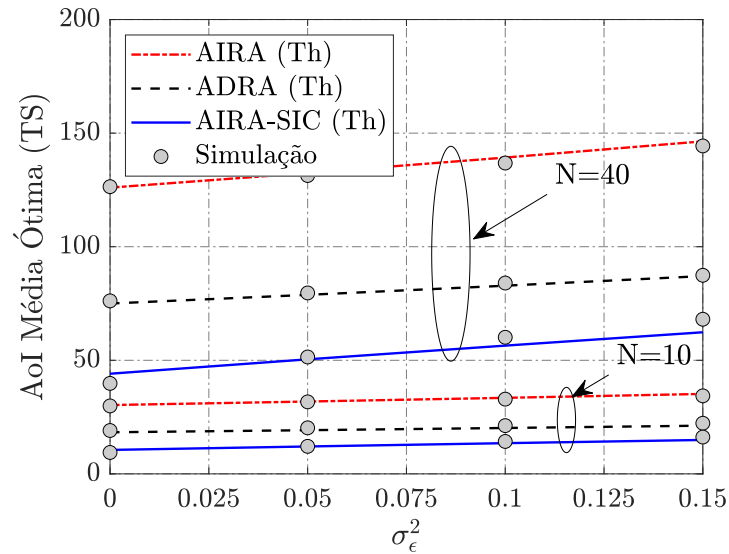
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 17 apresenta o comportamento da AoI média ótima com o aumento de dispositivos na rede. Observa-se que o tradicional AIRA apresenta resultados inferiores ao ADRA e AIRA-SIC. No cenário de uma rede massiva, utilizar SIC pode trazer ganhos relevantes em termos de AoI.

A Figura 18 apresenta uma análise sobre a CSI imperfeita, onde demonstra-se a relação entre a AoI média e o aumento da variância do erro na estimativa do canal  $\sigma_e^2$ . Ao aumentar o número de dispositivos da rede  $N$ , observa-se que a quantidade de dispositivos que transmitem em um mesmo TS aumenta, e nesse caso erros na CSI tornam-se mais relevantes, pois mais

interferência é inserida a cada iteração do SIC.

**Figura 18 – AoI média ótima em função de  $\sigma_\epsilon^2$ , para  $P = 30$  dBm e  $N \in \{10,40\}$ .**



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.6 COMENTÁRIOS

Neste Capítulo a AoI média foi investigada para redes com múltiplos dispositivos operando com base no protocolo ALOHA, considerando o acesso aleatório independente (AIRA) e dependente (ADRA) da AoI instantânea do dispositivo. Foi proposta uma alternativa para se obter uma AoI média menor por meio do cancelamento sucessivo de interferência (SIC), buscando recuperar alguma informação mesmo no caso de uma colisão, quando mais de um dispositivo transmite simultaneamente. Obteve-se uma aproximação para a probabilidade de acesso ótima que minimiza a AoI média da rede. Adicionalmente, a proposta de extensão, denominada AIRA-SIC, apresentou uma AoI média menor em diversos cenários, mesmo considerando imperfeições na estimativa do canal (CSI).



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho desenvolveram-se os temas que foram objetos de pesquisa e publicações durante o período de Doutorado. Dessa forma, dois temas principais e distintos foram abordados no decorrer do documento.

No Capítulo 3 foram incluídas três extensões do protocolo TARQ (TARQ-SC, TARQ-MRC e TARQ-CC), sendo que todas baseiam-se no conceito de diversidade (temporal e espacial). É importante destacar que as aplicações do TARQ e suas extensões tem como objetivo o monitoramento remoto, em que o canal de retorno com a confirmação de recebimento no *downlink* pode ser restritivo, seja por alocação de recursos ou até mesmo por dificuldades de sincronização. Os resultados obtidos demonstram que utilizar diversidade na perspectiva do *Access Point* apresenta redução considerável em termos de AoI, além de não apresentar processamento adicional para os dispositivos da rede, portanto operando de forma transparente.

No Capítulo 4 são apresentadas propostas de acesso ao meio sem fio com múltiplos dispositivos e de forma aleatória, considerando aplicações IoT com quantidades massivas de dispositivos acessando um canal comum. A partir de propostas disponíveis na literatura, as quais são o AIRA e ADRA, foi proposto um novo esquema, denominado AIRA-SIC. Por meio da utilização do SIC, o objetivo principal é recuperar as informações das mensagens mesmo em caso de colisões.

Ao quantificar a pontualidade da informação recebida, a AoI tem a capacidade de incrementar os paradigmas de avaliação de desempenho tradicionais como *throughput* e *delay*. Com essa informação adicional, pode-se dizer que uma nova dimensão foi adicionada em todos os níveis/camadas de comunicação, onde as mensagens não possuem mais o mesmo valor. Por exemplo, uma informação tem mais valor quando é mais recente (a mensagem possui uma AoI menor) ou quando o receptor está com dados desatualizados (a AoI no receptor está elevada).

Pode-se dizer, conforme (MAATOUK *et al.*, 2022; Calvanese Strinati; BARBAROSSA, 2021), que o desenvolvimento da teoria da AoI é o primeiro passo na direção de quantificar a semântica da informação. Esse conceito captura um aspecto essencial de um sistema de comunicação: o objetivo a ser atingido, ou seja, avaliar o propósito e a novidade da informação transmitida. Por exemplo, em um sistema de controle de temperatura sem fio o propósito é controlar a temperatura de forma estável, independentemente de estar operando na região de *throughput* ou *delay* otimizados.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Dentre as possíveis linhas de pesquisa dentro do contexto de AoI, há grande margem para utilizar como base resultados obtidos com outras métricas e adicionar um novo entendimento em termos de AoI. Nesse contexto, um artigo está em desenvolvimento, com uma aplicação mais contextualizada visando comparar as métricas *throughput*, *delay* e AoI em uma rede com acesso aleatório distribuído com base em *blockchain*. Mais especificamente, com base nas propostas apresentadas em (Ling *et al.*, 2020a; Ling *et al.*, 2020b; FARHAT *et al.*, 2021), o objetivo é desenvolver expressões matemáticas para a AoI e verificar as vantagens das métricas para prever o comportamento da rede e definir pontos de operação otimizados.

Sabe-se que outras técnicas de acesso aleatório mais avançadas do que o acesso ALOHA foram propostas, como por exemplo o DSA (do inglês *Diversity Slotted ALOHA*) em (CHOUDHURY; RAPPAPORT, 1983), o CRDSA (do inglês *Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA*) na referência (CASINI *et al.*, 2007), o IRSA (do inglês *Irregular Repetition Slotted ALOHA*) em (LIVA, 2011), e o CSA (do inglês *Coded Slotted ALOHA*) (PAOLINI *et al.*, 2015). Nesse contexto, algumas técnicas já foram modeladas em termos de AoI, como por exemplo em (MUNARI, 2021; PAN *et al.*, 2022b).

Propostas de extensões poderiam incluir os protocolos aprimorados do ALOHA em conjunto com a técnica de cancelamento sucessivo de interferência (SIC). O trabalho de (Zhang *et al.*, 2020) possui uma estratégia nesse sentido, onde caso o AP não consiga decodificar uma mensagem devido à uma colisão, ele armazena estes dados e espera uma nova retransmissão para recomençar a iteração do SIC, o que é denominado como SIC *cross-slot*. Uma das diferenças entre (ZHANG *et al.*, 2020; SEO *et al.*, 2022) e (MUNARI, 2021) é que em (MUNARI, 2021) é necessário que ocorra uma transmissão sem colisão dentro do *frame* para recuperar os dados, enquanto em (ZHANG *et al.*, 2020; SEO *et al.*, 2022) há a possibilidade de o AP tentar recuperar os dados mesmo em caso de colisão.

Outra proposta importante é incrementar o protocolo ADRA incluindo SIC no AP, ou seja, o ADRA-SIC. Para tal, é necessário redefinir a probabilidade de sucesso da transmissão de acordo com o processo do SIC e encontrar uma solução numérica para a AoI. Adicionalmente, seria interessante incluir o esquema de replicação de mensagens nos modelos apresentados no Capítulo 4, desta forma fazendo uma conexão com o desenvolvimento do Capítulo 3 com o Capítulo 4.

Adicionalmente, há a possibilidade de incrementar os trabalhos desenvolvidos considerando que os dispositivos possuem uma fonte de energia não-determinística, e possivelmente avaliar o custo de cada transmissão e as implicações na AoI. Esse modelo teria como base dispositivos que trabalham com *energy-harvesting*.

## REFERÊNCIAS

3GPP. *Study on new radio (NR) access technology physical layer aspects*. TR 38.802, 2017.

Abd-Elmagid, M. A.; Dhillon, H. S. Average Peak Age-of-Information Minimization in UAV-Assisted IoT Networks. **IEEE Trans. Veh. Technol.**, v. 68, n. 2, p. 2003–2008, Feb. 2019. ISSN 1939-9359.

ABRAMOWITZ, Milton; STEGUN, Irene A.; ROMER, Robert H. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. **American Journal of Physics**, v. 56, n. 10, p. 958–958, out. 1988. ISSN 0002-9505, 1943-2909.

AHMETOGLU, Mutlu; YAVASCAN, Orhan Tahir; UYSAL, Elif. MiSTA: An Age-Optimized Slotted ALOHA Protocol. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 17, p. 15484–15496, 2022.

ALI, MD Shipon; TABASSUM, Hina; HOSSAIN, Ekram. Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems. **IEEE Access**, v. 4, p. 6325–6343, 2016.

BAE, Yun Han; BAEK, Jung Woo. Age of Information and Throughput in Random Access-Based IoT Systems With Periodic Updating. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 11, n. 4, p. 821–825, 2022.

BERTSEKAS, Dimitri P.; GALLAGER, Robert G. **Data networks**. 2. ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1992.

Calvanese Strinati, Emilio; BARBAROSSA, Sergio. 6g networks: Beyond shannon towards semantic and goal-oriented communications. **Computer Networks**, v. 190, p. 107930, 2021. ISSN 1389-1286. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621000773>.

CASINI, Enrico; GAUDENZI, Riccardo De; HERRERO, Oscar Del Rio. Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA (CRDSA): An Enhanced Random Access Scheme for Satellite Access Packet Networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 6, n. 4, p. 1408–1419, 2007.

Ceran, E. T.; Gündüz, D.; György, A. Average age of information with hybrid ARQ under a resource constraint. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, v. 18, n. 3, p. 1900–1913, Mar. 2019. ISSN 1558-2248.

Chase, D. Code Combining - A Maximum-Likelihood Decoding Approach for Combining an Arbitrary Number of Noisy Packets. **IEEE Trans. Commun.**, v. 33, n. 5, p. 385–393, May 1985.

CHEN, He; GU, Yifan; LIEW, Soung-Chang. Age-of-Information Dependent Random Access for Massive IoT Networks. *In: 2020 IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. [S.l.: s.n.], 2020.

Chen, K.; Huang, L. Age-of-information in the presence of error. *In: Proc. IEEE ISIT*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 2579–2583. ISSN 2157-8117.

CHEN, Xingran; GATSIKIS, Konstantinos; HASSANI, Hamed; BIDOKHTI, Shirin Saeedi. Age of Information in Random Access Channels. *In: 2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1770–1775.

CHEN, Ziru; LIU, Yong; KHAIRY, Sami; CAI, Lin X.; CHENG, Yu; ZHANG, Ran. Optimizing Non-Orthogonal Multiple Access in Random Access Networks. *In: 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–5.

CHOI, Jinho. Re-Transmission Diversity Multiple Access Based on SIC and HARQ-IR. **IEEE Trans. Commun.**, v. 64, n. 11, p. 4695–4705, 2016.

Choi, J. NOMA-Based Random Access With Multichannel ALOHA. **IEEE J. Sel. Areas Commun.**, v. 35, n. 12, p. 2736–2743, 2017.

CHOUDHURY, G.; RAPPAPORT, S. Diversity aloha - a random access scheme for satellite communications. **IEEE Transactions on Communications**, v. 31, n. 3, p. 450–457, 1983.

CISCO. **Cisco annual internet report (2018 - 2023)**. San Jose, CA, USA, 2020.

ELDEEB, Eslam; SHEHAB, Mohammad; KALØR, Anders E.; POPOVSKI, Petar; ALVES, Hirley. Traffic prediction and fast uplink for hidden markov iot models. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 18, p. 17172–17184, 2022.

FARHAT, Jamil; GRYBOSI, Jorge Felipe; BRANTE, Glauber; SOUZA, Richard Demo; REBELATTO, João Luiz. Non-orthogonal hash access for grant-free iot blockchain radio access networks. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 10, n. 5, p. 1066–1070, 2021.

FENG, Songtao; YANG, Jing. Age of Information Minimization for an Energy Harvesting Source With Updating Erasures: Without and With Feedback. **IEEE Transactions on Communications**, v. 69, n. 8, p. 5091–5105, 2021.

GAO, Yichen; XIA, Bin; LIU, Yingbin; YAO, Yao; XIAO, Kexin; LU, Guanping. Analysis of the Dynamic Ordered Decoding for Uplink NOMA Systems With Imperfect CSI. **IEEE Trans. Veh. Technol.**, v. 67, n. 7, p. 6647–6651, jul 2018.

GAO, Yichen; XIA, Bin; XIAO, Kexin; CHEN, Zhiyong; LI, Xiaofan; ZHANG, Sha. Theoretical Analysis of the Dynamic Decode Ordering SIC Receiver for Uplink NOMA Systems. **IEEE Wireless Commun. Lett.**, v. 21, n. 10, p. 2246–2249, oct 2017.

GOLDSMITH, Andrea. **Wireless Communications**. 1. ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2005.

Gong, J.; Chen, X.; Ma, X. Energy-Age Tradeoff in Status Update Communication Systems with Retransmission. *In: Proc. IEEE GLOBECOM. [S.l.: s.n.]*, 2018. p. 1–6. ISSN 1930-529X.

GRADSHTEYN, I.S.; RYZHIK, I. M. **Table of Integrals, Series, and Products**. 7h. ed. [S.l.]: Academic Press - Elsevier, 2007.

GRYBOSI, Jorge Felipe; REBELATTO, João Luiz; MORITZ, Guilherme Luiz. On the Age-of-Information of Buffer-Aided Truncated ARQ Receiver with Chase Combining. *In: Anais de XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais. SBrT'2020: Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, 2020b.

GRYBOSI, Jorge Felipe; REBELATTO, João Luiz; MORITZ, Guilherme Luiz. Age-of-Information of SIC-Aided Massive IoT Networks with Random Access. **IEEE Internet of Things Journal**, p. 1–1, 2021.

GRYBOSI, Jorge Felipe; REBELATTO, João Luiz; MORITZ, Guilherme Luiz; LI, Yonghui. Age-Energy Tradeoff of Truncated ARQ Retransmission With Receiver Diversity. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 9, n. 11, p. 1961–1964, 2020a.

Gu, Y.; Chen, H.; Zhou, Y.; Li, Y.; Vucetic, B. Timely Status Update in Internet of Things Monitoring Systems: An Age-Energy Tradeoff. **IEEE Internet Things J.**, v. 6, n. 3, p. 5324–5335, Jun. 2019. ISSN 2372-2541.

GUPTA, Ankit Kumar; VENKATESH, T.G. Design and performance evaluation of successive interference cancellation based Slotted Aloha MAC protocol. **Physical Communication**, v. 55, p. 101910, 12 2022. ISSN 18744907.

Han, Z.; Liang, J.; Gu, Y.; Chen, H. Software-Defined Radio Implementation of Age-of-Information-Oriented Random Access. *In: IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.: s.n.]*, 2020. p. 4374–4379.

HATAMI, Mohammad; LEINONEN, Markus; CODREANU, Marian. AoI Minimization in Status Update Control with Energy Harvesting Sensors. **IEEE Transactions on Communications**, 2021. ISSN 0090-6778.

HU, Cheng; DONG, Yunquan. Age of information of two-way data exchanging systems with power-splitting. **Journal of Communications and Networks**, v. 21, n. 3, p. 295–306, 2019.

KAUL, Sanjit; GRUTESER, Marco; RAI, Vinuth; KENNEY, John. Minimizing age of information in vehicular networks. *In: 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 350–358.*

Kaul, S.; Yates, R.; Gruteser, M. Real-time status: How often should one update? *In: Proc. IEEE INFOCOM. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2731–2735. ISSN 0743-166X.*

KOSTA, Antzela; PAPPAS, Nikolaos; ANGELAKIS, Vangelis. Age of Information: A New Concept, Metric, and Tool. **Foundations and Trends® in Networking**, v. 12, n. 3, p. 162–259, 2017. ISSN 1554-057X.

KUTNJAK, Ana. Covid-19 Accelerates Digital Transformation in Industries: Challenges, Issues, Barriers and Problems in Transformation. **IEEE Access**, v. 9, p. 79373–79388, 2021.

LI, Bohai; WANG, Qian; CHEN, He; ZHOU, Yong; LI, Yonghui. Optimizing Information Freshness for Cooperative IoT Systems With Stochastic Arrivals. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 19, p. 14485–14500, 2021.

LI, Jie; ZHOU, Yong; CHEN, He. Age of Information for Multicast Transmission With Fixed and Random Deadlines in IoT Systems. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 9, p. 8178–8191, 2020.

LI, Yitong; DAI, Lin. Maximum sum rate of slotted aloha with capture. **IEEE Transactions on Communications**, v. 64, p. 690–705, 2016. ISSN 0090-6778.

LIN, Shu; COSTELLO, Jr. Daniel J. **Error Control Coding. [S.l.]: Prentice Hall, 2004. 603 p.**

Ling, X.; Le, Y.; Wang, J.; Ding, Z. Hash Access: Trustworthy Grant-Free IoT Access Enabled by Blockchain Radio Access Networks. **IEEE Network**, v. 34, n. 1, p. 54–61, 2020a.

Ling, X.; Wang, J.; Le, Y.; Ding, Z.; Gao, X. Blockchain Radio Access Network Beyond 5G. **IEEE Wireless Communications**, p. 1–9, 2020b.

LIU, Henry H. **Software Performance and Scalability**. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 2009. ISBN 9780470465394.

LIU, Qingyu; LI, Chengzhang; HOU, Y. Thomas; LOU, Wenjing; REED, Jeffrey H.; KOMPELLA, Sastry. Aion: A Bandwidth Conserving Scheduler With Data Freshness Guarantee. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, p. 1–15, 2022.

LIVA, Gianluigi. Graph-Based Analysis and Optimization of Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA. **IEEE Transactions on Communications**, v. 59, 2 2011.

LORA. **LoRaWAN 1.1 specifications**. [S.l.], 2017.

Maatouk, A.; Assaad, M.; Ephremides, A. Minimizing The Age of Information: NOMA or OMA? *In: IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 102–108.

MAATOUK, Ali; ASSAAD, Mohamad; EPHREMIDES, Anthony. The Age of Incorrect Information: an Enabler of Semantics-Empowered Communication. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, p. 1–1, 2022.

MIRIDAKIS, Nikolaos I.; TSIFTISIS, Theodoros A.; YANG, Guanghua. **Non-Linear Age of Information: An Energy Efficient Receiver-Centric Approach**. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2112.15553>.

MITRINOVIĆ, D. S.; PEČARIĆ, J. E.; FINK, A. M. Classical and new inequalities in analysis: Bernoulli's inequality. *In: \_\_\_\_*. [S.l.]: Springer-Science+Business Media, 1993.

MUNARI, Andrea. Modern Random Access: an Age of Information Perspective on Irregular Repetition Slotted ALOHA. **IEEE Transactions on Communications**, v. 69, n. 6, p. 3572–3585, 2021.

MUNARI, Andrea; BADIA, Leonardo. **The Role of Feedback in AoI Optimization Under Limited Transmission Opportunities**. 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2208.14128>.

NAJM, Elie; YATES, Roy; SOLJANIN, Emina. Status updates through M/G/1/1 queues with HARQ. *In: . [S.l.]*: IEEE, 2017. p. 131–135.

NGO, Khac-Hoang; DURISI, Giuseppe; AMAT, Alexandre Graell i. Age of information in prioritized random access. **CoRR**, abs/2112.01182, 2021.



PAN, Haoyuan; CHAN, Tse-Tin; LEUNG, Victor C. M.; LI, Jianqiang. Age of information in physical-layer network coding enabled two-way relay networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, p. 1–1, 2022.

PAN, Haoyuan; CHAN, Tse-Tin; LI, Jianqiang; LEUNG, Victor C. M. Age of Information With Collision-Resolution Random Access. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 71, n. 10, p. 11295–11300, 2022.

PAOLINI, Enrico; LIVA, Gianluigi; CHIARI, Marco. Coded Slotted ALOHA: A Graph-Based Method for Uncoordinated Multiple Access. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 61, n. 12, p. 6815–6832, 2015.

SEO, Jun-Bae; HU, Yangqian; JIN, Hu. Time-Offset ALOHA With SIC. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, p. 1–13, 2022.

SHREEDHAR, Tanya; KAUL, Sanjit K.; YATES, Roy D. **ACP+: An Age Control Protocol for the Internet**. arXiv, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2210.12539>.

SONG, X.; LIU, J.W.S. Performance of multiversion concurrency control algorithms in maintaining temporal consistency. *In: Proceedings., Fourteenth Annual International Computer Software and Applications Conference. [S.l.: s.n.]*, 1990. p. 132–139.

SUN, Yin; UYSAL-BIYIKOGLU, Elif; YATES, Roy D.; KOKSAL, C. Emre; SHROFF, Ness B. Update or Wait: How to Keep Your Data Fresh. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 63, n. 11, p. 7492–7508, nov 2017. ISSN 0018-9448.

VISWANATHAN, Harish; MOGENSEN, Preben E. Communications in the 6G Era. **IEEE Access**, v. 8, p. 57063–57074, 2020.

WANG, Jinglun; XIA, Bin; XIAO, Kexin; GAO, Yichen; MA, Shaodan. Outage Performance Analysis for Wireless Non-Orthogonal Multiple Access Systems. **IEEE Access**, v. 6, p. 3611–3618, 2018. ISSN 2169-3536.

WIGGBERG, Mattias; GULLIKSEN, Jan; CAJANDER, Åsa; PEARS, Arnold. Defining Digital Excellence: Requisite Skills and Policy Implications for Digital Transformation. **IEEE Access**, v. 10, p. 52481–52507, 2022.

WU, Shaohua; DENG, Zhihong; LI, Aimin; JIAO, Jian; ZHANG, Ning; ZHANG, Qinyu. Minimizing Age-of-Information in HARQ-CC Aided NOMA Systems. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, p. 1–1, 2022.

Xu, C.; Yang, H. H.; Wang, X.; Quek, T. Q. S. Optimizing Information Freshness in Computing-Enabled IoT Networks. **IEEE Internet Things J.**, v. 7, n. 2, p. 971–985, 2020.

- YANG, Howard H.; SONG, Meiyang; XU, Chao; WANG, Xijun; QUEK, Tony Q. S. Locally Adaptive Status Updating for Optimizing Age of Information in Poisson Networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, p. 1–13, 2022.
- YANG, Howard H.; XU, Chao; WANG, Xijun; FENG, Daquan; QUEK, Tony Q. S. Understanding Age of Information in Large-Scale Wireless Networks. **IEEE Trans. Wireless Commun.**, p. 1–1, 2021.
- YATES, Roy D. The Age of Information in Networks: Moments, Distributions, and Sampling. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 66, n. 9, p. 5712–5728, sep 2020.
- Yates, R. D.; Kaul, S. K. Status Updates over Unreliable Multiaccess Channels. *In: 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 331–335.
- YATES, Roy D.; SUN, Yin; BROWN, D. Richard; KAUL, Sanjit K.; MODIANO, Eytan; ULUKUS, Sennur. Age of Information: An Introduction and Survey. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 39, 5 2021. ISSN 0733-8716.
- YAVASCAN, Orhan Tahir; UYSAL, Elif. Analysis of Slotted ALOHA With an Age Threshold. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 39, n. 5, p. 1456–1470, 2021.
- YU, Baoquan; CHEN, Xiaoming; CAI, Yueming. Age of Information for Cellular Internet of Things: Challenges, Key Techniques and Future Trends. **IEEE Communications Magazine**, p. 1–7, 2022.
- YUAN, Yifei; WANG, Sen; WU, Yongpeng; POOR, H. Vincent; DING, Zhiguo; YOU, Xiaohu; HANZO, Lajos. NOMA for Next-Generation Massive IoT: Performance Potential and Technology Directions. **IEEE Communications Magazine**, v. 59, n. 7, p. 115–121, 2021.
- YUAN, Yifei; YUAN, Zhifeng; YANG, Changqing. **5G New Radio Non-Orthogonal Multiple Access**. Boca Raton,FL: CRC Press, 2022. ISBN 9781003336167.
- ZHANG, Bowen; LING, Xintong; LE, Yuwei; WANG, Jiaheng; CAI, Can; TANG, Zerong. Analysis and Evaluation of Hash Access for Blockchain Radio Access Networks. *In: 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. [S.l.]: IEEE, 2020. p. 62–67.
- ZHANG, Ningbo; WANG, Jing; KANG, Guixia; LIU, Yang. Uplink Nonorthogonal Multiple Access in 5G Systems. **IEEE Commun. Lett.**, v. 20, n. 3, p. 458–461, mar 2016. ISSN 1089-7798.

Zhang, Z.; Li, Y.; Song, G.; Yuen, C.; Guan, Y. L. Random NOMA With Cross-Slot Successive Interference Cancellation Packet Recovery. **IEEE Wireless Commun. Lett.**, v. 9, n. 7, p. 1065–1069, 2020.

ZHENG, Yali; HU, Jie; YANG, Kun. Average Age of Information in Wireless Powered Relay Aided Communication Network. **IEEE Internet of Things Journal**, p. 1–1, 2021.

ZHOU, Xingyu; YING, Keke; GAO, Zhen; WU, Yongpeng; XIAO, Zhenyu; CHATZINOTAS, Symeon; YUAN, Jinhong; OTTERSTEN, Björn. Active Terminal Identification, Channel Estimation, and Signal Detection for Grant-Free NOMA-OTFS in LEO Satellite Internet-of-Things. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, p. 1–1, 2022.