

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ITALO DA SILVA SANTOS**

**PREDIÇÃO DE CONSUMO DE BATERIA DE USUÁRIO 5G EM ONDAS  
MILIMÉTRICAS POR AGREGAÇÃO DE PORTADORA E USO DA CPU**

**MANAUS**

**2023**

**ITALO DA SILVA SANTOS**

**PREDIÇÃO DE CONSUMO DE BATERIA DE USUÁRIO 5G EM ONDAS  
MILIMÉTRICAS POR AGREGAÇÃO DE PORTADORA E USO DA CPU**

Projeto de pesquisa desenvolvido durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentado à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Otoniel da Cunha Mendes, Msc.

DocuSigned by:

*Otoniel da Cunha Mendes*

D004B2757C6749F...

Manaus

2023

**Universidade do Estado do Amazonas – UEA**  
**Escola Superior de Tecnologia - EST**

Reitor:

**André Luiz Nunes Zogahib**

Vice-Reitor:

**Kátia do Nascimento Couceiro**

Diretora da Escola Superior de Tecnologia:

**Jucimar Maia da Silva Júnior**

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

**Jozias Parente de Oliveira**

Banca Avaliadora composta por:

*Data da defesa: 06/10/2023*

**Prof. Otoniel da Cunha Mendes (Orientador)**

**Prof. Elaine Ladislau Ferreira Pereira**

**Prof. Diógenes Santos Paz Junior**

## **CIP – Catalogação na Publicação**

Santos, Italo

Predição de Consumo de Bateria de Usuário 5G em Ondas Milimétricas por Agregação de Portadora e Uso da CPU / Italo da Silva Santos; [orientado por] Otoniel da Cunha Mendes. – Manaus: 2023.  
47 p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade do Estado do Amazonas, 2023.

1. 5G. 2. Ondas Milimétricas. 3. Agregação de Portadoras. I. Mendes, Otoniel.

**ITALO DA SILVA SANTOS**

**PREDIÇÃO DE CONSUMO DE BATERIA DE USUÁRIO 5G EM ONDAS  
MILIMÉTRICAS POR AGREGAÇÃO DE PORTADORA E USO DA CPU**

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Nota obtida: 9,5 ( Nove Vírgula Cinco )

Aprovado em 06 / 10 /2023

Área de concentração: Engenharia Elétrica

**BANCA EXAMINADORA**

DocuSigned by:

*Otoniel da Cunha Mendes*

D004B2757C5749F...

Orientador: Otoniel da Cunha Mendes

*Elaine Ladislau F. Pereira*

Avaliador: Elaine Ladislau Ferreira Pereira

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

**DIOGENES SANTOS PAZ JUNIOR**

Data: 06/10/2023 20:49:05 -0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Avaliador: Diógenes Santos Paz Junior

Manaus

2023

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus avós e à minha mãe que fizeram muitas renúncias para me proporcionar qualidade de vida e boas condições de estudo. Meus avós e minha mãe me proporcionaram as coisas mais valiosas que alguém pode ter: amor e conhecimento. Sou grato a Deus pelas oportunidades e bênção para chegar onde estou.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por guiar e iluminar minha trajetória ao longo desta jornada acadêmica. Sua graça e misericórdia foram fundamentais para superar os desafios e obstáculos encontrados durante todo o processo de elaboração desta monografia.

À minha avó, Luiza Cortez da Silva Santos, por ter sempre dando total apoio desde meu nascimento até o momento de agora, servindo de exemplo de pessoa esforçada e de caráter.

À minha mãe, Islaine da Silva Santos, por todo o apoio e amor incondicional que me proporcionou ao longo de toda a minha vida.

Ao meu orientador, Prof. MSC. Otoniel da Cunha Mendes, por toda a sua ajuda durante a minha etapa de desenvolvimento do trabalho.

Ao meu colega de trabalho, Dr. Marcello Gonçalves Costa, por sua orientação, apoio e dedicação ao longo de todo o processo de elaboração desde trabalho de conclusão de curso.

À minha namorada, Victória Carolina Siqueira Mena Barreto, por ser minha maior fonte de apoio, amor e inspiração ao longo desta jornada acadêmica.

À secretária da UEA/EST dos cursos de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Araci de Carvalhos Freitas, por ter dado todo suporte e apoio necessários ao longo desses anos de graduação.

Ao Sidia Instituto de Ciência e Tecnologia, pela oportunidade concedida e pelo apoio inestimável ao longo do desenvolvimento desta monografia.

## Lista de Tabelas

1	Especificação de bandas e faixas de frequências para transmissão em ondas milimétricas. . . . .	18
2	Automações desenvolvidas para aplicação ao TC padrão . . . . .	26
3	Desempenho de Predição do modelo ARMA para corrente drenada pela Bateria do UE. . . . .	41
4	Desempenho de Predição do modelo ARMA para Descarga de Bateria no UE. .	42

## Lista de Figuras

1	Esquema da relação entre a largura de banda do canal, banda de guarda e configuração da largura de banda de transmissão . . . . .	19
2	TC padrão de uma rede 4G/5G em ondas milimétricas . . . . .	25
3	Variação de $\Theta$ e $\phi$ , sob passos angulares $\Delta$ , para medições do TC padrão . . . . .	27
4	Cenário para medição de consumo de bateria do UE na execução do TC padrão sob 1-8 CC, $\Theta$ e $\Phi$ ). . . . .	29
5	Scripts para o comando da medição de consumo de bateria do UE acessados no TC padrão. . . . .	30
6	Estratégia de Coleta de Log CP no TC padrão . . . . .	31
7	Modelo GLM para regressão logística. . . . .	34
8	Modelo ARMA utilizado para a previsão de consumo de bateria. . . . .	35
9	Câmara Anecoica Controlada . . . . .	36
10	Variação de $\Theta$ e $\phi$ , sob passos angulares $\Delta$ , para medições do TC padrão . . . . .	37
11	Atividade da CPU para agregações de célula NR (CC) em diferentes posições angulares do UE. . . . .	38
12	Estimação de atividade da CPU para agregações de celular NR (CC) em diferentes posições angulares do UE. . . . .	39
13	Corrente drenada pela bateria do UE sob diferentes CC sob máxima transmissão. . . . .	40
14	Predição de Corrente drenada pela bateria do UE sob $\hat{\Delta}_{CPU}^{\%}$ . . . . .	41
15	Predição de descarga de bateria do UE sob $\hat{\Delta}_{CPU}^{\%}$ . . . . .	42



## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

<b>UE</b>	equipamento do usuário
<b>5G</b>	quinta geração de redes celulares
<b>eMBB</b>	Enhanced Mobile Broadband
<b>URLCC</b>	Ultra Reliable Latency Communications
<b>mMTC</b>	Machine Type Communications
<b>QoS</b>	qualidade de serviço
<b>QoE</b>	qualidade de experiência
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>mmWave</b>	onda milimétrica
<b>CPU</b>	unidade central de processamento
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>LTE</b>	Long-Term Evolution
<b>FR1</b>	faixa de frequência 1
<b>FR2</b>	faixa de frequência 2
<b>CC</b>	agregação de portadoras

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	11
<b>ABSTRACT</b>	12
<b>INTRODUÇÃO</b>	13
<b>1 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	16
1.1 Evolução das Redes Móveis Celulares (1G a 4G)	16
1.2 Redes 5G em Ondas sub-6GHZ	17
1.3 Redes 5G em Ondas Milimétricas	18
1.3.1 Modo de Transmissão MIMO	18
1.3.2 Especificação de Numerologia	20
1.3.3 Taxas de Transmissão Atingíveis ( <i>Throughput</i> )	20
1.4 Aspectos de Radiopropagação de Ondas Milimétricas	22
<b>2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO</b>	25
2.1 Campanhas Analíticas para Obtenção de $N_B$ /CPU e $\Delta_t$	26
2.2 Medição de Consumo de Bateria (max Tput 1-4 CC, $\Phi_{tput}$ , $\Theta_{tput}$ )	28
2.3 Coleta de Log CP (max Tput 1-4 CC, $\Phi_{tput}^{bat}$ , $\Theta_{tput}^{bat}$ )	30
<b>3 MODELO DE PREDIÇÃO DE CONSUMO DE BATERIA</b>	32
3.1 Estimação de Atividade de Processamento	33
3.2 Predição de Descarga da Bateria	34
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	36
4.1 Estimativa de uso da CPU por agregação de portadora mmWave	38
4.2 Previsão de Descarga de Bateria por Agregação de Portadora mmWave	40
<b>5 CONCLUSÃO</b>	44
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	45

5.2	Publicações .....	45
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>

## RESUMO

A quinta geração de redes celulares (5G) traz um grande avanço na extensão de banda através do uso das ondas milimétricas. Serviços anteriormente impraticáveis, como Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra Reliable Latency Communications (URLCC) e Machine Type Communications (mMTC), podem ser aplicados com qualidade de serviço (QoS) e qualidade de experiência (QoE) para usuários conectados à rede. A expansão de banda da onda milimétrica (mmWave) é potencializada com esquemas Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) e agregação de portadoras (CC) para diversas demandas do usuário final. Todavia, o principal fator limitante para altas taxas de dados, sob condições ideais de transmissão, é a capacidade de processamento e a taxa de consumo de energia do equipamento do usuário (UE), que podem atingir níveis críticos mais rapidamente até a desconexão do usuário. Sob níveis críticos de processamento da unidade central de processamento (CPU) no UE, este trabalho apresenta um modelo de estimativa para determinar o crescimento do uso da CPU no UE com base nos recursos da rede, tais como o número de portadoras (CC) e sua taxa de transferência de dados suportada. Em seguida, a correlação dessa estimativa com o consumo de corrente da bateria é avaliada em termos de previsão de descarga, permitindo a antecipação de adaptação de taxa da rede, via CC, para extensão de autonomia do usuário.

**Keywords:** 5G, ondas milimétricas, agregação de portadoras, consumo de bateria, taxa de transmissão de dados.

## ABSTRACT

5G brings a significant advancement in bandwidth extension through the use of millimeter waves (mmWave). Previously impractical services such as eMBB, URLLC, and mMTC can be applied with QoS and QoE for users connected to the network. The mmWave bandwidth expansion is enhanced with MIMO and CC schemes to meet various end-user demands. However, the primary limiting factor for high data rates under ideal transmission conditions is the CPU processing capacity and power consumption of the UE, which can reach critical levels more quickly leading to user disconnection. Under critical levels of CPU processing in the UE, this work presents an estimation model to determine CPU usage growth in the UE based on network resources, such as the number of carrier components (CC) and their supported data rate transfer. Thus, the correlation of this estimate with battery current consumption is evaluated in terms of discharge prediction, allowing for anticipation of network rate adaptation via CC for extending UE battery life.

**Keywords:** 5G, millimeter wave, carrier aggregation, battery consumption, throughput.

## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as comunicações móveis experimentaram grandes avanços no oferecimento de serviços, alcance de altas taxas de transmissão e eficiência espectral. Desde a oferta de serviços de voz na primeira geração (1G) e a inclusão de serviços de mensagens de texto no 2G (Global System for Mobile Communications (GSM)) aos avanços com o acesso à internet no 3G (UMTS/HSPA) e de serviços via IP (*Internet Protocol*) no 4G (Long-Term Evolution (LTE)), a implementação da atual quinta geração (5G) está proporcionando o maior salto tecnológico com a extensão da faixa de frequência para as ondas milimétricas e o uso da técnica de *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) massivo, permitindo maior taxa de transferência de dados e baixa latência, essenciais para dar suporte a aplicações emergentes, como realidade virtual, realidade aumentada e direção autônoma (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2020).

No Release 15 do 3GPP, as faixas de frequência do 5G NR (*New Radio*) são especificadas em duas categorias: faixa de frequência 1 (FR1), que varia de 410 MHz a 7125 MHz (também conhecida como *cmWave*), na qual as bandas são numeradas de 1 a 255 e comumente chamadas de *Sub-6Ghz*. Já a faixa de frequência 2 (FR2) varia de 24250 MHz a 52600 MHz, na qual as bandas são numeradas de 257 a 511 e são comumente chamadas de *mmWave* (ZAIDI et al., 2018). O 5G NR tem foco na melhoria da largura de banda móvel aprimorada (eMBB) para aumentar a velocidade de conexões, capacidade e cobertura da rede. Já a comunicação ultraconfiável de baixa latência (URLLC) é direcionada a comunicações confiáveis com latência ultrabaixa para aplicações críticas. Além disso, a comunicação de tipo máquina (mMTC) permite a conexão de um grande número de dispositivos com baixa taxa de transmissão de dados e consumo de energia reduzido.

No entanto, estes cenários de aplicação do 5G *mmWave* apresentam problemas críticos para o UE em termos do alto consumo de energia da bateria do dispositivo móvel e da forte sinalização aérea devido à alta frequência de rádio (RF). Além disso, com a crescente demanda por altas taxas de dados dos usuários, mais células NR (componentes de portadora - CC) são agregadas para transmissão de dados, refletindo o crescimento do uso da CPU e a perda de desempenho observada no UE no que tange ao período de vida útil da

bateria (THANTHARATE; BEARD; MARUPADUGA, 2020).

Dado que a atividade de processamento da CPU é uma das principais limitações para a taxa de transferência máxima em *mmWave*, este trabalho apresenta um modelo de estimativa para determinar o crescimento do processamento da CPU com base nos recursos da rede, como o número de portadoras (CC) e a taxa de transferência de dados, em relação a determinado posicionamento angular do UE, que representa o ambiente do canal sujeito à atenuação. Dessa maneira, uma função estimada de crescimento de atividade de CPU pode ser correlacionada com o consumo de bateria como resposta do UE à configuração da rede. Nesse sentido, é proposta uma predição de consumo de bateria em série temporal, usando um modelo autoregressivo de médias móveis (ARMA), tal que a atividade de CPU seja usada como determinação de sazonalidade do preditor.

As principais contribuições e objetivos do estudo são: (i) criação de um modelo de predição de consumo de bateria parametrizado por CC em *mmWave*; (ii) usar a estimação de atividade de processamento da CPU como função auxiliar para a predição, enriquecendo o modelo com uma covariada diretamente relacionada ao consumo de bateria; (iii) aplicar as predições para adaptar a seleção de CC da rede sob níveis críticos de bateria; (iv) criar cenários de testes OTA para a realização de medições em rede real; e (v) apresentar uma solução em série temporal para o problema de economia de bateria em dispositivos móveis operando em ondas milimétricas.

E, para conformidade dos tópicos a serem abordados de forma clara e objetiva neste trabalho, há uma apresentação dividida em 5 capítulos a partir deste atual.

Capítulo 1 – Referencial Teórico, apresentando a fundamentação teórica essencial das tecnologias 1G, 2G, 3G, 4G e 5G *Sub-6GHz* e *mmWave*, destacando desta última o modo de transmissão MIMO, as especificações de numerologia, os requisitos de *throughput* e os aspectos de radiopropagação, com base em artigos científicos relacionados e nas especificações técnicas do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*).

Capítulo 2 – Metodologia de Desenvolvimento, na qual são apresentadas as automações desenvolvidas em uma arquitetura do teste case (TC) padrão de uma rede 4G/5G em ondas

milimétricas. A configuração de campanhas de medições são especificadas para a coleta de diversos parâmetros do UE e da rede para fins de análise.

Capítulo 3 – Modelo de Predição de Descarga de Bateria, no qual é apresentado através de uma estrutura autoregressiva de médias móveis (ARMA) que mapeia a atividade de crescimento de processamento de CPU estimada. O preditor linear resultante é utilizado para a adaptação de CC da rede, sob a restrição de um nível crítico de bateria.

Capítulo 4 – Resultados Experimentais, nos quais são apresentados os resultados laboratoriais com a aplicação do modelo preditivo do Capítulo 3 aos dados de campanhas coletados. A validação do modelo é descrita em termos de curvas de desempenho do preditor sob máxima transmissão de dados por CC e os erros de predição medidos.

Capítulo 5 – Considerações Finais, concluindo e respondendo as questões levantadas na introdução do trabalho, avaliando os resultados observados nos experimentos e propondo futuras pesquisas relacionadas ao tópico.



# 1 REFERENCIAL TEÓRICO

## 1.1 EVOLUÇÃO DAS REDES MÓVEIS CELULARES (1G A 4G)

A comunicação *wireless*, que consiste na transferência de informações à distância sem o uso de material físico (MONDAL; SINHA; ROUTH, 2015), teve início com a patenteação do sistema sem fio completo em 1897, feita por Guglielmo Marconi, responsável pelo desenvolvimento do primeiro telégrafo *wireless*. As distâncias envolvidas na comunicação sem fio podem ser curtas ou longas. Além do mais, com os avanços tecnológicos e novos estudos em relação às comunicações móveis, novas gerações de redes móveis surgiram, trazendo significativos impactos nas mais diversas áreas à sociedade. Atualmente, as redes 5G são a geração de tecnologia sem fio que oferecem velocidades mais rápidas e maior capacidade do que as tecnologias anteriores, sendo que elas operam em duas principais faixas de frequência: ondas sub-6GHz (*cmWave*) e ondas milimétricas (*mmWave*).

- **Redes de Primeira Geração ou 1G:** A primeira geração, ou 1G, foi iniciada na década de 80. Este serviço de telefonia móvel funcionava através de células, que consistiam em pequenas áreas geográficas que dividiam uma cidade. Nessa geração, o *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), o *Total Access Communication System* (TACS) e o *Nordic Mobile Telephone System* (NMT) foram as tecnologias de sucesso. Todavia, a capacidade dessas redes era baixa, visto que era utilizada modulação em frequência na faixa de 150MHz para as chamadas de voz e o suporte para mobilidade era fraco (SAMPAIO, 2019).
- **Redes de Segunda Geração ou 2G:** A segunda geração, ou 2G, teve início em 1988 através da criação do padrão *Global System for Mobile Communications* (GSM) pelo instituto *European Telecommunication Standards Institute* (ETSI). A tecnologia GSM foi desenvolvida em acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) e com a capacidade de suportar serviços de dados de até 9.6 kbps (GHOSH; RATASUK, 2011). Além disso, é válido ressaltar que o GSM foi projetado como uma rede comutada a circuitos, além de que foi a primeira tecnologia *wireless* na qual houve a utilização de *SIM Cards*, que são cartões de memória que guardam informações dos assinantes de serviços móveis

(SAMPAIO, 2019).

- **Redes de Terceira Geração ou 3G:** A terceira geração, ou 3G, é uma tecnologia que foi iniciada na Europa e na América do Norte sobe os respectivos nomes: IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications 2000*) e CDMA-2000 (*Code Division Multiple Access*), visto que ambas suportam transmissões de duas vias com isolamento de frequência. Ademais, a característica básica da tecnologia 3G é a rápida taxa de transferência de dados por meio de velocidades mínimas de 200 kbps, segundo padrão do IMT-2000, e até 42 Mbit/s suportadas pelo HSPA+ (*High-Speed Downlink Packet Access*) (COMMUNICATIONS, 2020).
- **Redes de Quarta Geração ou 4G:** A ITU-R (*International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*) especificou um conjunto de requisitos para os padrões do 4G em março de 2008, o chamado IMT-Advanced (*International Mobile Telecommunications Advanced*). Basicamente, os requisitos de velocidade para o padrão 4G são de 100 Mbps para conexões móveis e 1 Gbps para conexões fixas com taxas de transmissão de 20 a 40 Mbps, bem como uma maior eficiência espectral, melhor latência e mobilidade (TAKEDA, 2013).

## 1.2 REDES 5G EM ONDAS SUB-6GHZ

As redes 5G em ondas sub-6GHz são aquelas que operam em frequências abaixo de 6 GHz. Essas frequências são as mesmas usadas pelas redes 4G LTE e, portanto, as operadoras de telefonia móvel já possuem infraestrutura instalada que pode ser atualizada para a tecnologia 5G. As redes 5G em ondas sub-6GHz oferecem velocidades mais rápidas do que as redes 4G LTE e também são capazes de suportar mais dispositivos simultaneamente. Além disso, como as ondas sub-6GHz têm comprimentos de onda mais longos do que as ondas *mmWave*, elas são capazes de penetrar em edifícios e outros obstáculos com mais facilidade, o que significa que a cobertura da rede pode ser mais ampla. No entanto, as redes 5G em ondas sub-6GHz têm uma capacidade limitada em relação às redes 5G em ondas *mmWave*. Como resultado, as operadoras de telefonia móvel podem precisar usar mais antenas para garantir uma cobertura adequada em áreas densamente povoadas (DILLI, 2020).

<b>Banda NR</b>	<b><i>Uplink (UL) e Downlink (DL)</i></b>	<b>Modo Duplex</b>
257	26500-29500 MHz (UL), 26500-29500 MHz (DL)	TDD
258	24250-27500 MHz (UL), 24250-27500 MHz (DL)	TDD
260	37000-40000 MHz (UL), 37000-40000 MHz (DL)	TDD
261	27500-28350 MHz (UL), 27500-28350 MHz (DL)	TDD

Tabela 1 – Especificação de bandas e faixas de frequências para transmissão em ondas milimétricas.

### 1.3 REDES 5G EM ONDAS MILIMÉTRICAS

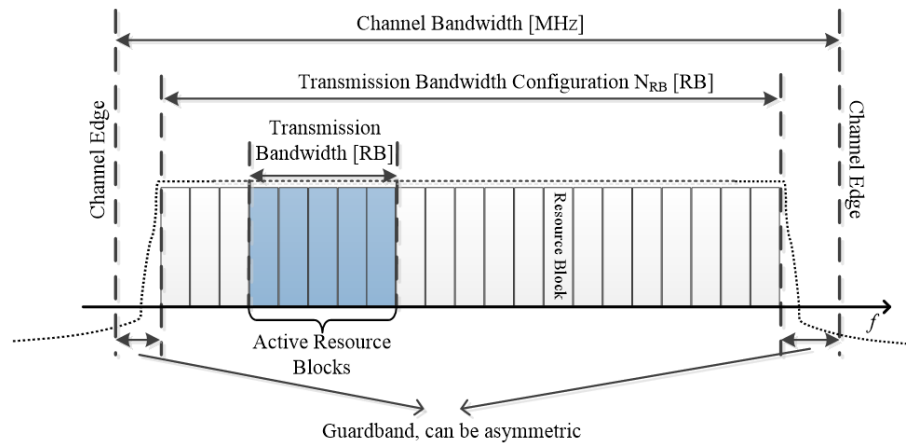
As redes 5G em ondas milimétricas (*mmWave*) são ondas de rádio de alta frequência que operam na faixa de frequência de 24.25 GHz a 52.6 GHz (3GPP, c). Essas ondas têm uma frequência muito maior do que os sinais de celulares tradicionais, que operam na faixa de 410 MHz a 7.125 GHz. A Tabela 1 associa determinada banda NR com seu respectivo intervalo de frequência de *Uplink (UL)* e *Downlink (DL)* para casos de bandas NR operacionais.

A largura de banda do canal da BS (*Base Station*) é a quantidade máxima de espectro de frequência que pode ser usada pela BS para enviar ou receber dados através de uma única portadora de RF (*Radio Frequency*). Além disso, diferentes larguras de banda do canal do UE (*User Equipment*) podem ser suportadas dentro do mesmo espectro de frequência para transmitir e receber dados dos UEs conectados à BS. A colocação da largura de banda do canal do UE é flexível, mas deve permanecer completamente dentro da largura de banda do canal da BS. A BS deve ser capaz de transmitir para e/ou receber de uma ou mais partes da largura de banda do UE que são menores ou iguais ao número de blocos de recursos da portadora na portadora de RF. Essa comunicação pode ocorrer em qualquer parte dos blocos de recursos da operadora. A relação entre a largura de banda do canal, a banda de guarda e a configuração da largura de banda de transmissão é mostrada na Figura 1.

#### 1.3.1 Modo de Transmissão MIMO

Em relação às configurações de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), estas são divididas em duas partes (3GPP, a). Para o *uplink*, o requisito mínimo para configurações MIMO

Figura 1 – Esquema da relação entre a largura de banda do canal, banda de guarda e configuração da largura de banda de transmissão



Fonte: (3GPP, a)

é que seja 2x2 para todas as bandas operacionais e larguras de banda usadas em redes 5G *mmWave*. Ou seja, a estação base deve ter pelo menos duas antenas e o equipamento do usuário deve ter pelo menos duas antenas para suportar a transmissão MIMO de *uplink*. Já em relação ao *downlink*, o requisito mínimo para configurações MIMO varia de acordo com a banda de operação e a largura de banda utilizada na rede 5G *mmWave*. Os requisitos mínimos de MIMO para diferentes bandas e larguras de banda operacionais são apresentados em seguida.

1. Para bandas operacionais n257 e n258 com larguras de banda de 50 MHz e 100 MHz, o requisito mínimo é MIMO 2x2.
2. Para banda operacional n260 com larguras de banda de 50 MHz e 100 MHz, o requisito mínimo é MIMO 4x4.
3. Para banda operacional n261 com larguras de banda de 50 MHz e 100 MHz, o requisito mínimo é MIMO 8x8.

Essas configurações MIMO são necessárias para alcançar altas taxas de dados e comunicação confiável em redes 5G *mmWave*, onde a frequência é extremamente alta e a propagação do sinal é desafiadora devido à alta perda de caminho e a suscetibilidade a bloqueios.

### 1.3.2 Especificação de Numerologia

Numerologia refere-se ao conjunto de parâmetros que definem o espaçamento da subportadora e o comprimento do prefixo cíclico para um determinado sistema de comunicação sem fio. No caso de redes 5G *mmWave*, a numerologia é baseada em um espaçamento de subportadora de 60 kHz e um comprimento de prefixo cíclico de 2.083 microssegundos, originando duas numerologias diferentes, conhecidas como numerologia 1 e numerologia 2. A Numerologia 1 é usada para a faixa de frequência mais baixa das redes 5G *mmWave*, de 24.25 GHz a 52.6 GHz. Nesta numerologia, a duração do símbolo é de 66.67 microssegundos e cada símbolo contém 256 subportadoras. A largura de banda mínima do canal para a numerologia 1 é de 50 MHz. A Numerologia 2 é usada para a faixa de frequência mais alta das redes 5G *mmWave*, de 52.6 GHz a 71 GHz. Nesta numerologia, a duração do símbolo é de 26.67 microssegundos e cada símbolo contém 64 subportadoras. A largura de banda mínima do canal para numerologia 2 é de 100 MHz. Esses parâmetros de numerologia são projetados para otimizar a eficiência espectral e o desempenho das redes 5G *mmWave*, além de acomodar as características exclusivas das frequências de ondas milimétricas, como alta atenuação e sensibilidade a obstáculos (3GPP, b).

### 1.3.3 Taxas de Transmissão Atingíveis (*Throughput*)

Os procedimentos da camada física para transferência de dados em ondas milimétricas foram definidos para garantir que o UE atinja taxas de transmissão de dados adequadas (3GPP, 2018). Esses procedimentos incluem:

- **Codificação e modulação de canal:** A camada física usa códigos LDPC (*Low-Density Parity-Check*) e esquemas de modulação QPSK, 16QAM, 64QAM ou 256QAM para codificar e modular os dados a serem transmitidos.
- **Alocação de recursos (*resource blocks* - RB):** A estação rádio base aloca recursos (ou seja, tempo, frequência e recursos espaciais) para cada *User Equipment* (UE) para transmissão de dados com base nas condições do canal e nos requisitos de QoS.
- **Beamforming:** A estação rádio base usa *beamforming* para aumentar a força do sinal

e reduzir a interferência para cada UE. Ele forma feixes direcionais para cada UE com base nas informações de estado do canal (CSI), que são realimentadas pelo UE.

- **Solicitação de repetição automática híbrida (HARQ):** HARQ é usado para melhorar a confiabilidade da transmissão de dados em redes *mmWave*. Ele retransmite os pacotes de dados errados até que o receptor decodifique os pacotes com sucesso.
- **Demodulação e decodificação de dados:** O receptor usa os algoritmos de demodulação e decodificação para extrair os dados transmitidos dos sinais recebidos. Ele primeiro demodula o sinal recebido para obter os símbolos de valor complexo e, em seguida, usa o algoritmo de decodificação LDPC para decodificar os símbolos para os dados originais.
- **Scheduling:** A estação rádio base agenda a transmissão de dados para cada UE com base nas condições do canal, requisitos de QoS e alocação de recursos. Ele também pode usar agendamento dinâmico para se adaptar às mudanças nas condições do canal e cargas de tráfego.

No geral, esses procedimentos são projetados para obter alta taxa de transferência de dados e baixa latência em redes 5G *mmWave*, essenciais para oferecer suporte a aplicações críticas, como aplicações de radar, devido ao curto alcance e alta resolução, comunicações por satélite, *scanners* corporais e fábricas inteligentes da indústria 4.0. Uma forma parametrizada para o cálculo da taxa atingível é definida na especificação 3GPP TS-138.306 (3GPP, d), que apresenta as máximas taxas DL e UL suportadas pelo UE e calculadas por banda ou combinação de bandas, sendo representada por:

$$T_{\text{put(Mbps)}} = 10^{-6} \sum_{j=1}^J \left( v_L^j Q_m^j f^j R_{\text{max}} \frac{12 N_{\text{PRB}}^{BW_{j,\mu}}}{T_S^\mu} (1 - OH^{(j)}) \right), \quad (1)$$

onde as variáveis são definidas como:

$$\left\{ \begin{array}{l} T \rightarrow \text{Taxa de Transferência de Dados (Throughput);} \\ J \rightarrow \text{Número da portadoras de componentes de frequência agregadas (CC);} \\ v_L^j \rightarrow \text{Número de camadas MIMO;} \\ Q_m^j, f^j \rightarrow \text{Ordem da Modulação QAM, Fator de Escalonamento;} \\ R_{\max} \rightarrow \text{Taxa Máxima de Código LDPC;} \\ N_{PRB}^{BW_j, \mu}, \mu \rightarrow \text{Número de Blocos de Recurso por BW, Numerologia de Frequência;} \\ T_s^\mu \rightarrow \text{Duração do símbolo OFDM;} \\ OH^j \rightarrow \text{Overhead.} \end{array} \right.$$

Em síntese,  $J$  é o número de componentes portadoras (CC) agregadas em uma banda suportada ou combinação de bandas  $BW(j)$ ;  $R_{\max} = 948/1024$  e representa uma taxa fixa para todas as componentes portadoras;  $v_{\text{camadas}}^{(j)}$  é o número suportado de camadas MIMO em um *physical downlink shared channel* (PDSCH) para downlink e, em um *physical uplink shared channel* (PUSCH) para uplink;  $Q_m^{(j)}$  é a máxima ordem de modulação suportada;  $f^{(j)}$  é o fator de escalonamento da mais alta camada;  $\mu$  é a numerologia definida;  $T_s^\mu$  é a duração média do símbolo OFDM em um subframe por numerologia  $\mu$ ;  $N_{PRB}^{BW(j), \mu}$  é a máxima alocação de recursos (RB) em uma banda  $BW(j)$  e  $OH(j)$  é o overhead esperado, que assume os seguintes valores:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.14 \quad \text{para a faixa FR1 (sub-6GHz) no sentido DL;} \\ 0.18 \quad \text{para a faixa FR2 (ondas milimétricas) no sentido DL;} \\ 0.08 \quad \text{para a faixa FR1 no sentido UL;} \\ 0.10 \quad \text{para a faixa FR2 no sentido UL.} \end{array} \right.$$

#### 1.4 ASPECTOS DE RADIOPROGAÇÃO DE ONDAS MILIMÉTRICAS

A alta demanda por maiores taxas de transmissão torna a aplicação das ondas milimétricas o principal foco da tecnologia 5G. No entanto, a otimização dos sistemas sem-fio em ondas milimétricas depende do estudo aprofundado de seu comportamento de propagação, dada à diferença em relação às faixas sub-6 GHz usualmente aplicadas nos sistemas celula-

res atuais. Apesar da alta atenuação, as ondas milimétricas têm vantagens significativas em relação a outras frequências, como maior largura de banda disponível, menor interferência e maior capacidade de transmissão de dados. Para superar o desafio da alta atenuação, são usadas técnicas como *beamforming*, que permite que as ondas sejam direcionadas para o receptor desejado e também é usada a tecnologia MIMO, que utiliza várias antenas para transmitir e receber sinais, aumentando a confiabilidade da comunicação (ZAIDI et al., 2018).

A radiopropagação de ondas milimétricas entre 30 GHz e 300 GHz têm comprimentos de onda muito curtos, variando de cerca de 1 mm a 10 mm, resultando em uma propagação mais direcional do que as ondas de mais baixas frequências. A atenuação da onda milimétrica é muito alta na propagação no espaço e na interação da onda com os obstáculos, resultando em perdas de propagação mais acentuadas no espaço livre por absorção na atmosfera e perdas predominantes por bloqueio e penetração nos obstáculos, incluindo folhagem e o corpo humano (5GAMERICAS, 2020).

A alta perda por percurso no espaço livre ou atenuações do sinal em frequências *mmWave* requer a propagação com linha de visada (*line-of-sight* - LOS) para o estabelecimento do link entre transmissor e receptor. Na propagação sem a visada direta (NLOS), por mecanismos de reflexão e espalhamento (difração), o desvanecimento em larga escala, na forma de sombreamento, apresenta impacto preponderante nos componentes multipercursos em comparação às contribuições de desvanecimento em pequena escala (rápidos). Esse comportamento é oposto na propagação de ondas sub-6GHz.

Além dos impactos das atenuações da propagação no espaço e obstáculos, a presença de objetos em torno da onda (*clutter*) resulta em reflexões e difrações adicionais. Dado o comprimento de onda pequeno ( $< 1$  cm), o cálculo preciso de todas as contribuições requer um amplo conhecimento da geometria do *clutter* e o efeito nas partes real e imaginária das componentes da onda refletida, o que requer um ambiente controlado, tal como o cenário de propagação em câmara anecóica (YANG et al., 2017).

Para aplicações práticas, alguns modelos de propagação buscam aproximação a um comportamento resultante. Esses modelos fornecem diferentes parametrizações ou funções para variados cenários, sendo a eles adicionada a complexidade da propagação das ondas

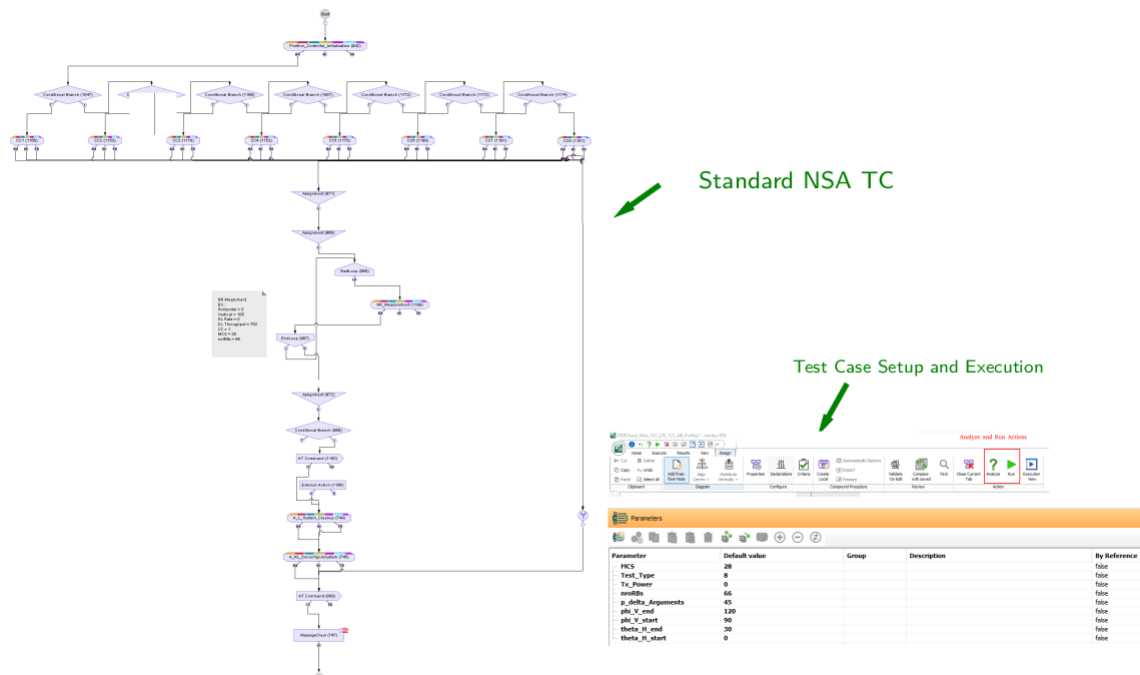


milimétricas com a disponibilidade de um *clutter* conhecido ou uma específica região sob avaliação. A especificação 3GPP TR 38.901 (3GPP, 2016) descreve os modelos gerais de atenuações por perda no percurso ou por multipercursos para sub-6GHz e ondas milimétricas, considerando a faixa entre 0.5 a 100 GHz.

## 2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

O presente trabalho é uma pesquisa aplicada, na qual os resultados esperados para modelo proposto neste trabalho monográfico seguem um roteiro de campanhas analíticas e de medições de uma rede 5G em ondas milimétricas. A metodologia proposta parte de teste de caso (*test case* – TC) de uma rede 4G/5G em ondas milimétricas emulada em laboratório e com um arranjo de aparatos para a coleta de dados de medições de corrente e da atividade de processamento da CPU. O ambiente de testes considera a elaboração do TC padrão da rede 4G/5G em ondas milimétricas com parâmetros configuráveis, tais como o número de portadoras adicionadas ao sinal 5G e o posicionamento do UE na câmara anecoica, reproduzindo atenuações do sinal recebido. O TC padrão é apresentado na Figura 2, sendo disponibilizado na plataforma RTD do *setup* de rede 5G da *Anritsu*.

Figura 2 – TC padrão de uma rede 4G/5G em ondas milimétricas



Fonte: (Própria, 2023)

Ferramentas de automação desenvolvidas em *scripts* Python são incluídas no TC padrão. Os *scripts* gerenciam as medições usando aparatos externos, como o analisador de potência para monitorar a corrente consumida pelo UE conectado à rede, e o acesso à coleta de *log* do UE, permitindo a leitura de atividade de processamento da CPU durante a

execução do TC.

Em síntese, na Tabela 2, são apresentadas as principais automações desenvolvidas para a execução de campanhas para medição de bateria e atividade de processamento da CPU do UE, sob agregações de portadoras no *link* em ondas milimétricas.

Tabela 2 – Automações desenvolvidas para aplicação ao TC padrão

Automação incluída ao TC Padrão	Passos da Análise
Posicionamento do UE e seleção de CC	Máximos pontos de Throughput na variação de $\Phi$ , $\Theta$
Medição de consumo de bateria	Máximo Throughput sob $\Phi$ e $\Theta$ com menor consumo
Coleta de log CP	Atividade da CPU por CC

Os resultados das campanhas são coletados sob diferentes *logs* dos equipamentos, descritos a seguir.

- *Log* da aplicação do TC (RTD) → arquivo .txt com informações da rede 5G *mmWave*: BLER, *throughput*, MCS, RB, CC, e posicionamento ( $\Theta$ ,  $\Phi$ ).
- *Log* de medição de corrente (Keysight N6705C) → arquivos .csv contendo medições temporais de corrente coletadas durante a execução do TC por *hardware* externo.
- *Logs* do UE via comandos ADB → *status* da bateria (%) e potência recebida (*reference signal received power* - RSRP).
- *Log* de CP do UE completo → relatório temporal completo da rede e status do UE sob determinada conexão.

As informações obtidas dos relatórios de medições são analisadas em conjunto para obtenção de parâmetros correlacionados que são utilizados no modelo de otimização proposto na seção 3.

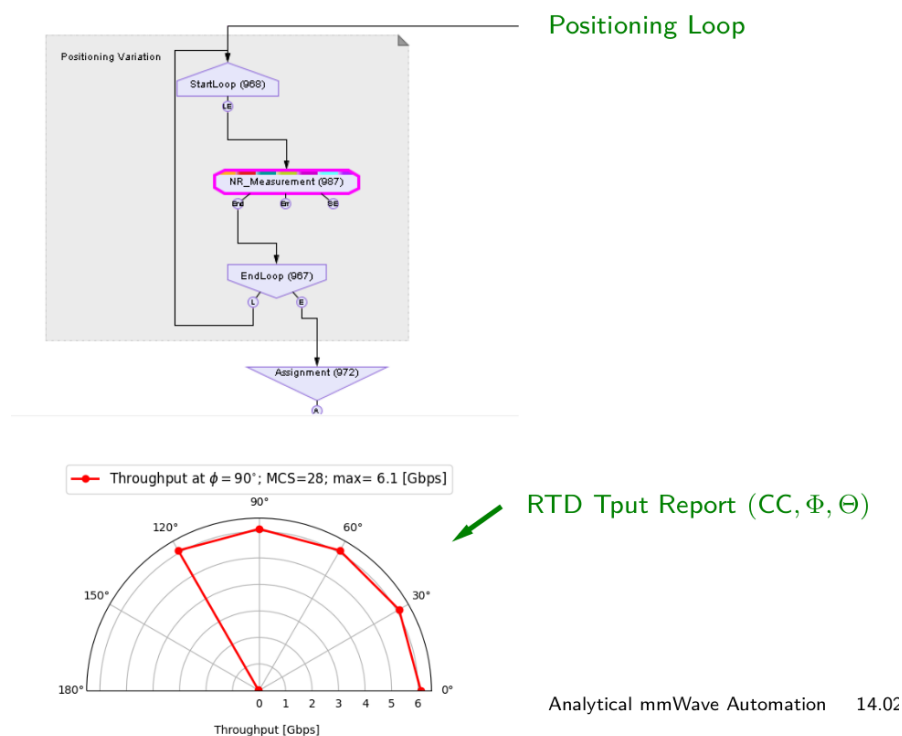
## 2.1 CAMPANHAS ANALÍTICAS PARA OBTENÇÃO DE $N_B$ /CPU E $\Delta_T$

O principal objetivo das campanhas de medições e analíticas é a extração da taxa de consumo e processamento, proposta no trabalho como sendo  $N_B$ /CPU e o tempo de autonomia  $\Delta_t$ . Essas duas variáveis determinam o ganho de desempenho do usuário 5G por agregação de portadora de frequência para uma dada posição e nível crítico de bateria.

A métrica da otimização é a função *throughput*, parametrizada por *features*<sup>1</sup> configuráveis no TC, e pela variável de restrição dependente do posicionamento  $\Theta$  e  $\phi$  do UE na câmara anecoica, além do número de portadoras de frequência adicionadas à célula 5G (*carrier component* - CC).

A Figura 3 apresenta o *loop* de posicionamento presente no TC padrão para a variação da posição angular do UE. A variação angular segue um passo incremental  $\Delta$  para obtenção da faixa de  $\Theta$  e  $\phi$  para a qual são extraídos os dados de medição.

Figura 3 – Variação de  $\Theta$  e  $\phi$ , sob passos angulares  $\Delta$ , para medições do TC padrão



Fonte: (Própria, 2023)

Os *scripts* Python externos desenvolvidos são acessados no TC padrão para coleta de medições sob uma condição pontual de  $\Theta$ ,  $\phi$  e agregação de portadora de frequência (CC). Dessa forma, informações externas ao TC são avaliadas, tais como a atividade de processamento da CPU, *status* da bateria e a potência recebida (RSRP) no UE. Além das citadas anteriormente, obtêm-se as informações já relatadas pelo TC, como a taxa de erro de bloco (*block error rate* – BLER) e o *throughput*.

A sequência para a coleta de dados analíticos de interesse é descrita nos passos a seguir:

<sup>1</sup>conjunto de parâmetros de rede combinados para dada demanda e capacidade.

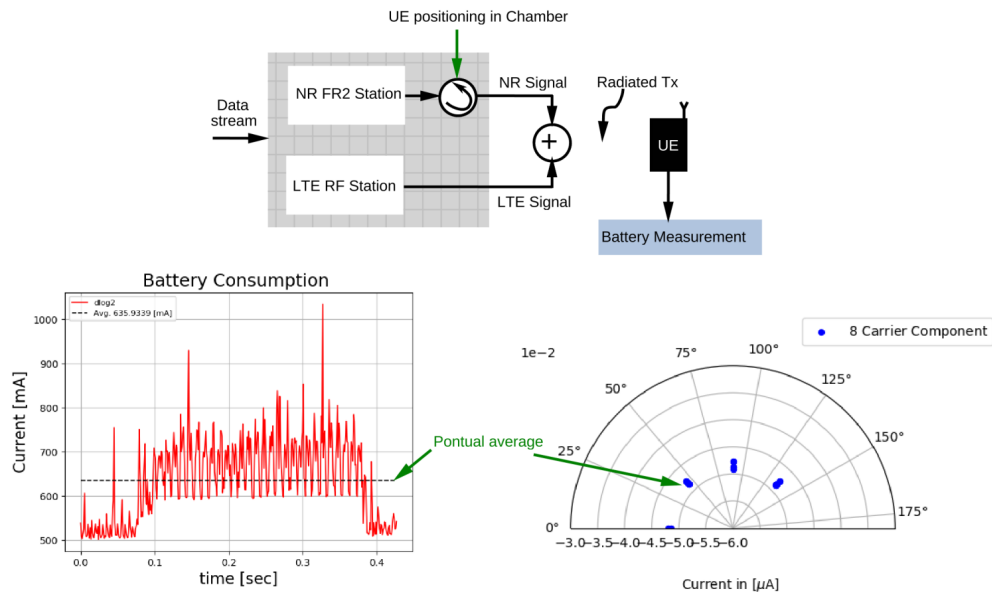
1. Execução do TC padrão para análise de CC (1-4) → determina o máximo *throughput* dado um posicionamento  $\Phi$  e  $\Theta$  do UE na câmara anecoica.
2. Dados os melhores pontos de *throughput*  $\Phi_{tput}, \Theta_{tput}$  por CC (valores máximos), realiza-se a medição de consumo de corrente em uma campanha diferente → TC padrão com variação de posição do UE sob máximo *throughput* e inclusão de *script* Python para gerenciar a medição de corrente.
3. Dado o mais baixo consumo de bateria sob máximo *throughput* em cada CC, obtêm-se  $\Phi_{tput}^{bat}$  e  $\Theta_{tput}^{bat}$  → inclusão da coleta de *log* de CP do UE no TC padrão para análise temporal da atividade de processamento da CPU.
4. Dados o menor consumo de bateria e máximo *throughput*:  $\Phi_{tput}^{bat}, \Theta_{tput}^{bat}$  por CC, encontrar a taxa  $N_B/CPU$  para estimar o tempo de autonomia  $\Delta_t$  → estender o tempo de execução do TC padrão para observar o decréscimo de % do *status* da bateria.
5. Aplicação de  $N_B/CPU$  e  $\Delta_t$  na eq.(1).

## 2.2 MEDIÇÃO DE CONSUMO DE BATERIA (MAX TPUT 1-4 CC, $\Phi_{TPU}, \Theta_{TPUT}$ )

O consumo de bateria do UE durante a execução do TC é medido por um analisador de potência de alta taxa de amostragem (Keysight N6705C). A resolução de 1 ms foi selecionada para compor a medição de corrente instantânea drenada pela bateria do UE durante a transmissão de dados na rede 5G *mmWave*. Ademais, *scripts* externos em Python são incluídos no TC padrão para o gerenciamento da medição e sincronização com os logs de medição do TC sobre a rede 5G *mmWave*. Em seguida, a análise das medições é realizada para cada configuração de CC no TC padrão e o posicionamento do UE na câmara anecoica. Para cada combinação de CC,  $\Theta$  e  $\Phi$  é produzida uma curva temporal de corrente, sua média e energia, convertidas em posição angular. Na Figura 4 é apresentado o arranjo dos dispositivos empregados na medição de corrente e um exemplo pontual de medições ao longo da variação de posicionamento angular do UE.

A configuração de gerenciamento de medição é realizada através da estrutura de *scripts* apresentadas na Figura 5. A sequência de *scripts* determina o início e o final da medição

Figura 4 – Cenário para medição de consumo de bateria do UE na execução do TC padrão sob 1-8 CC,  $\Theta$  e  $\Phi$ ).



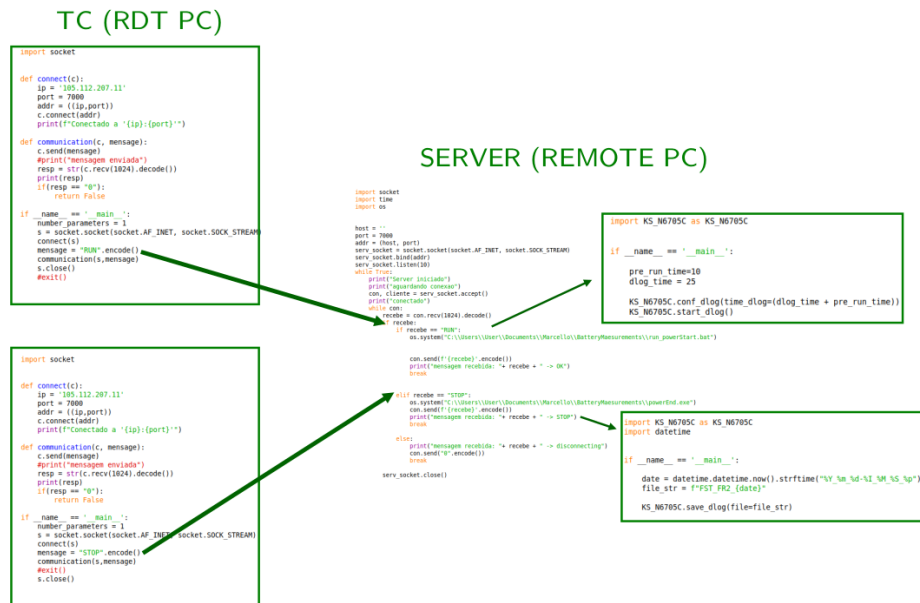
Fonte: (Própria, 2023)

na execução do TC, em particular durante a transmissão de dados pela célula ou células 5G agregadas via CC. Para isto, a estrutura física utiliza dois PCs: o primeiro (PC-1) executa o TC padrão na interface com a câmara anecoica e posicionador do UE; e outro PC (PC-2) com acesso remoto gerencia o analisador de potência conectado diretamente à bateria do UE. Nessa configuração, os principais passos de medição são enumerados, a seguir:

- **Passo 1:** No TC padrão (PC-1), no ponto inicial ou final de medição é enviado o comando RUN ou Stop para o PC-2, via socket;
- **Passo 2:** O PC-2 recebe o comando RUN ou STOP e inicia ou finaliza a medição de bateria com o analisador de potência, via porta GPIB;
- **Passo 3:** No final da execução de cada variação de CC,  $\Theta$  e  $\Phi$  do TC padrão, a medição é finalizada e o log salvo em arquivo *.csv* na memória flash do analisador de potência.

O conjunto de dados de uma campanha de medição de bateria contém as variações de CC,  $\Theta$  e  $\Phi$  que serão sincronizadas com as leituras de *throughput* do log RTD, permitindo a avaliação da proposta de correlação de máximo *throughput* por variação angular e CC com o consumo de bateria.

Figura 5 – Scripts para o comando da medição de consumo de bateria do UE acessados no TC padrão.



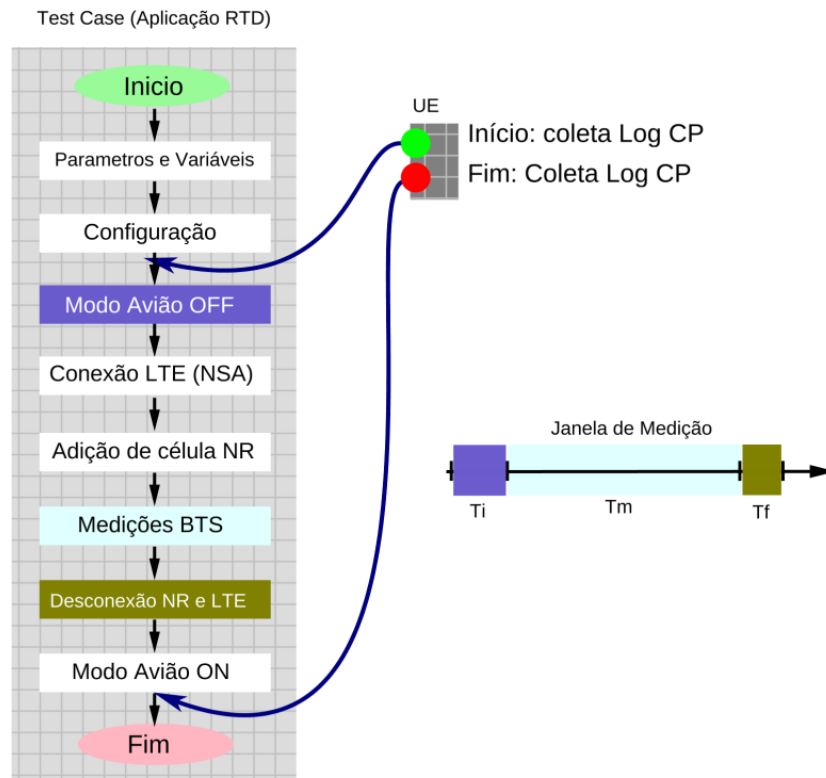
Fonte: (Própria, 2023)

### 2.3 COLETA DE LOG CP (MAX TPUT 1-4 CC, $\Phi_{\text{TPUT}}^{\text{BAT}}$ , $\Theta_{\text{TPUT}}^{\text{BAT}}$ )

A coleta completa de *log* de CP fornece informações completas de desempenho, sinalização e controle entre a rede e o UE. Essas informações são analisadas através de *software* proprietário (*tracers*) dos fabricantes de *chipsets* de UEs (ex. *Qualcomm*, *Mediatek*, *S.LSI*).

Na estrutura do TC padrão de rede LTE + NR FR2, a coleta de *log* de CP é realizada durante a execução do TC, através de *scripts* Python adicionados nos pontos especificados na Figura 6. No final da coleta, os dados da rede para uma parametrização específica são automaticamente salvos no *SDcard* do UE sob teste para posterior análise via *tracer*.

Figura 6 – Estratégia de Coleta de Log CP no TC padrão



Fonte: (Própria, 2023)

Os *scripts* Python usados para coleta controlam as funcionalidades do UE através de comandos adb (*Android Debug Bridge*). A sequência de coleta obedece ao acesso de menus e ícones de modo de teste. Cada menu de opção, ícone e teclas de atalho é executada pela função AdbProxy, obtidas pelas linhas de código a seguir.

```

1 from mobly.controllers.android_device_lib.adb import AdbProxy
2 adb = AdbProxy()
  
```



### 3 MODELO DE PREDIÇÃO DE CONSUMO DE BATERIA

O modelo de predição proposto é realizado em dois passos: 1) estimação da atividade de processamento da CPU do dispositivo móvel celular (UE) em função da seleção de CC da rede 5G em ondas milimétricas; e 2) a predição linear do consumo da bateria do UE para uma variação da estimação do processamento obtida no passo 1), definida como  $\hat{\Delta}_{\text{CPU}}^{\%}$ . A partir do modelo de predição, a taxa de transmissão de dados (*throughput*) pode ser adaptada quando um nível crítico da bateria ( $N_B^c$ ) é atingido, o que permite a extensão de autonomia da bateria do UE sob um atualizado horizonte de predição. A adaptação é realizada sobre a eq. (1) e segue a forma descrita por:

$$T_{\text{adt}} = \max_{\xi} \left\{ 10^{-6} \sum_{j=1}^{J-\xi} \left( v_L^j Q_m^j f^j R_{\text{max}} \frac{12 N_{\text{PRB}}^{BW_{j,\mu}}}{T_S^{\mu}} (1 - OH^j) \right) \right\}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \xi = 0, & \text{if } f : \hat{\Delta}_{\text{CPU}}^{\%} \rightarrow N_B > N_B^c \\ \xi = 1, & \text{if } f : \hat{\Delta}_{\text{CPU}}^{\%} \rightarrow N_B = N_B^c \end{cases} \quad (2)$$

onde a função de predição  $f$  mapeia a estimativa de atividade de CPU em níveis de bateria, através de um modelo autoregressivo de médias móveis (ARMA), que realiza a predição de consumo em série temporal. Dessa forma, os níveis preditados  $N_B$  são comparados a um nível crítico, por exemplo 95% de descarga da bateria. Na condição de alcance deste nível, a redução de taxa é realizada pelo descréscimo de uma portadora agregada, através da constante  $\zeta$ .

A obtenção de  $\hat{\Delta}_{\text{CPU}}^{\%}$  e da função de predição de bateria,  $f$ , utilizam os dados coletados pelas automações desenvolvidas na Seção 2. Adicionalmente, os métodos de ensaios especificados na mesma seção incluem a variação de parâmetros de rede, através do posicionamento do UE em relação ao feixe de ondas milimétricas, permitindo a coleta de máximo desempenho de taxa e consumo para a construção da análise estatística dos sinais.

A função de predição aplicada em (2) é definida nas subseções seguintes, composta pelo modelo de estimação de atividade de CPU, empregando um modelo linear generalizado (GLM) de regressão logística e, em seguida um modelo ARMA que possui o preditor linear,

que define  $f$ , em que os níveis de bateria podem ser preditados sob um horizonte no tempo, para uma dada estimaco de crescimento de atividade na CPU.

### 3.1 ESTIMAÇÃO DE ATIVIDADE DE PROCESSAMENTO

A estimaco de atividade de processamento da CPU é obtida das observaces de percentual do modem coletado durante a execuo dos testes de log de CP da Seo 4. Neste teste, o UE é submetido ao máximo *throughput* sob uma configurao de CC e posicionamento angular. As observaces utilizadas no modelo de regresso consideram o intervalo de tempo de coleta dos dados de CPU em que há transmisso de dados. O modelo linear generalizado (GLM) é convencionalmente aplicado em regresses lineares para uma resposta contínua, sendo apropriado para famlias de distribues exponenciais definidas por  $y_i \sim N(x_i^T \beta, \sigma^2)$ , onde  $y_i$  são variáveis independentes a serem estimadas (variável resposta),  $x_i$  são covariadas conhecidas e  $\beta$  são coeficientes a serem estimados pelo método dos mínimos quadrados (LSM). É importante observar que o crescimento de atividade da CPU sob as demandas de taxa de transmisso descreve uma distribuo logística de  $y_i$ . Para este caso, o modelo GLM é definido por

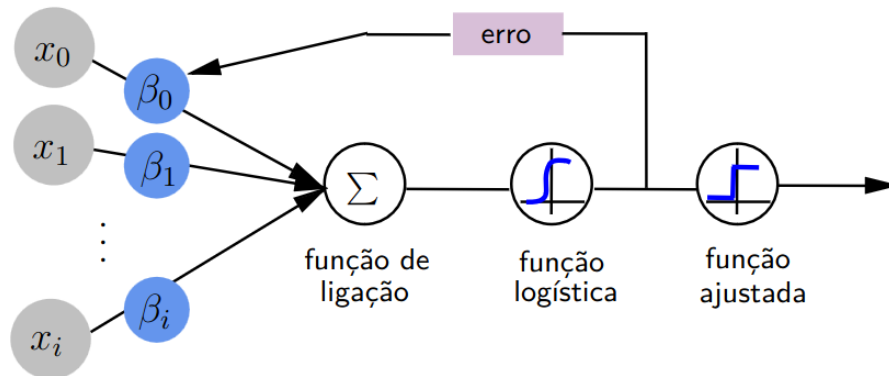
$$Y = \text{logit}(\pi_i) = \underbrace{\log\left(\frac{\pi_i}{1 - \pi_i}\right)}_{g(\pi)} = \beta_0 + \beta_1 x_i. \quad (3)$$

onde  $\pi_i$  são os elementos aleatórios das observaces, i.e., a média definida pelo valor esperado  $E[Y]$ ,  $g(\pi)$  é a funo de ligao e  $x_i$  são as variáveis explanatórias (covariadas) com a combinao linear a ser estimada para ajustada à  $g(\pi)$ . A representao do modelo (3) é apresentado no diagrama de blocos da Figura 7, que apresenta a relao da variável resposta com as variáveis explanatórias através das funes de ajuste.

A regresso logística resulta na estimaco  $Y$  que descreve a medida contínua de uso percentual da CPU sob todo o range de pontos observados. As variáveis explanatórias são compostas pelo intervalo de tempo sob transmisso de dados, tal que, para cada configurao de CC e posio do UE, diferentes curvas estimadas de atividade de CPU são obtidas. A partir das curvas, o crescimento de atividade de CPU,  $\hat{\Delta}_{\text{CPU}}^{\%}$ , pode compor importante para-

metrização para um modelo mais ajustado de previsão de consumo de bateria.

Figura 7 – Modelo GLM para regressão logística.



Fonte: (Própria, 2023)

### 3.2 PREDIÇÃO DE DESCARGA DA BATERIA

Uma forma de mapear a função auxiliar  $Y$ , que estima a atividade de CPU ao consumo de bateria, é através de uma função de previsão  $f$ . Nesta função, a covariável ou função explanatória comum é o intervalo de tempo da transmissão de dados. A aplicação de previsão em série temporal permite que observações passadas possam ser usadas para treinamento de previsões em um horizonte de tempo avançado.

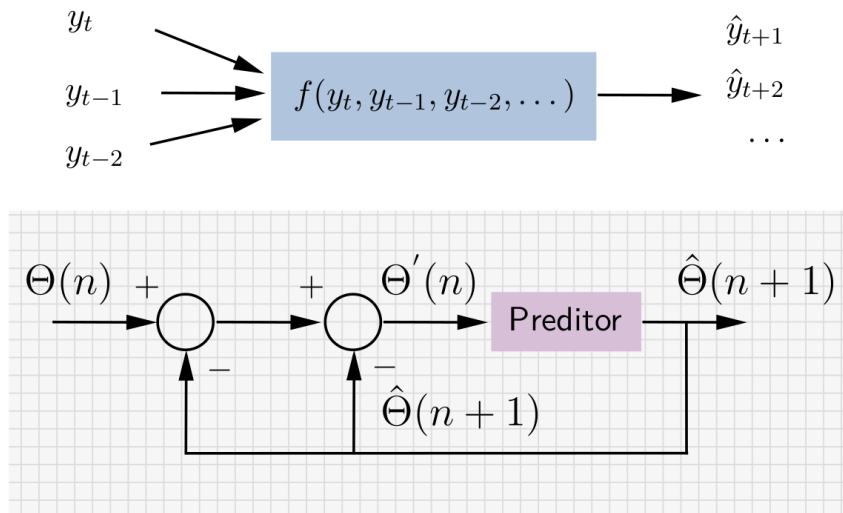
O modelo autorregressivo de médias móveis (ARMA) agrupa o elemento de previsão através de recursão (AR) e um elemento de suavização, a média móvel (MA), permitindo reduzir o erro de previsão. A estrutura do modelo ARMA de ordem  $(p, q)$  na previsão de  $\eta(t)$  é definida por

$$\eta[t] = \zeta + \sum_{i=1}^p \phi_i g(y[t-1]) + \sum_{j=1}^q \theta_j r[t-j] \quad (4)$$

onde  $p$  e  $q$  são as ordens das componentes autorregressivas (AR) e das componentes de média móvel (MA), respectivamente. Além disso,  $\zeta \in \mathbb{R}$  é um interceptor da função,  $r[t] = g(y[t]) - g(\mu[t])$  é o termo MA na escala do preditor,  $\phi$  e  $\theta$  são as componente AR e MA, respectivamente. Adicionalmente, a média condicional de  $y[t]$  é uma função das observações passadas  $y[t-i]$ , com  $i = 1, \dots, p$  e o termo de erros da média móvel. É importante observar

que a função de ligação  $g(\cdot)$  conecta o preditor linear  $\eta[t]$  à média  $\mu[t]$  de  $y[t]$ , que são as medições de consumo de bateria dentro de um intervalo de crescimento da CPU  $\hat{\Delta}_{\text{CPU}}^{\%}$ . Na Figura 8, o modelo ARMA com sua estrutura recursiva é apresentado, em que as variáveis são adaptadas para os níveis de bateria coletados na campanha de medição de consumo da seção 4.

Figura 8 – Modelo ARMA utilizado para a predição de consumo de bateria.



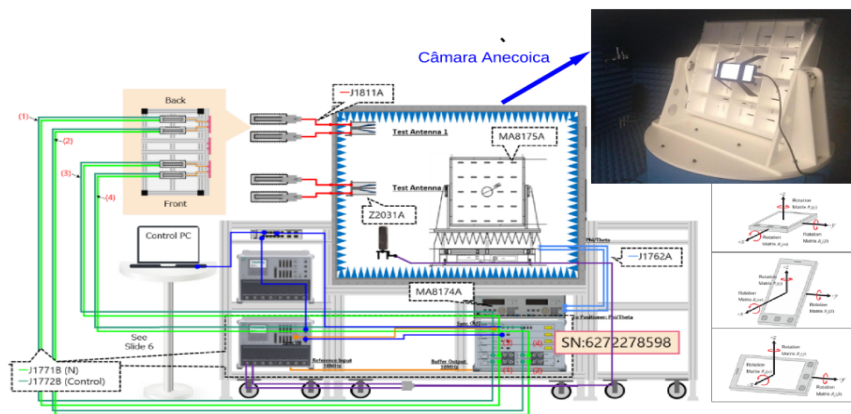
Fonte: (Própria, 2023)

Para o modelo (4), um intervalo de tempo para treinamento é requerido para realizar as predições. À medida que o modelo ARMA avança, um novo intervalo é usado para atualizar o treinamento e predir o novo horizonte de tempo. A descarga de bateria pode ser estimada pelo monitoramento do consumo cumulativo subtraído da máxima capacidade da bateria, que são informações de *status* disponíveis do UE. Dessa forma, é possível predir um nível crítico  $N_B^c$  e fazer a adaptação proposta em (2).

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As medições da rede e no UE são extraídas de um teste *over-the-air* (OTA) utilizando o ambiente apresentado na Figura 9. O teste consiste na emulação de uma rede 5G *mmWave* reconfigurável e na irradiação de sinal *mmWave* em câmara anecoica, evitando reflexões e absorções (YANG et al., 2017). A estação rádio base MT8000A da Anritsu e o *software* Rapid Test Develop (RTD) controlam a sinalização e comunicação com um smartphone comercial como um dispositivo em teste (DUT).

Figura 9 – Câmara Anecoica Controlada

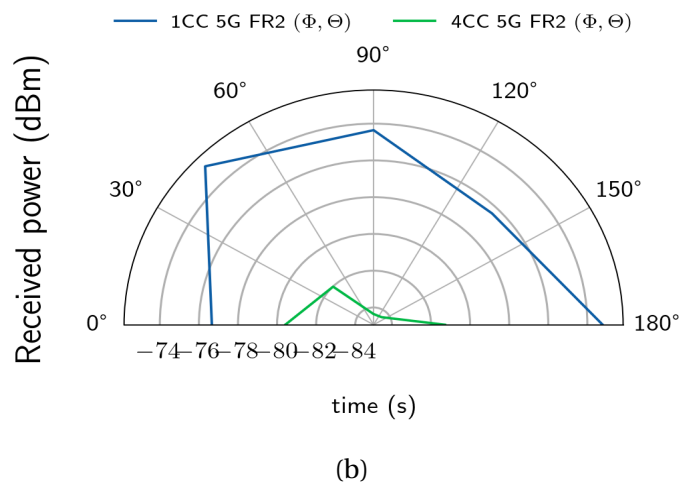
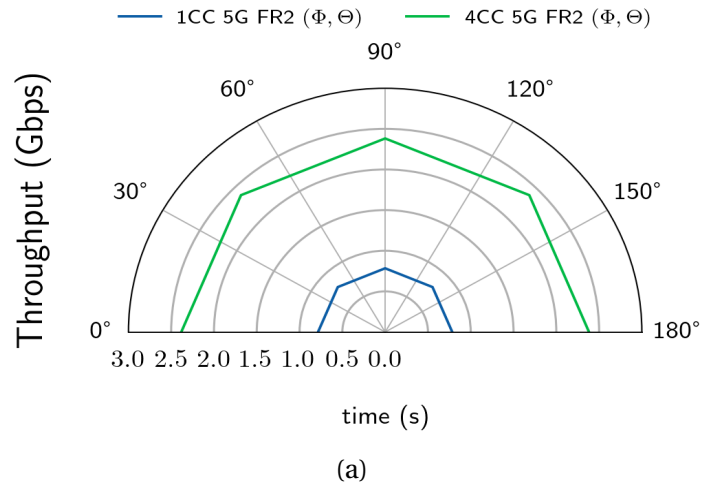


Fonte: (Própria, 2023)

Os conjuntos de dados extraídos para análise foram obtidos a partir de medições no DUT no teste OTA para parâmetros de rede especificados. A sequência de medições é descrita a seguir.

1. Caso de teste (TC) desenvolvido no aplicativo RTD para cenários CC *mmWave* (1-4) → medições de taxa de transferência máxima em OTA, considerando o posicionamento selecionado de  $\Phi$  e  $\Theta$  do UE. Os resultados são mostrados na Figura 10, considerando a taxa de transferência da rede e a potência recebida pelo UE.
2. Nos pontos de maior taxa de transferência  $\Phi_{\text{tput}}$ ,  $\Theta_{\text{tput}}$  por CC, a corrente drenada pela bateria  $I$  é medida. A bateria do UE é conectada diretamente a um analisador de energia durante a transmissão de dados das células NR. Portanto, o consumo de energia nesse intervalo é coletado dos pontos  $\Phi_{\text{tput}}^I$ ,  $\Theta_{\text{tput}}^I$  por CC.

Figura 10 – Variação de  $\Theta$  e  $\phi$ , sob passos angulares  $\Delta$ , para medições do TC padrão



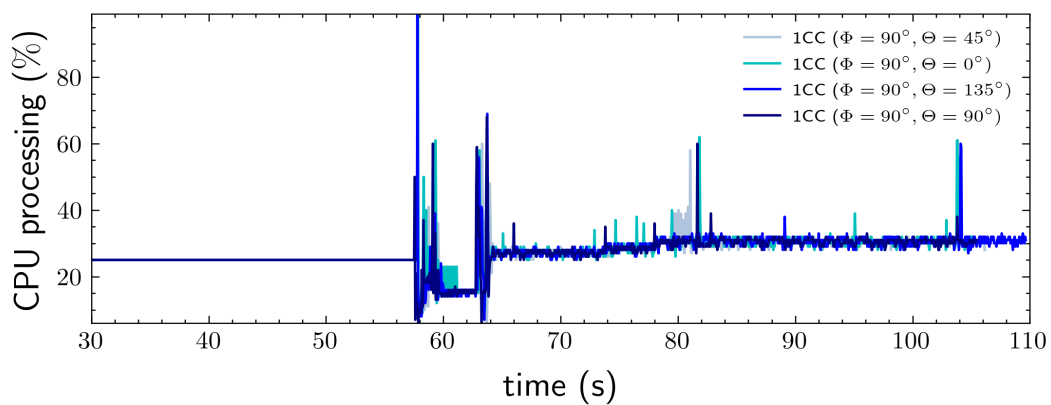
Fonte: (Própria, 2023)

- Da mesma forma, sob os mesmos pontos de maior taxa de transferência por CC, uma campanha diferente de medições é desenvolvida para coletar os registros do *chipset*, em que vários dados do UE e da rede estão disponíveis ao longo do tempo, como sinalização, *status* do UE e da rede e medições técnicas. Entre eles, o status de processamento devido ao modem é selecionado para análise, em termos de atividade da CPU em porcentagem de uso, fornecendo os pontos  $\Phi_{\text{tput}}^{\text{cpu}}$ ,  $\Theta_{\text{tput}}^{\text{cpu}}$  por CC.

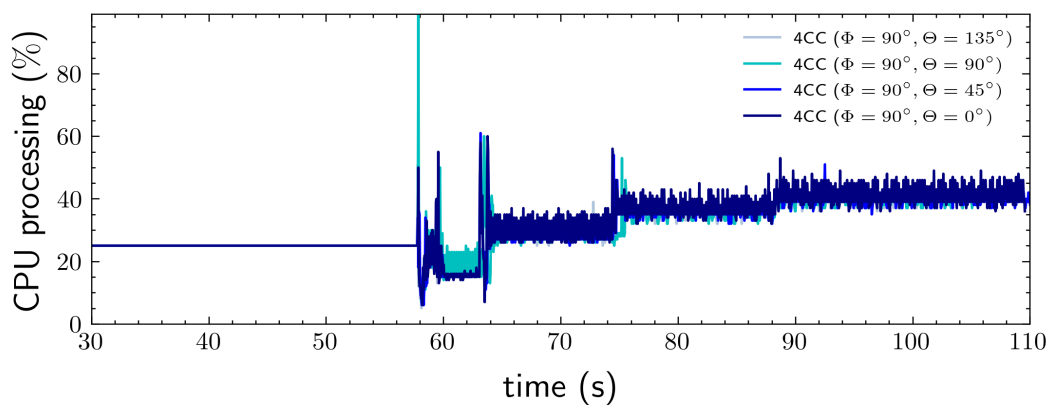
#### 4.1 ESTIMATIVA DE USO DA CPU POR AGREGAÇÃO DE PORTADORA MMWAVE

A etapa 3 fornece todos os conjuntos de dados para descrever o crescimento do processamento da CPU e, em seguida, podemos correlacioná-lo ao consumo máximo de corrente da UE coletado na etapa 2. Nas Figura 11a e Figura 11b, as medições da atividade da CPU para 1 CC e 4 CC mostram a intensidade do processamento do modem para atingir a maior taxa de transferência.

Figura 11 – Atividade da CPU para agregações de célula NR (CC) em diferentes posições angulares do UE.



(a) 1CC NR mmWave



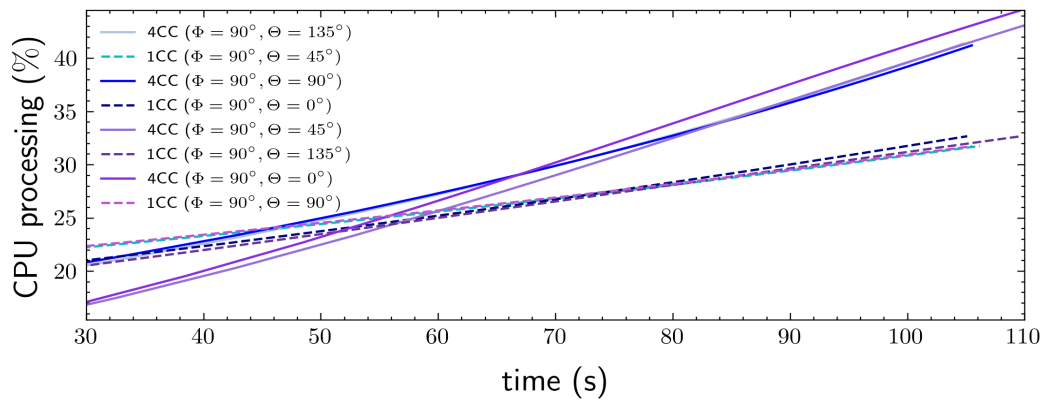
(b) 4CC NR mmWave

Fonte: (Própria, 2023)

Usando o modelo linear generalizado ajustado na Seção 3, são obtidas curvas de crescimento de processamento estimadas para cada posição angular da UE e seleção de CC, apresentadas na Figura 12. Como resultado, a taxa de crescimento máxima é obtida para

a posição angular ( $\Phi = 90^\circ, \Theta = 0^\circ$ ), que representa a melhor linha de visão (LoS) entre as antenas do UE e a antena da estação rádio base.

Figura 12 – Estimação de atividade da CPU para agregações de célula NR (CC) em diferentes posições angulares do UE.



Fonte: (Própria, 2023)

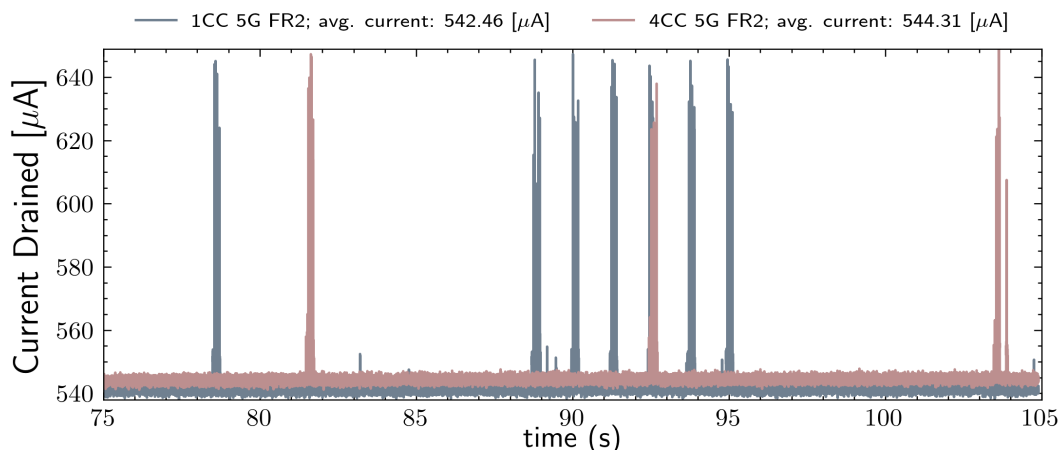
As curvas obtidas na Figura 12 representam a estimativa de crescimento de atividade de processamento sob a taxa de transferência de dados. A coleção de curvas para variações de posicionamento do UE e seleção de CC potencialmente determinam o consumo de bateria associado. Considerando uma taxa de crescimento  $\hat{\Delta}_{CPU}^{\%}$  de cada curva, é possível comparar de forma simplificada as curvas estimadas. A partir da extração de informações de taxa de crescimento, o modelo de previsão de consumo é configurado para realizar o treinamento e previsão em incrementos representativos, que podem determinar um critério para sazonalidade e horizonte de previsão.



## 4.2 PREVISÃO DE DESCARGA DE BATERIA POR AGREGAÇÃO DE PORTADORA MMWAVE

A máxima taxa de transferência alcançada sem atenuação do sinal é obtida sob  $(\Theta = 0^\circ, \Phi = 90^\circ)$  no ambiente de teste. Nesse cenário, as curvas estimadas de atividade de CPU, representadas pela função  $\hat{Y}$  no modelo logístico, são obtidas no intervalo de análise aproximado de 30 segundos. A correspondência deste intervalo para o consumo de bateria, em  $\mu A$ , é apresentado na Figura 13, que mostra o efeito da configuração de CC do ponto de vista da bateria.

Figura 13 – Corrente drenada pela bateria do UE sob diferentes CC sob máxima transmissão.



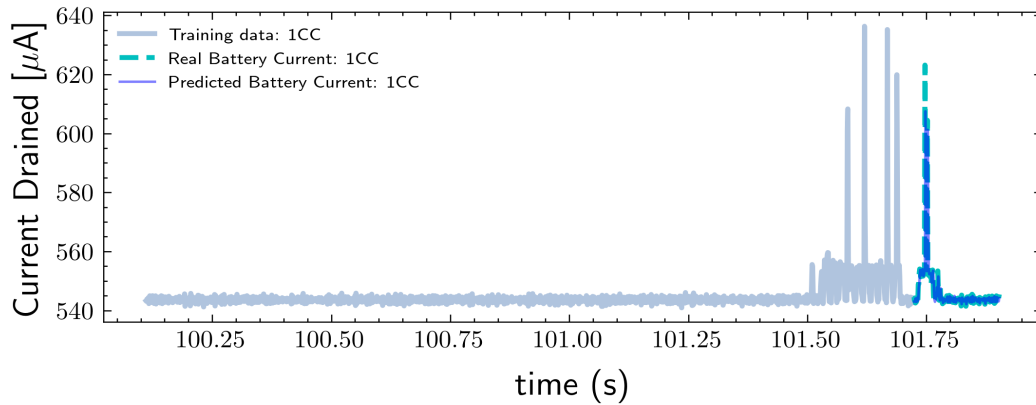
Fonte: (Própria, 2023)

Uma partição da medição de consumo para treinamento e predição é utilizada no modelo ARMA. Dessa forma, a eq. (4) é construída com observações sob a taxa de crescimento  $\hat{\Delta}_{CPU}^{\%}$ , definida como 2% para cada CC avaliada, dentro do respectivo intervalo de tempo. Tal intervalo é utilizado para treinamento e uma fração de 10% deste intervalo é utilizado como horizonte de predição.

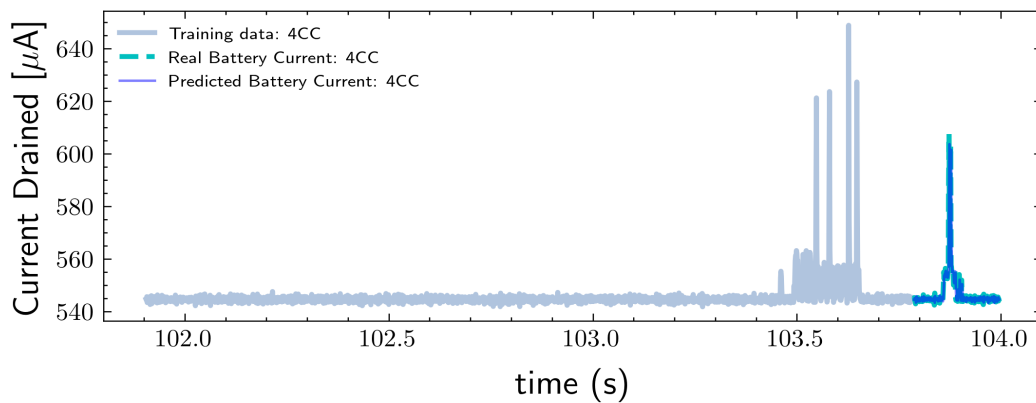
A Figura 14a apresenta a predição para corrente drenada pela bateria em série temporal sob o incremento estimado  $\hat{\Delta}_{CPU}^{\%}$  para 1CC de agregação. É possível observar que, com 90% das amostras usadas para treinamento, uma fração de 0.25 segundos pode ser perfeitamente predita. Com o aumento de CC, a Figura 14b traz a mesma precisão de predição para o mesmo intervalo. Os resultados de predição para os cenários analisados são apresentados

na Tabela 3, em termos do erro quadrático médio (MSE), erro absoluto médio (MAE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE).

Figura 14 – Predição de Corrente drenada pela bateria do UE sob  $\hat{\Delta}_{CPU}^{\%}$ .



(a) 1CC mmWave



(b) 4CC mmWave

Fonte: (Própria, 2023)

Tabela 3 – Desempenho de Predição do modelo ARMA para corrente drenada pela Bateria do UE.

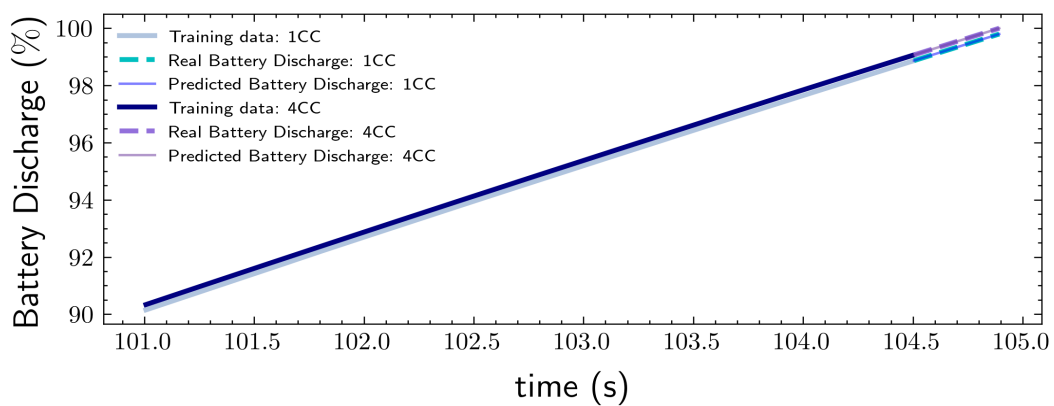
Parâmetros: [CC, $\Phi$ , $\Theta$ ]	Predição ARMA		
	MSE	MAE	RMSE
1 CC, 90°, 0°	64.58391	2.63003	8.03641
4 CC, 90°, 0°	41.4331	2.37353	6.436857

NOTA: Desempenho da predição de corrente consumida pela bateria através da função auxiliar de crescimento de atividade da CPU, de 2%.

A descarga de bateria do UE pode ser estimada através da extensão da função de pre-

dição do modelo ARMA considerando a corrente drenada acumulada ao longo do tempo subtraída da autonomia máxima da bateria. Repetindo-se a condição incremental de crescimento da CPU como função auxiliar para os passos de predição do modelo ARMA, obtém-se as curvas de descarga da Figura 15. Nessa predição é possível determinar o tempo em que o nível crítico de bateria ( $N_B^c$ ) será atingido para cada configuração maximal de transmissão das CCs analisadas.

Figura 15 – Predição de descarga de bateria do UE sob  $\hat{\Delta}_{CPU}^{\%}$ .



Fonte: (Própria, 2023)

A predição de descarga apresenta comportamento cumulativo e linear, resultando em menores erros de predição em comparação à predição de picos de consumo na série temporal, conforme observado na Tabela 4. Conseqüentemente, a aplicação do modelo para determinar a adaptação de *throughput* sob nível crítico pode ser antecipada com precisão.

Tabela 4 – Desempenho de Predição do modelo ARMA para Descarga de Bateria no UE.

Parâmetros: [CC, $\Phi$ , $\Theta$ ]	Predição ARMA		
	MSE	MAE	RMSE
1 CC, 90°, 0°	5.7224e-05	0.000402	0.007564
4 CC, 90°, 0°	0.000492	0.001143	0.022185

NOTE: Desempenho da predição de descarga de bateria através da função auxiliar de crescimento de atividade da CPU, de 2%.

Na extração de diferentes curvas de crescimento de CPU, sob efeito de canal, outros elementos podem aumentar o processamento de CPU no UE, tais como a demanda de processamento de *codex* associados a códigos corretores de erros. A especificação da taxa de

crescimento de CPU, em 2% como referência de sazonalidade para o preditor em série temporal foi baseada em resultados empíricos, onde uma diferença de consumo aproximada de  $1 \mu A$ , em média, entre 1 CC e 4 CC foi medida. Além do mais, qualquer processamento extra pode afetar a janela de tempo usada no modelo ARMA. Para os resultados obtidos, a adaptação proposta da função *throughput* em (2) utiliza o horizonte de predição como a linha tracejada da Figura 15 para decidir se  $N_B^c$  será alcançado, definindo o elemento de decréscimo de CC, dado por  $\zeta$ .

## 5 CONCLUSÃO

Na propagação de ondas *mmWave*, a linha de visão (LoS) é o requisito para a máxima taxa de transferência de dados, em que mais CC podem ser selecionados para atingir a capacidade suportada pelo usuário (UE). Ao reproduzir uma transmissão 5G em ondas milimétricas a partir de testes OTA, foi possível comprovar o desempenho de um UE comercial sujeito aos custos da taxa de transferência máxima de dados. Nesse sentido, foram observados o consumo de energia e as demandas de processamento da CPU sob mais altas taxas. Como a atividade da CPU está diretamente relacionada ao consumo de energia, uma estimativa dessa atividade representa importante covariada para um modelo de predição de duração da bateria. Usando 1 CC e 4 CC nos experimentos, uma coleção de dados de atividade de CPU, consumo de corrente drenada pela bateria do UE, percentual de consumo de bateria, níveis de potência recebida puderam ser avaliados e correlacionados sob uma escala temporal.

O modelo proposto para adaptação de *throughput* e extensão de autonomia da bateria é especificado pelo mapeamento da atividade de processamento de CPU estimada dentro de uma função de predição, especificada por um modelo autorregressivo de médias móveis (ARMA). Tal predição é capaz de antecipar a adaptação da rede com a redução incremental unitária de uma CC quando um nível crítico de bateria,  $N_B^c = 95\%$ , está sob o horizonte de predição, estendendo a tempo de autonomia do usuário.

Os resultados apresentados mostram precisão de predição de descarga de bateria para uma taxa de crescimento de atividade CPU de 2% nos cenários de visada direta com 1 CC e 4 CC. Este intervalo apresentou-se adequado para relação de treinamento e predição de 90% e 10%, que equivale a 2.25 segundos e 0.25 segundos de coleta de dados, respectivamente. Além disso, o crescimento de 2% de atividade de CPU representou uma diferença de  $1\mu\text{A}$  de consumo entre 1 CC e 4 CC no intervalo de análise. A ocorrência do nível crítico de descarga, sob o horizonte de predição de 0.25 segundos foi capaz de antecipar a adaptação de forma segura, dados os baixos valores de erro de predição.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais sugestões para futuras pesquisas relacionadas à predição de consumo de bateria em UE são as seguintes:

- Estender o estudo para mais arranjos de CC em mmWave suportados pelo UE, por exemplo, 5, 6, 7 e 8.
- Incluir no modelo de predição ARMA um parâmetro de sazonalidade vinculado à taxa de atividade da CPU;
- Dado que nem sempre a estacionariedade estatística é alcançada nas observações multiparamétricas, explorar a predição em um modelo autorregressivo integrado de médias móveis (ARIMA);

## 5.2 PUBLICAÇÕES

O artigo a seguir foi aceito para publicação no 20th SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2023), que será realizado entre 5 a 9 de Novembro de 2023 em Castelldefels, Espanha.

SANTOS, I.S, BARBOSA, Y.H.S., COSTA, M.G. CPU Usage Estimation for 5G UE by mmWave Carrier Aggregation. In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC), 20., 2023, Castelldefels, Spain. **Proceedings...** TBD.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3GPP. **5G;NR;Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 15.5.0 Release 15)**. Valbonne, FR.
- 3GPP. **5G;NR;Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 15.2.0 Release 15)**. Valbonne, FR.
- 3GPP. **5G;NR;User Equipment (UE) radio transmission and reception;Part 2: Range 2 Standalone (3GPP TS 38.101-2 version 16.4.0 Release 16)**. Valbonne, FR.
- 3GPP. **LTE;Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities (3GPP TS 36.306 version 15.3.0 Release 15)**. Sophia, FR.
- 3GPP. **Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification**. Valbonne, FR, 2016.
- 3GPP. **5G;NR;Physical layer procedures for data(3GPP TS 38.214 version 15.2.0 Release 15)**. Valbonne, FR, 2018.
- 5GAMERICAS. **5G mobile technology: a guide**. 2020. Disponível em: <<https://www.5gamericas.org/understanding-millimeter-wave-spectrum-for-5g-networks/>>. Acesso em: 19 de out. de 2022.
- COMMUNICATIONS, O. O. for. **5G mobile technology: a guide**. 2020. Disponível em: <[https://www.ofcom.org.uk/\\\_\\\_data/assets/pdf\\\_file/0015/202065/5g-guide.pdf](https://www.ofcom.org.uk/\_\_data/assets/pdf\_file/0015/202065/5g-guide.pdf)>. Acesso em: 15 de out. de 2022.
- DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. **5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology**. [S.l.]: Elsevier Science, 2020.
- DILLI, R. Analysis of 5g wireless systems in fr1 and fr2 frequency bands. **2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)**, p. 1–6, 2020.
- GHOSH, A.; RATASUK, R. **Essentials of LTE and LTE-A**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.
- MONDAL, S.; SINHA, A.; ROUTH, J. A survey on evolution of wireless generations 0g to 7g. **International Journal of Advance Research in Science and Engineering (IJARSE)**, v. 1, n. 2, p. 5–10, 2015.
- SAMPAIO, V. F. **Tecnologia Celular 4G LTE: Conhecendo o 4G**. [S.l.]: Santa Rita do Sapucaí, 2019.
- TAKEDA, L. N. **EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA MÓVEL ATÉ 2013**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
- THANTHARATE, A.; BEARD, C.; MARUPADUGA, S. A thermal aware approach to enhance 5g device performance and reliability in mmwave networks. In: **2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–5.
- YANG, Y. et al. **5G Wireless Systems: Simulation and Evaluation Techniques**. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2017.
- ZAIDI, A. et al. **5G Physical Layer: principles, models and technology components**. [S.l.]: Academic Press, 2018.