



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA  
COMPUTAÇÃO**

**JONAS DA CONCEIÇÃO NASCIMENTO PONTES**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E CONSUMO DE ENERGIA DE  
PARÂMETROS TCP/IP EM DISPOSITIVOS MÓVEIS**

Recife  
2017

JONAS DA CONCEIÇÃO NASCIMENTO PONTES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E CONSUMO DE ENERGIA DE  
PARÂMETROS TCP/IP EM DISPOSITIVOS MÓVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

**Orientador:** Prof. Dr. Eduardo Antonio Guimarães Tavares

Recife  
2017

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da S. Portes, CRB4-1217

P814a Pontes, Jonas da Conceição Nascimento  
Análise de desempenho e consumo de energia de parâmetros TCP/IP em dispositivos móveis / Jonas da Conceição Nascimento Pontes. – 2017.  
71 f.: il., fig., tab.

Orientador: Eduardo Antônio Guimarães Tavares.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2017.  
Inclui referências.

1. Avaliação de desempenho. 2. Consumo de energia. I. Tavares, Eduardo Antônio Guimarães (orientador). II. Título.

004.029 CDD (23. ed.) UFPE- MEI 2018-081

JONAS DA CONCEIÇÃO NASCIMENTO PONTES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E CONSUMO DE ENERGIA DE  
PARÂMETROS TCP/IP EM DISPOSITIVOS MÓVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovado em: 20/06/2017

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Eduardo Antonio Guimarães Tavares  
(Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Ricardo Massa Ferreira Lima  
(Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Meuse Nogueira de Oliveira Junior  
(Examinador Externo)  
Instituto Federal de Pernambuco

*Dedico esta dissertação a meu filho, Benjamin Pontes.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e pelas oportunidades de vencer grandes batalhas.

Agradeço a meu orientador, Eduardo Tavares, que me proporcionou a oportunidade de crescimento na carreira acadêmica. Agradeço ainda aos demais professores dos quais tive oportunidade de receber grandiosos ensinamentos.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco e ao Centro de Informática dessa instituição por me proporcionar este curso de pós-graduação. Agradeço, ainda, à Motorola por me permitir realizar a pesquisa no projeto CIn/Motorola, utilizando os equipamentos por ela disponibilizados.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Acre, por possibilitar-me cursar essa pós-graduação.

Agradecimento especial aos meus familiares, por terem feito todo o possível para dar suporte à minha educação e, conseqüentemente, minha carreira profissional. Agradeço a Mariana, pelo companheirismo e carinho em todos os momentos.

Agradeço a meus amigos, pessoas com as quais eu tive o prazer de conviver dentro do Centro de Informática, em especial Eric Borba, Erico Guedes, Iure Fé, Aline Oliveira, Djalma Filho e Demétrio Borges. Agradeço ainda a Jair Figueiredo, amigo que me apresentou o mestrado em Ciência da Computação do CIn/UFPE e foi grande incentivador na realização deste trabalho.

"Science is knowledge which we understand so well that we can teach it to a computer; and if we don't fully understand something, it is an art to deal with it." (KNUTH, 1974).

## RESUMO

Nos últimos anos, os dispositivos móveis (principalmente *smartphones* e *tablets*) tornaram-se muito populares, sendo responsáveis por uma parte significativa do tráfego da Internet. Nesses dispositivos, os serviços multimídia, tal como *streaming* de vídeo sobre HTTP, são comumente adotados e o protocolo TCP é o padrão para garantir a transmissão confiável de dados, independentemente da taxa de transmissão da rede, atraso, duplicação ou reordenamento de segmento. Não obstante, as necessidades de desempenho de transmissão das aplicações, bem como os avanços nas tecnologias de rede, resultaram em velocidades de transmissão cada vez maiores, muito além do propósito para o qual o TCP foi originalmente projetado. Para atenuar esse problema, várias modificações foram feitas nesse protocolo – chamadas extensões para alto desempenho – com a finalidade de melhorar a utilização da largura de banda oferecida pelas tecnologias de rede de alta velocidade como, por exemplo, Wi-Fi, WCDMA (3G) e LTE (4G). O consumo de energia dos dispositivos móveis é outra grande preocupação devido à baixa capacidade de as baterias proverem energia para esses dispositivos, com destaque para as aplicações de *streaming* que são responsáveis por grande parte desse consumo. Assim, modificações em tecnologias de rede e parâmetros do TCP podem resolver problemas de desempenho, bem como influenciar no consumo de energia. Esta dissertação avalia a influência de parâmetros TCP/IP configuráveis no desempenho e no consumo de energia em *smartphone* Android, adotando o serviço de *streaming* de vídeo sobre HTTP como carga de trabalho. Para isso, os seguintes fatores são avaliados: (i) tecnologia de rede; (ii) a largura de banda da rede; e (iii) importantes parâmetros do protocolo TCP (incluindo extensões para alto desempenho deste protocolo). Os resultados são obtidos a partir da realização de três experimentos (utilizando DoE) em que o primeiro serve para selecionar, dentre os fatores inicialmente elencados, quais são críticos no tocante ao desempenho. O segundo avalia os fatores selecionados a partir do experimento anterior, considerando desempenho e consumo de energia. Já o terceiro e último experimento considera os mesmos fatores, níveis e métricas do segundo, mas abrange a injeção de perda de pacote e atraso na rede com a intenção de avaliar a influência dos parâmetros TCP/IP configuráveis em redes com essas características. Os resultados experimentais mostram que a largura de banda é altamente influente no desempenho de dispositivos móveis. A tecnologia de rede tem grande atuação no desempenho e no consumo de energia e alguns parâmetros TCP podem influenciar nessas métricas.

**Palavras-chave:** Smartphones. Extensões TCP para Alto Desempenho. Avaliação de Desempenho. Consumo de Energia.



## ABSTRACT

In the last years, mobile devices (mainly smartphones and tablets) have become quite popular, being responsible for a significant part of the Internet traffic. In these devices, multimedia services, such as video streaming over HTTP, are commonly adopted and the TCP protocol is the standard for assure reliable transmission of data, regardless of network transmission rate, delay, duplication, or segment reordering. Nevertheless, the applications transmission performance needs, as well as improvements in network technologies, have resulted in higher transmission speeds, far beyond the purpose for which TCP was originally designed. To reduce this problem, several changes have been made on this protocol - called TCP extensions for high performance – with the intention of improving the bandwidth utilization offered by high-speed network technologies, such as Wi-Fi, WCDMA (3G) and LTE (4G). Energy consumption on mobile device is another major concern because of the low capacity of the batteries to provide energy to these devices, mainly applications of *streaming*, that are responsible for a great part of this consumption. Thus, changes in network technologies and TCP parameters can solve performance problems, as well as have an effect on energy consumption. This research evaluates the influence of configurable TCP/IP parameters on performance and energy consumption on Android smartphone, by adopting video streaming over HTTP as workload. In order to perform, the following factors are evaluated: (i) network technology; (ii) network bandwidth; and (iii) representative TCP parameters (including extension for high performance of this protocol). The results are obtained from the realization of three experiments – projected by using Design of Experiments - DoE – in which the first one serves to select, among the initially listed factors, which are critical related to the performance. The second evaluates the factors selected from the previous experiment, considering performance and energy consumption. The third and last experiment considers the same factors, levels and metrics of the second, but it covers the injection of packet loss and network delay with the purpose of evaluating the influence of configurable TCP/IP parameters in networks with these characteristics. Experimental results show that bandwidth is highly influential in the performance of mobile devices. Network technology has great impact on performance and energy consumption, and some TCP parameters can influence these metrics.

**Keywords:** Smartphones. TCP extensions for high performance. Performance evaluation. Energy consumption.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                         |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 -  | Estrutura do segmento TCP . . . . .                                     | 23 |
| Figura 2 -  | Apresentação de três vias: troca de segmentos . . . . .                 | 25 |
| Figura 3 -  | <i>Buffers</i> TCP de envio e de recepção . . . . .                     | 26 |
| Figura 4 -  | Exemplo de reconhecimento cumulativo . . . . .                          | 27 |
| Figura 5 -  | Reconhecimento de dados com o reconhecimento seletivo . . . . .         | 28 |
| Figura 6 -  | Planejamento e criação dos experimentos . . . . .                       | 39 |
| Figura 7 -  | Arquitetura do sistema para a comunicação móvel . . . . .               | 47 |
| Figura 8 -  | Experimento I - efeitos principais . . . . .                            | 50 |
| Figura 9 -  | Experimento II - efeitos principais: <i>goodput</i> . . . . .           | 52 |
| Figura 10 - | Experimento II - efeitos principais: consumo de energia . . . . .       | 54 |
| Figura 11 - | Correlação: consumo de energia x <i>goodput</i> em rede WCDMA . . . . . | 55 |
| Figura 12 - | Correlação: consumo de energia x <i>goodput</i> em rede LTE . . . . .   | 56 |
| Figura 13 - | Experimento III - efeitos principais: <i>goodput</i> . . . . .          | 59 |
| Figura 14 - | Experimento III - efeitos principais: consumo de energia . . . . .      | 61 |
| Figura 15 - | Correlação: consumo de energia x <i>goodput</i> em rede WCDMA . . . . . | 62 |
| Figura 16 - | Correlação: consumo de energia x <i>goodput</i> em rede LTE . . . . .   | 63 |

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                                                      |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 -  | Comparação entre este trabalho e trabalhos relacionados . . . . .                                    | 20 |
| Tabela 2 -  | Fatores e níveis . . . . .                                                                           | 41 |
| Tabela 3 -  | Estrutura de <i>aliases</i> do Experimento I . . . . .                                               | 42 |
| Tabela 4 -  | Matriz do planejamento do Experimento I . . . . .                                                    | 42 |
| Tabela 5 -  | Estrutura de <i>aliases</i> dos experimento II e III . . . . .                                       | 44 |
| Tabela 6 -  | Matriz do planejamento dos experimentos II e III . . . . .                                           | 44 |
| Tabela 7 -  | Experimento I - Teste ANOVA . . . . .                                                                | 50 |
| Tabela 8 -  | Ranqueamento dos efeitos dos fatores . . . . .                                                       | 51 |
| Tabela 9 -  | Experimento II - Teste ANOVA: <i>goodput</i> . . . . .                                               | 52 |
| Tabela 10 - | Ranqueamento dos efeitos dos fatores – <i>goodput</i> . . . . .                                      | 53 |
| Tabela 11 - | Experimento II - Teste ANOVA: consumo de energia . . . . .                                           | 53 |
| Tabela 12 - | Ranqueamento dos efeitos dos fatores – consumo de energia. . . . .                                   | 54 |
| Tabela 13 - | Fatores com diferentes comportamento em diferentes métricas . . . . .                                | 56 |
| Tabela 14 - | Comparação - desejabilidade composta encontrada e para a configuração<br>padrão do Android . . . . . | 57 |
| Tabela 15 - | Experimento III - Teste ANOVA: <i>goodput</i> . . . . .                                              | 59 |
| Tabela 16 - | Ranqueamento dos efeitos dos fatores – <i>goodput</i> . . . . .                                      | 60 |
| Tabela 17 - | Experimento III - Teste ANOVA: consumo de energia . . . . .                                          | 61 |
| Tabela 18 - | Ranqueamento dos efeitos dos fatores – <i>goodput</i> . . . . .                                      | 62 |
| Tabela 19 - | Fatores com diferentes comportamentos em diferentes métricas . . . . .                               | 63 |
| Tabela 20 - | Comparação - desejabilidade composta encontrada e para a<br>Configuração padrão do Android . . . . . | 64 |

## **LISTA DE ACRÔNIMOS**

|       |                                           |
|-------|-------------------------------------------|
| GSM   | Global System for Mobile Communications   |
| LTE   | Long Term Evolution                       |
| AMPS  | Advanced Mobile Phone System              |
| FDMA  | Frequency Division Multiple Access        |
| CDMA  | Code Division Multiple Access             |
| UMTS  | Universal Mobile Telecommunication System |
| HTTP  | HyperText Transfer Protocol               |
| TCP   | Transmission Control Protocol             |
| DoE   | Design of Experiment                      |
| API   | Application Programming Interface         |
| RTT   | Round Trip Time                           |
| IP    | Internet Protocol                         |
| SACK  | Selective Acknowledgment                  |
| DoE   | Design of Experiments                     |
| ANOVA | Analysis of Variance                      |
| EDGE  | Explicit Data Graph Execution             |
| RTO   | Retransmission Timeou                     |

## SUMÁRIO

|              |                                                         |           |
|--------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>                                       | <b>14</b> |
| 1.1          | CONTEXTO . . . . .                                      | 14        |
| 1.2          | MOTIVAÇÃO . . . . .                                     | 17        |
| 1.3          | OBJETIVOS . . . . .                                     | 18        |
| 1.4          | TRABALHOS RELACIONADOS . . . . .                        | 19        |
| 1.5          | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO . . . . .                      | 20        |
| <b>2</b>     | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>                              | <b>22</b> |
| 2.1          | TCP E TRANSFERÊNCIA CONFIÁVEL DE DADOS . . . . .        | 22        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Estabelecimento de Conexão . . . . .</b>             | <b>24</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Reconhecimento de Dados Recebidos . . . . .</b>      | <b>25</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Desempenho do TCP . . . . .</b>                      | <b>26</b> |
| 2.2          | AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO . . . . .                       | 29        |
| 2.3          | PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO . . . . .                   | 31        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Conceitos . . . . .</b>                              | <b>31</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>Tipos de Projetos Experimentais . . . . .</b>        | <b>32</b> |
| 2.3.2.1      | Planejamento fatorial $2^k$ . . . . .                   | 33        |
| 2.3.2.2      | Planejamento fatorial fracionário $2^{k-p}$ . . . . .   | 34        |
| <b>2.3.3</b> | <b>Análise de Variância (ANOVA) . . . . .</b>           | <b>35</b> |
| <b>2.3.4</b> | <b>Desejabilidade . . . . .</b>                         | <b>36</b> |
| 2.4          | CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO . . . . .              | 37        |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA E AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO</b>         | <b>38</b> |
| 3.1          | METODOLOGIA . . . . .                                   | 38        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Planejamento do Experimento I: triagem . . . . .</b> | <b>40</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>Planejamento dos Experimentos II e III . . . . .</b> | <b>43</b> |
| 3.2          | FERRAMENTAS . . . . .                                   | 45        |
| 3.3          | AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO . . . . .                    | 46        |
| 3.4          | CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO . . . . .              | 47        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>                         | <b>48</b> |
| 4.1          | EXPERIMENTO I: TRIAGEM . . . . .                        | 48        |
| 4.2          | EXPERIMENTO II: LARGURA DE BANDA FIXA . . . . .         | 49        |
| <b>4.2.1</b> | <b>Goodput . . . . .</b>                                | <b>51</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Consumo de Energia . . . . .</b>                     | <b>51</b> |
| <b>4.2.3</b> | <b>Correlação . . . . .</b>                             | <b>53</b> |

|       |                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.4 | Desejabilidade composta para desempenho e consumo de energia . . . . . | 56 |
| 4.3   | EXPERIMENTO III: INJEÇÃO DE PERDA DE PACOTE E ATRASO . . . . .         | 58 |
| 4.3.1 | Goodput . . . . .                                                      | 58 |
| 4.3.2 | Consumo de Energia . . . . .                                           | 60 |
| 4.4   | CORRELAÇÃO . . . . .                                                   | 60 |
| 4.4.1 | Desejabilidade Composta para Desempenho e Consumo de Energia . . . . . | 63 |
| 4.5   | CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO . . . . .                             | 64 |
| 5     | CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS                                          | 66 |
| 5.1   | TRABALHOS FUTUROS . . . . .                                            | 67 |
|       | REFERÊNCIAS                                                            | 69 |

# 1

## INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a conjuntura na qual o trabalho se encontra (Seção 1.1). Posteriormente, expõe a motivação para a realização da pesquisa (Seção 1.2). A Seção 1.3 indica os objetivos geral e específicos, enquanto os trabalhos relacionados são apresentados na Seção 1.4. Finalmente, a Seção 1.5, contempla a estrutura desta dissertação.

### 1.1 CONTEXTO

Nos últimos anos, a quantidade de usuários de dispositivos móveis, notadamente *smartphones* e *tablets* tem aumentado significativamente. Uma estimativa apresenta por CERWALL; LUNDVALL et al. (2016) mostra que o número de "dispositivos inteligentes" pode aumentar de 3,3 bilhões em 2015 para 6,8 bilhões em 2022. O crescente uso desses dispositivos como mecanismo para troca de informações, aliado às grandes possibilidades de sua utilização em atividades cotidianas, fomentou tanto o mercado de criação de aplicativos quanto a evolução de tecnologias de comunicação sem fio, notadamente as redes de dados móveis (ou rede de telefonia móvel celular).

No tocante a essas redes, a primeira geração, chamada de rede 1G, foi caracterizada por usar sinal analógico e permitir apenas tráfego de voz, ao utilizar Advanced Mobile Phone System - AMPS e Frequency Division Multiple Access - FDMA como tecnologias de redes. Com o passar dos anos, a rede 1G tornou-se obsoleta e houve a necessidade da substituição do sistema de sinais analógicos por tecnologias digitais, que são mais estáveis, abrangem maior área geográfica e maior número de usuários. Dessa forma, surgiu a segunda geração (2G) que, originalmente, também foi projetada para voz, sendo estendida, posteriormente, para suportar dados, a utilizar as tecnologias Global System for Mobile Communications - GSM ou Code Division Multiple Access - CDMA, o que aumentou consideravelmente a vazão das redes de comunicação (KUROSE; ROSS, 2012).

Entretanto, com o passar do tempo, houve a necessidade de tecnologias que pudessem fornecer altas taxas de transmissão de dados para suprir as necessidades dos dispositivos móveis e suas aplicações. Nesse contexto, as redes celulares de terceira geração foram desenvolvidas

com o objetivo de oferecer alta velocidade de dados e conectividade multimídia aos usuários, ao utilizar tecnologias como, por exemplo, CDMA, Universal Mobile Telecommunication System - UMTS e Explicit Data Graph Execution - EDGE, uma variação do GSM (MISHRA, 2007). Assim, o propósito da rede 3G era permitir a seus usuários ter acesso móvel com qualidade similar às conexões fixas e aproveitar os recursos disponíveis, tais como *streaming* de vídeo e áudio, mensagens multimídias e teleconferências.

A evolução significou o surgimento de tecnologias da quarta geração (4G), com destaque para a tecnologia Long Term Evolution - LTE, que suporta altas taxas de transferência de dados, podendo trabalhar com taxas de transmissão de até 300 Mbps para *download* e 75 Mbps para *upload*, a depender de recursos implementados na rede e do aparelho do usuário (INFOWESTER, 2012). A emergente tecnologia para a quinta geração (5G) ainda se encontra em fase experimental, sem padrões definidos, mas promete entregar velocidades de transferência de dados bem acima dos fornecidos atualmente.

A velocidade das redes de telecomunicação móveis decorrente da evolução dessas tecnologias é um dos fatores que possibilitou que os *smartphones* englobassem atualmente tanto serviços tradicionalmente de celulares, como troca de mensagens de texto e voz, quanto serviços de *desktops* tradicionais, como *download* e *upload* de arquivos, acesso à *web* e compartilhamento de imagens. Como consequência, o tráfego de dados na Internet também tem passado por mudanças de tal modo que os *smartphones* podem representar 30% do total de tráfego IP em 2020, muito superior aos 8% em 2015 (CISCO, 2016).

A facilidade de acesso a partir de *smartphones* trouxe vários benefícios, notadamente no setor de entretenimento. Nesse sentido, *streaming* de vídeo é destacado como um dos serviços mais populares adotados pelos usuários desses dispositivos. Mais da metade de visualizações do YouTube é originado por esse perfil de usuários (YOUTUBE, 2015), e esse serviço pode contemplar uma parte superior a 82% de todo o tráfego de Internet a partir de 2020 (CISCO, 2016).

Serviços de *streaming* de vídeo exigem, geralmente, transmissão confiável de dados (isto é, garantia de entrega de dados ao receptor) e possibilidade de recuperação de pacotes perdidos. Por essas características, para a entrega de serviços de *streaming* aos usuários, o protocolo de aplicação HyperText Transfer Protocol - HTTP é largamente utilizado devido a, além da sua simplicidade de infraestrutura do lado servidor (AZWAR et al., 2014), permitir a transmissão confiável, uma vez que usa Transmission Control Protocol - TCP (MOK et al., 2011) como protocolo de transporte.

Entretanto, *streaming* de vídeo sobre HTTP demanda alto desempenho de transmissão, o que não foi uma preocupação inicial do protocolo TCP. Com o desenvolvimento de meios de comunicação de alta velocidade e o aumento da complexidade de aplicações, o impacto negativo do desempenho desse protocolo tornou-se um gargalo, uma vez que aplicações que o usam como protocolo de transporte não podem tirar o máximo proveito da capacidade de transmissão oferecida pela rede física.



Ao longo dos anos, esforços foram empregados com o intuito de mitigar tal característica negativa. Nesse sentido, diversas extensões TCP para alto desempenho vêm sendo desenvolvidas, como as definidas no RFC 7323 (BORMAN; SCHEFFENEGGER; JACOBSON, 2014). Uma dessas extensões é a possibilidade de reconhecimento seletivo (SACK), uma evolução às implementações mais tradicionais do TCP. Essas utilizam o reconhecimento cumulativo, isto é, determinado reconhecimento indica que todos os *bytes* de numeração inferior a ele já foram recebidos com sucesso. No entanto, isso é ineficiente quando há múltiplas perdas em uma janela de transmissão, provocando retransmissão desnecessária de pacotes. A extensão SACK possibilita o reconhecimento de dados não contínuos, de forma que o remetente precise retransmitir apenas partes específicas de uma janela, ou seja, apenas os dados realmente perdidos.

A extensão chamada escalonamento de janela possibilita expandir o tamanho da janela TCP, limitado a  $2^{16}$  *bytes* em implementações mais tradicionais do protocolo, o que possibilita tirar melhor proveito da largura de banda da rede. Outrossim, a extensão *timestamps* melhora a forma como um hospedeiro estima o tempo de ida e volta – Round Trip Time - RTT – em comparação com o método de tempo limite de retransmissão – Retransmission Timeout - RTO –, presente nas implementações antigas do TCP. Já a extensão para baixa latência do TCP (*TCP Low Latency*) possibilita definir a preferência no atendimento a uma requisição, sendo com baixo tempo de resposta (baixa latência) ou alta vazão.

Além das extensões para alto desempenho, outros mecanismos são implementados e estudados com o objetivo de adequar o TCP a aplicações que exigem alto desempenho. Um desses mecanismos são os algoritmos de controle de congestionamento (ou versões do TCP), desenvolvidos com o propósito de melhor lidar com o congestionamento em rede, tais como Reno e Cubic. Também, o parâmetro *TCP rmem* representa o tamanho do *buffer* de recepção do cliente, que é composto por três valores: os tamanhos mínimo, padrão e máximo para cada conexão TCP.

A ausência desses mecanismos pode levar a diversos problemas de degradação do desempenho, como numerosas retransmissões inúteis e congestionamento da conexão. Tal situação pode gerar indisponibilidade da aplicação, mesmo que o meio de transmissão esteja em funcionamento.

Adicionalmente, o consumo de energia é um problema notável em dispositivos móveis, dado que a quantidade de energia requerida é de difícil provimento via baterias devido a estas não terem evoluído na mesma proporção que a complexidade de *hardware* e aplicações presentes nesses dispositivos (PERRUCCI; FITZEK; WIDMER, 2011).

*Streaming* de vídeo é responsável pela maior parte da utilização da largura de banda da rede e dos recursos do lado do cliente (por exemplo, CPU, interface de rede) e, portanto, este serviço também pode ser uma fonte importante de consumo de energia (STOCKHAMMER; LUBY, 2012), uma preocupação quando se trata do uso de dispositivos móveis.

Nesse contexto, a tecnologia de rede e os parâmetros do protocolo TCP podem influenciar

o desempenho, bem como o consumo de energia dos dispositivos *smartphones* (HUANG et al., 2012), (MIKI; YAMAGUCHI; OGUCHI, 2011).

Assim, este trabalho avalia a influência parâmetros TCP/IP configuráveis em dispositivos *smartphones*, com foco no desempenho e consumo de energia. Para efeito deste trabalho, considera-se como parâmetros TCP/IP a tecnologia de rede, a largura de banda e parâmetros intrínsecos do protocolo TCP. Dessa forma, a pesquisa considera os seguintes fatores e níveis: (i) tecnologia de rede (3G e LTE); (ii) largura de banda da rede (1,0Mbps e 1,8Mbps); e (iii) parâmetros TCP representativos (incluindo extensões para alto desempenho). Além disso, *streaming* de vídeo sobre HTTP é adotado como carga de trabalho em razão de ele ser responsável por elevado consumo de energia e utilização da largura de banda da rede (como demonstrado em algumas pesquisas apresentadas na Seção 1.4) e por usar a transmissão confiável de dados provida pelo TCP. Por considerar redes de dados móveis, utiliza-se um equipamento que simula uma estação base de telecomunicações, permitindo os experimentos nas redes 3G e LTE. Feito isso, três experimentos foram realizados, a partir dos quais foi possível: (a) selecionar os fatores críticos da pesquisa; (b) definir os níveis dos fatores que acarreta no melhor desempenho/consumo energético; e (c) encontrar essa mesma configuração quando a rede apresenta níveis elevados de perda de pacote e atraso.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A escassez de recursos computacionais é um problema que afeta tanto usuários quanto desenvolvedores de aplicações móveis (SATYANARAYANAN et al., 2009). Apesar de experimentar nos últimos anos uma evolução significativa em termos de capacidade computacional, as limitações de *hardware* (processamento, memória, armazenamento) de *smartphones* ainda são latentes quando confrontadas com as configurações de computadores *desktops* da mesma geração. Soma-se a isso o desejo de usuários de encontrar em seus "celulares inteligentes" aplicações com os mesmos níveis de complexidade das aplicações *desktops* (DINH et al., 2013). Assim, conciliar a portabilidade oferecida pelos dispositivos móveis com um nível de desempenho que permita prover a qualidade de experiência ao usuário é um grande desafio que vem sendo enfrentado por pesquisadores e fabricantes desses dispositivos ao longo dos anos.

A partir dos "celulares inteligentes", usuários aspiram acessar uma gama de serviços, tais como comércio, participar do mercado financeiro, educação e interações sociais. A indústria do entretenimento investe no provimento de serviço através da Internet que, consequentemente, converge para os dispositivos móveis. Um dos serviços de entretenimento muito explorado é o *streaming* de vídeo, tais como YouTube e Netflix, que são muito acessados a partir de *smartphones*.

Grande parte desses serviços, com objetivo de ocasionar uma grande satisfação ao usuário através do fornecimento de vídeo de alta qualidade (notadamente sem perdas de partes dele), usam o TCP como protocolo de transporte, garantindo a entrega confiável de dados, isto é, que

os dados perdidos durante uma transmissão serão reenviados. Não obstante, o TCP não foi planejado sob a preocupação com o desempenho, de modo que o tempo de transferência do vídeo do servidor ao cliente móvel, por não permitir que nenhum dado seja perdido, pode ser relativamente elevado, a provocar uma baixa qualidade de experiência.

*Streaming* de vídeo também tem impacto significativo sobre o consumo de energia do equipamento do qual ele é acessado. Isto posto, o emprego de *smartphones* para recebimento e reprodução de vídeo depara-se com o obstáculo da baixa capacidade das baterias em armazenar energia. Por consequência, esse componente é um gargalo para o uso de *streaming* de vídeo em *smartphones*, uma vez que a autonomia energética e, consequentemente, a satisfação do usuário são comprometidas.

Adicionalmente, a degradação do desempenho pode agravar a questão energética, uma vez que a demora no tempo de *download* e reprodução do vídeo representa o uso demasiado da tela do dispositivo, que é um dos componentes que mais consome energia. Desse modo, uma investigação acerca do relacionamento entre desempenho e consumo de energia é justificável, uma vez que mudanças de níveis de parâmetros podem representar uma diferença do funcionamento de alguns componentes do dispositivo, exigindo maior quantidade de energia. O estudo de HUANG et al. (2012) mostra que a mudança de tecnologia de rede para o LTE provoca melhores níveis de desempenho, mas apresenta maior consumo de energia. Portanto, o estudo detalhado do relacionamento entre essas duas métricas é importante para encontrar a melhor solução de forma a potencializar o nível de satisfação do usuário de *smartphone*.

## 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar a influência de parâmetros TCP/IP no desempenho e no consumo de energia em um dispositivo *smartphone* baseado em Android, considerando diferentes tecnologias de redes de dados móveis, largura de banda e configuração de parâmetros TCP, incluindo extensões para alto desempenho. Para alcançá-lo, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- estimar o desempenho do *smartphone* durante o recebimento de um vídeo, considerando diversos cenários de configurações de parâmetros TCP/IP;
- encontrar os fatores críticos para o desempenho do *smartphone* Android na operação de recebimento do vídeo;
- determinar a influência dos fatores TCP/IP no desempenho e no consumo de energia dentre os fatores críticos avaliados;
- indicar a melhor configuração de parâmetros TCP/IP para as métricas de desempenho e consumo de energia, avaliando-as separada e conjuntamente;

- avaliar a influência dos parâmetros TCP/IP no desempenho e consumo de energia em condições adversas da rede.

## 1.4 TRABALHOS RELACIONADOS

Nos últimos anos, alguns autores têm trabalhado no sentido de avaliar dispositivos móveis e redes com relação a desempenho e consumo de energia, incluindo a influência dos parâmetros configuráveis do TCP. Entretanto, poucos trabalhos avaliaram o consumo de energia e o desempenho, levando em conta as redes móveis e os parâmetros do TCP, concomitantemente.

A pouca capacidade de provimento de energia das baterias é contrastante com a evolução do *hardware* dos dispositivos móveis e da complexidade de aplicações hoje utilizadas. Com o objetivo de entender o alto consumo energético, atenuar essa disparidade e encontrar um melhor uso da energia, vários autores exploram profundamente esse campo de pesquisa, e com isso as tecnologias de dados móveis são bem exploradas nessas pesquisas.

HUANG et al. (2012) investigam o consumo de energia em tecnologias de rede Wi-Fi, 3G e LTE. Os experimentos foram realizados usando uma aplicação Android e os resultados demonstram que LTE apresenta melhor desempenho quando comparado com outras redes móveis. Entretanto, esta rede é menos eficiente em termos energéticos, se comparada com Wi-Fi e 3G. De forma similar, ARAS; GNIADY (2016) comprovaram que o uso de LTE requer mais energia que outras redes, como 3G e 2G. Para chegar a tal resultado, eles propõem um mecanismo que se adapta dinamicamente à largura de banda e ao estado do sistema, a alternar entre LTE, 3G e 2G, a fim de decrementar o consumo energético sem que isso provoque perda de desempenho. Seus resultados demonstram que o uso desse mecanismo pode significar uma economia de até 10% da energia. DENG; BALAKRISHNAN (2012) propõem uma técnica para reduzir o consumo de energia sem degradar o desempenho de aplicações mudando dinamicamente o estado das interfaces das redes. Os resultados obtidos mostram uma economia de energia significativa, uma vez que grande parte da energia é consumida desnecessariamente, mantendo o rádio do dispositivo móvel no modo "Ativo", mesmo quando não há tráfego.

Os serviços de *streaming* multimídia (por exemplo, *streaming* de vídeo) é uma importante fonte de consumo de energia e utilização de recurso de *hardware* em dispositivo móvel. Em STOCKHAMMER; LUBY (2012), os autores fornecem uma visão geral dos desafios para o uso de *streaming* de vídeo em dispositivos móveis relacionados à largura de banda da rede e o consumo de energia desses dispositivos quando conectados a redes 3G e LTE. BEZERRA et al. (2017) avaliam *streaming* de vídeo adaptativo em um *smartphone*, levando em consideração o consumo de energia. Seus resultados indicam que a qualidade de vídeo, a largura de banda e a tecnologia de rede adotadas têm grande impacto no consumo de energia, bem como algumas interações desses fatores. Além disso, demonstram que o uso da rede LTE e baixa largura de banda são responsáveis pelo maior consumo de energia.

A respeito de extensões do TCP para alto desempenho, YUE et al. (2012) avaliam suas

**Tabela 1:** Comparação entre este trabalho e trabalhos relacionados

| Autores                        | Avaliação de desempenho | Consumo de energia | Largura de banda | Tecnologias de rede | Parâmetros TCP |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------|---------------------|----------------|
| HUANG et al. (2012)            | ✓                       | ✓                  | -                | Wi-Fi, 3G e LTE     | -              |
| ARAS; GNIADY (2016)            | ✓                       | ✓                  | ✓                | 2G, 3G e LTE        | -              |
| DENG; BALAKRISHNAN (2012)      | ✓                       | ✓                  | -                | 3G e LTE            | -              |
| STOCKHAMMER; LUBY (2012)       | ✓                       | ✓                  | ✓                | 3G e LTE            | -              |
| BEZERRA et al. (2017)          | -                       | ✓                  | ✓                | Wi-Fi, 3G e LTE     | -              |
| YUE et al. (2012)              | ✓                       | -                  | ✓                | Ethernet            | ✓              |
| MIKI; YAMAGUCHI; OGUCHI (2011) | ✓                       | -                  | -                | Wi-Fi               | ✓              |
| SANADHYA; SIVAKUMAR (2014)     | ✓                       | -                  | ✓                | Wi-Fi e 3G          | -              |

influências considerando a vazão e o RTT como métricas de interesse. Seus resultados indicam que os algoritmos HSTCP, HTCP, STCP, BIC TCP e CUBIC TCP apresentam desempenho de transmissão relativamente melhor e, quanto à equidade intraprotocolo, TCP Reno, HSTCP, HTCP e STCP apresentaram bons resultados quando o número de fluxos paralelos é inferior a quatro. MIKI; YAMAGUCHI; OGUCHI (2011) avaliam o desempenho de dispositivos móveis considerando algoritmos de controle de congestionamento como o fator principal na experimentação. Os resultados encontrados pelos autores indicam que Cubic e Reno têm desempenho semelhantes quanto a métrica da vazão. SANADHYA; SIVAKUMAR (2014) propõem um algoritmo de controle de fluxo adaptativo (AFC) para o TCP, o qual depende do espaço de *buffer* e tamanho de janela disponíveis. Os autores demonstram, através de simulação, que AFC pode prover melhor nível de performance que o controle de fluxo usado pelo TCP.

A Tabela 1 sumariza as pesquisas mencionados anteriormente, considerando os parâmetros de relevância estabelecidos neste trabalho. Na literatura é possível encontrar muitos trabalhos relacionados ao desempenho e consumo de energia em dispositivos móveis e diferentes tipos de redes e largura de banda são avaliados. Não obstante, não é comum encontrar trabalhos que relacionam essas métricas com modificações nos parâmetros do protocolo TCP em dispositivos móveis.

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 introduz os conceitos que norteiam esta pesquisa. A busca a melhor compreensão do trabalho, são abordados os conceitos da transmissão confiável de dados e o protocolo TCP, com foco em seus parâmetros configuráveis, notadamente as extensões para alto desempenho. Em seguida, a avaliação de desempenho é explorada, seguida pela explicação acerca de projeto de experimento, a destacar seus diferentes tipos, análise de variância e desejabilidade.

O Capítulo 3 mostra a metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente ele descreve a metodologia em linhas gerais e, em seguida, explora o processo do planejamento de experimentos, com destaque para o tipo utilizado, a estrutura de associação e os tratamentos definidos para os experimentos. Em seguida, há o detalhamento do ambiente de experimentação, com destaque para os *softwares* e equipamentos utilizados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos três experimentos. Neste capítulo é investigado

o impacto de cada fator nas métricas de desempenho e consumo de energia, o melhor nível para cada fator e define a configuração de níveis dos fatores para cada métrica. Finalmente, é obtida a configuração de níveis de fatores que apresenta o melhor nível de desejabilidade para o usuário de *smartphone*, considerando ambas as métricas adotadas.

Finalmente, o Capítulo 5 conclui este trabalho, apresentando as principais contribuições e sugerindo trabalhos futuros.

# 2

## REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais que norteiam esta dissertação, de forma a possibilitar o melhor entendimento dela. Inicialmente, são abordados os conceitos de transmissão confiável, estendendo-se ao protocolo de transporte TCP, notadamente às extensões para alto desempenho, que são estudadas neste trabalho. Posteriormente, são mostrados os conceitos de avaliação de desempenho. Por último, são introduzidos os conceitos inerentes ao planejamento de experimentos, destacando os tipos de planejamento fatorial e a situação ao qual cada um deve ser usado.

### 2.1 TCP E TRANSFERÊNCIA CONFIÁVEL DE DADOS

A implementação da transmissão confiável de dados tem como objetivo fornecer uma visão das camadas superiores de um canal confiável pelo qual os dados podem ser transmitidos, o que é essencial para muitas aplicações atuais. Nessas condições, a camada de transporte deve implementar mecanismos que solucionem problemas como dados entregues ao cliente de forma corrompida, perdidos durante a transmissão ou fora da ordem em que foram enviados, mesmo que as camadas inferiores não forneçam essa garantia. Dentro desse contexto, o TCP, definido no RFC 793 (POSTAL, 1981), é o protocolo que implementa as características acima descritas e é usado na maior parte dos dados transmitidos através da Internet.

O TCP é o protocolo de transporte orientado para conexão, fim-a-fim, fornecendo transporte confiável de dados sobre o Protocolo de Internet – Internet Protocol - IP –, o protocolo da camada de rede que trabalha no melhor esforço e sem se preocupar com a garantia de entrega dos dados. Uma conexão TCP é *full-duplex*, que implementa mecanismo de controle de erro, recuperação de pacotes perdidos e adequação ao congestionamento da rede, adaptando a taxa de transmissão de acordo com a carga presente nela, isto, o tráfego (HOURS; BIERSECK; LOISEAU, 2016). Ela possibilita que dois hospedeiros troquem dados através do envio e recebimento de pacotes chamados de segmentos. A estrutura de um segmento TCP é formada pelos dados da aplicação e pelo cabeçalho, que contém elementos necessários à garantia de entrega confiável dos dados. A Figura 1 contém a estrutura do protocolo, e a descrição de cada

campo é apresentada a seguir (KUROSE; ROSS, 2012):

|                          |  |           |  |  |     |     |                  |     |                              |     |                    |  |  |
|--------------------------|--|-----------|--|--|-----|-----|------------------|-----|------------------------------|-----|--------------------|--|--|
| PORTA DE ORIGEM          |  |           |  |  |     |     | PORTA DE DESTINO |     |                              |     |                    |  |  |
| NÚMERO DE SEQUÊNCIA      |  |           |  |  |     |     |                  |     |                              |     |                    |  |  |
| NÚMERO DE RECONHECIMENTO |  |           |  |  |     |     |                  |     |                              |     |                    |  |  |
| COMP. DO CABEÇALHO       |  | RESERVADO |  |  | URG | ACK | PSH              | RST | SYN                          | FIN | JANELA DE RECEPÇÃO |  |  |
| VALOR DE VERIFICAÇÃO     |  |           |  |  |     |     |                  |     | PONTEIRO PARA DADOS URGENTES |     |                    |  |  |
| OPÇÕES                   |  |           |  |  |     |     |                  |     |                              |     |                    |  |  |
| DADOS                    |  |           |  |  |     |     |                  |     |                              |     |                    |  |  |

**Figura 1:** Estrutura do segmento TCP

Fonte: KUROSE; ROSS (2012).

- Porta de origem e porta de destino: são campos de 16 *bits* que representam, respectivamente, as portas de origem e destino dos hospedeiros envolvidos na transmissão do segmento.
- Número de sequência: campo de 32 *bits* usado pelo TCP, juntamente com o número de reconhecimento, para prover a transferência confiável de dados. O número de sequência é o número do primeiro *byte* daquele segmento.
- Número de reconhecimento: campo de 32 *bits* que, assim, como o número de sequência, é usado para garantir a entrega de dados à outra ponta da conexão. O número de reconhecimento presente em um segmento enviado de um hospedeiro A a um hospedeiro B é o número de sequência do próximo *byte* que A espera receber de B.
- Tamanho do cabeçalho: campo de 4 *bits* que especifica o tamanho do cabeçalho TCP em palavras de 32 *bits*.
- *Flags*: campo de 6 *bits* usado para definir os valores das *flags*. O *bit* ACK é usado para informar se o valor carregado no campo de reconhecimento é válido, isto é, se está reconhecendo um segmento enviado anteriormente a ele. Os bits SYN, FIN e RST são usados, respectivamente, para iniciar, encerrar e reiniciar uma conexão. Já o *bit* PSH informa ao destinatário que os dados daquele pacote devem ser imediatamente repassados à aplicação, enquanto o *bit* URG informa que há dados nos segmentos marcados como urgentes pela aplicação.



- Janela de recepção: é um campo de 16 *bits* usado para controle de fluxo, indicando a quantidade máxima de *bytes* que um destinatário está disposto a aceitar.
- Valor de verificação: campo de 16 *bits* que detecta erro de *bit* para o segmento TCP.
- Ponteiro para dados urgentes: campo de 16 *bits* que indica a posição do último *bytes* de dados urgentes.
- Opções: campo de tamanho variado (limitado a 32 *bits*), projetado para fornecer situações não cobertas pelo cabeçalho normal. As extensões para alto desempenho do TCP normalmente usam este campo para a transmissão de *bits* relativos a elas.

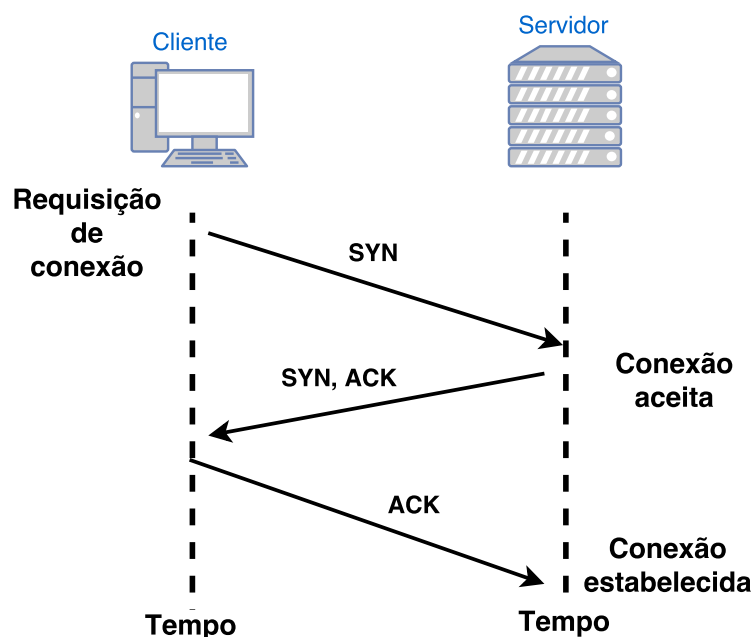
### 2.1.1 Estabelecimento de Conexão

Usando o TCP, aplicações de hospedeiros podem criar uma conexão entre eles, a partir da qual podem enviar dados entre si. Dado que as conexões devem ser estabelecidas entre dois processos sobre o sistema de comunicação não confiável provido pelo protocolo de rede IP, o TCP usa um mecanismo de apresentação prévia antes da transferência de quaisquer dados úteis à aplicação (KULKARNI; AGRAWAL et al., 2014). Esse mecanismo consiste no envio de três segmentos TCP especiais, o que permite aos sistemas finais inicializar e manter certas informações de status para a conexão.

Inicialmente, o hospedeiro cliente envia um segmento especial ao hospedeiro servidor, não contendo nenhum dado útil. Nesse segmento, a *flag* SYN está ativada (valor igual a 1) e um número de sequência qualquer indica a intenção do cliente em iniciar a comunicação. Após esse contato, o servidor, caso o estabelecimento da conexão seja possível, envia ao cliente um segmento também sem nenhum dado útil, mas com as *flags* SYN e ACK ativadas e o campo de número de reconhecimento com o valor do número de sequência recebido mais um, indicando que espera receber a próxima sequência de dados. Em um terceiro momento, o cliente, ao receber o pacote SYN-ACK, encaminha ao servidor um novo pacote, este apenas com a *flag* ACK ativada e com o número de sequência igual ao número de reconhecimento do pacote SYN-ACK recebido mais a quantidade de *bytes* que envia neste pacote (que pode ser 0). Esse processo de estabelecimento de comunicação a partir da troca de três segmentos recebe o nome de apresentação de três vias, ou *3-way-handshake* (KUROSE; ROSS, 2012), e é representado na Figura 2.

Uma vez estabelecida a conexão, dois processos podem trocar mensagens entre si, podendo, por exemplo, o processo do lado do servidor querer fazer o envio de uma cadeia de dados para o processo do lado do cliente. Para isso, a aplicação passa os dados pelo *socket* ao TCP, que o armazena em um *buffer* de envio que foi reservado durante o estabelecimento da conexão. A partir desse *buffer*, os dados são retirados, adicionados a segmentos TCP (com o cabeçalho do protocolo) e encaminhados à camada inferior para que possam ser enviados ao destino. Do lado cliente, quando TCP recebe um segmento, os dados da aplicação são colocados

no *buffer* de recepção reservado para a conexão, de onde são, posteriormente, encaminhados à aplicação KUROSE; ROSS (2012). A Figura 3 mostra esse processo.



**Figura 2:** Apresentação de três vias: troca de segmentos  
Fonte: KUROSE; ROSS (2012).

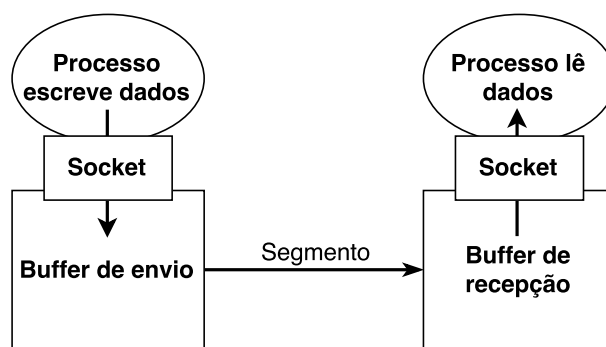
### 2.1.2 Reconhecimento de Dados Recebidos

Após a conexão ser estabelecida, os *bytes* transmitidos de um hospedeiro A (por exemplo, um cliente) a um hospedeiro B (o servidor) precisam ser reconhecido por este, comunicando àquele tal recebimento. Para isso, usa um segmento com a *flag* ACK ativada e o número de reconhecimento igual ao último *byte* recebido somado um, indicando o correto recebimento dos dados e que espera receber o próximo conjunto de dados iniciado por esse valor. Além disso, esse reconhecimento pode ser feito não apenas em segmentos que tenham essa função como único propósito, mas também em segmentos que transportem dados úteis à aplicação do outro lado da conexão. Essa estratégia é chamada de reconhecimento positivo (KULKARNI; AGRAWAL et al., 2014).

Supondo que para cada segmento recebido fosse necessário o envio de um segmento do tipo ACK (reconhecimento), é fácil perceber que haveria diversos problemas de desempenho da aplicação. Ao receber um segmento com dados da aplicação, um hospedeiro A precisaria, necessariamente, comunicar tal recebimento ao hospedeiro B, ao passo que este esperaria a confirmação do recebimento para encaminhar a próxima sequência de *bytes*, deixando o meio de transmissão no sentido de A para B ocioso. Além disso, o reconhecimento enviado por B poderia demorar, seja por se perder na rede ou por problema de congestionamento, de forma que A não poderia enviar o próximo segmento, tornando o recebimento dos dados em B muito lento.

Entretanto, TCP contorna isso fazendo uso de uma técnica denominada reconhecimento cumulativo. Esse reconhecimento consiste em um dado que um hospedeiro envia com a *flag* ACK definida e número de reconhecimento igual a  $N$ , ele reconhece também ter recebido corretamente todos segmentos com número de sequência menores que  $N$  (KUROSE; ROSS, 2012). Assim, o hospedeiro que envia dados à aplicação do outro lado da conexão não precisa receber a confirmação para cada segmento, podendo enviar diversos deles consecutivamente, até preencher a janela do receptor.

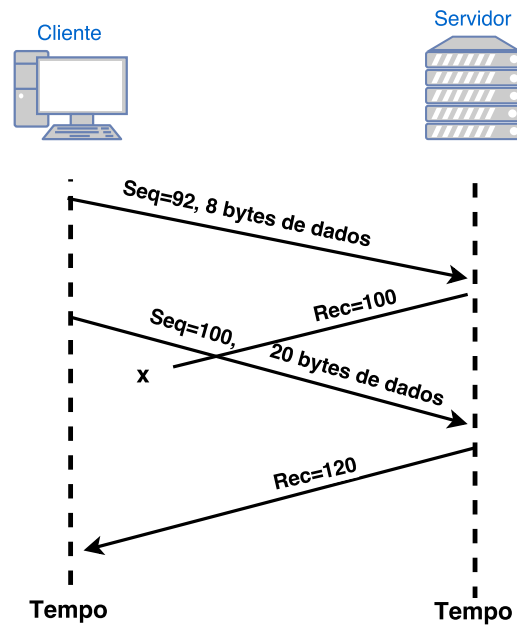
A Figura 4 exemplifica essa estratégia de reconhecimento. Nela, o segmento com número de sequência 92 e oito *bytes* de dados da aplicação é enviado pelo hospedeiro cliente ao hospedeiro servidor, chegando ao seu destino corretamente. Em contrapartida, o segmento de reconhecimento, isto é, com número de reconhecimento igual a 100, é perdido, de forma que não pôde cumprir seu objetivo. Entretanto, o cliente não precisa esperar por esse reconhecimento para enviar o próximo segmento que, após ser recebido no destino, é reconhecido com o envio com sucesso do segmento com número de reconhecimento igual a 120.



**Figura 3:** *Buffers* TCP de envio e de recepção  
Fonte: KUROSE; ROSS (2012).

### 2.1.3 Desempenho do TCP

Das características mencionadas, pode-se observar que o TCP foi projetado para operar de forma confiável sobre quase todos os meios de transmissão – principalmente sobre o protocolo IP – independentemente da taxa de transmissão, atraso, corrupção de pacotes ou quaisquer outras anomalias que a rede possa enfrentar. Não obstante, TCP pode enfrentar problemas de desempenho, pois os avanços na tecnologia de redes e, conseqüentemente, as altas velocidades de transmissão, estão bem além do domínio para o qual o TCP foi originalmente projetado (BORMAN; SCHEFFENEGGER; JACOBSON, 2014). Portanto, as primeiras versões do TCP não focavam em desempenho, um requisito essencial para muitos dos serviços de atuais em rede, o que é um problema, por exemplo, para os dispositivos móveis, nos quais as aplicações podem experimentar baixo desempenho, mesmo operando em redes que ofereçam altas taxas de transmissão. A seguir, são destacados os parâmetros configuráveis do TCP considerados neste trabalho (os quais alguns pertencem ao conjunto de extensões para alto



**Figura 4:** Exemplo de reconhecimento cumulativo

desempenho) e um parâmetro relacionado à interface de rede.

O reconhecimento cumulativo, mostrado na Figura 4 é capaz de melhorar o desempenho se comparado com um mecanismo de reconhecimento a cada segmento de dados da aplicação recebidos. Entretanto, ele apresenta um problema que pode afetar severamente o desempenho, podendo interpretar erroneamente segmentos de reconhecimento, causando retransmissões desnecessárias de dados já recebidos fora da ordem (LUDWIG; KATZ, 2000).

A título de exemplificação, a Figura 5 apresenta uma situação hipotética em que a estratégia de reconhecimento cumulativo não permitiria o uso eficiente do fluxo entre os dois hospedeiros, gerando retransmissões desnecessárias. No exemplo, cinco segmentos de tamanho *20 bytes* são transmitidos do servidor ao cliente, mas o segundo segmento se perde na rede. Como o reconhecimento cumulativo é incapaz de lidar com dados não contínuos, o segmento de reconhecimento enviado pelo cliente ao servidor reconhece apenas até o momento em que não há perdas, ou seja, o primeiro segmento. Essa informação, ao chegar ao servidor, é interpretada como se o segundo, o terceiro, o quarto e o quinto segmentos tivessem sido perdidos e, conseqüentemente, são retransmitidos desnecessariamente.

O Selective Acknowledgment - SACK é uma extensão para alto desempenho do TCP (BORMAN; SCHEFFENEGGER; JACOBSON, 2014) negociado durante o estabelecimento da conexão. No segmento SYN, o requerente sinaliza, usando o campo *Options* do TCP, que está apto a usar esse mecanismo, o que é feito também pelo outro hospedeiro no segmento SYN-ACK. Após o estabelecimento da conexão, quando ocorre a situação de que dados não contínuos chegaram a um destino, este envia um segmento de reconhecimento para informar o recebimento do valor do *byte* mais alto entre os dados contínuos e no campo *Options* é sinalizado outro intervalo de dados (superior ao contido no número de reconhecimento) que

foram reconhecidos. No exemplo ilustrado da Figura 5, utilizando SACK, o segmento enviado do cliente ao servidor conteria o número de reconhecimento igual a 20 e no campo de opções, uma sinalização SACK informaria o intervalo (40 - 100).

Dessa forma, usando SACK, o receptor de dados pode informar ao remetente sobre todos os segmentos que chegaram com sucesso, de modo que este precisa retransmitir apenas aqueles que foram perdidos, isto é, o remetente apenas retransmite partes específicas da janela TCP que perderam dados (e não toda a janela como em versões mais antigas) (ANDREASSON, 2002).

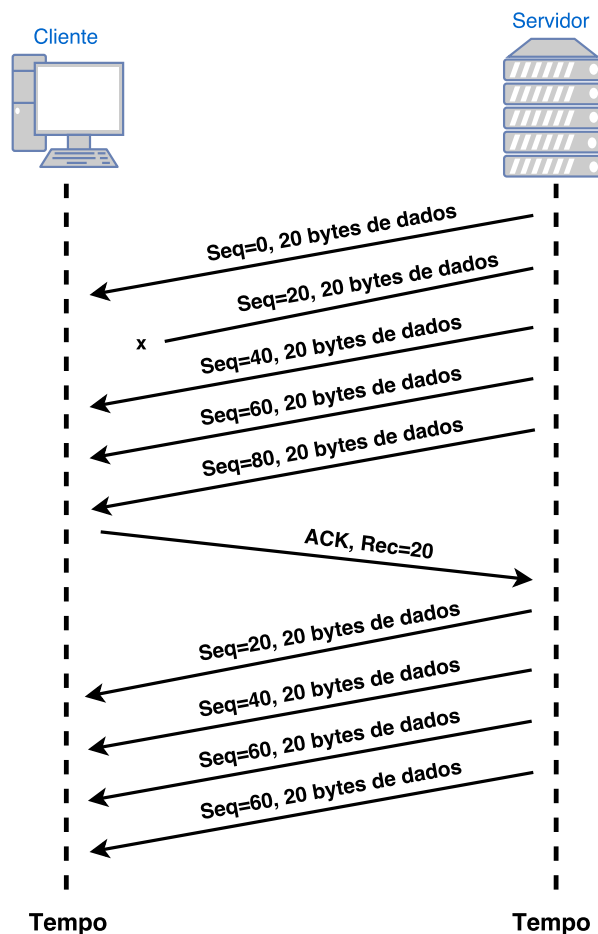


Figura 5: Reconhecimento de dados com o reconhecimento seletivo

O RFC 7323 também apresenta uma extensão para alto desempenho que diz respeito ao tamanho da janela. Dado que, pelo princípio do reconhecimento cumulativo, um segmento contendo dados da aplicação pode ser enviado ao destinatário mesmo que o anterior não tenha sido reconhecido, existe um limite para quantidade de dados a serem transmitidos sequencialmente. Ocorre que, quando um segmento é enviado, o emissor comunica ao outro lado da conexão a quantidade de dados que ele ainda aceita, ou seja, a quantidade livre de sua janela de recepção, utilizando o campo **janela de recepção** do protocolo. Entretanto, esse é um campo de 16 *bits*, de forma que o tamanho da janela é igual a  $2^{16}$  bytes (ou 65KB), e isso pode ter efeito no desempenho de dispositivos móveis. A opção de escalonamento da janela (*Window scaling*) é negociada no estabelecimento da conexão, informando um fator de multiplicação  $f$ , de forma

que o tamanho da janela passa a ser dado por  $2^{16+f}$ , podendo aproveitar melhor a largura de banda oferecida pela rede (ANDREASSON, 2002)

Outras extensões que podem impactar no desempenho do TCP são as opções de baixa latência (*low latency*) e *timestamps*. Este é um mecanismo que possibilita que hospedeiros estimem o RTT de uma forma melhor que através do método de *timeout* de retransmissão (RTO) (BORMAN; SCHEFFENEGGER; JACOBSON, 2014). Já aquele, quando definido como 1, o TCP prefere adota menor latência em relação à maior vazão (LINUX KERNEL DOCUMENTATION).

Os algoritmos de controle de congestionamento, apesar de não pertencerem ao conjunto de extensão para alto desempenho, têm sido estudados no sentido desse tipo de avaliação. Esses algoritmos, também chamados de versão do TCP, foram desenvolvidos com objetivo de melhor lidar com o congestionamento e as opções Cubic e Reno são largamente usadas. O Cubic é o algoritmo padrão para controle de congestionamento em alguns sistemas operacionais, tais como Linux e Android. Ele tem como objetivo melhorar a escalabilidade do TCP, focando na utilização justa da largura de banda (devido ao aumento da janela seguir uma função cúbica) (ABDELJAOUAD et al., 2010).

Outro parâmetro configurável que pode representar mudanças do desempenho do TCP em um hospedeiro é o tamanho do *buffer* de recepção. Sua configuração dá-se a partir da escolha de três valores que representam as quantidades mínima, padrão e máxima que podem ser alocadas para cada conexão TCP (ANDREASSON, 2002). Já o parâmetro *netdev\_max\_backlog*, apesar de não pertencer ao TCP, pode representar algum efeito no seu desempenho, uma vez que lida diretamente com a interface de rede. Ele representa o número máximo de pacotes que podem ser mantidos na fila de uma interface de rede, quando esta recebe pacotes mais rapidamente do que *kernel* pode processar (LINUX KERNEL DOCUMENTATION). Mais especificamente, esse parâmetro especifica a quantidade de pacotes recebidos e não processados antes que o *kernel* comece a recusá-los.

## 2.2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

O desempenho é um critério altamente relevante nos processos de concepção, aquisição e uso de sistemas computacionais. Quando da concepção desses produtos, os provedores esperam encontrar o melhor desempenho dada uma restrição de custo, o que pode ser averiguado a partir da realização de uma avaliação de desempenho. Para que uma avaliação de desempenho seja realizada, é necessário que o avaliador possua conhecimentos profundos do sistema, saiba escolher cuidadosamente a metodologia de avaliação, da carga de trabalho e das ferramentas aplicadas (JAIN, 1990).

A avaliação de desempenho de sistemas computacionais tem como objetivo verificar o comportamento do sistema de acordo com métricas de desempenho estabelecidas, identificar gargalos e propor melhorias (JAIN, 1990). LILJA (2004) apresenta uma lista de objetivos para a

avaliação de desempenho:

- Comparar alternativas: refere-se à quantidade de sistemas disponíveis quando da aquisição, bem como alternativas de configuração que podem afetar o desempenho de um sistema específico;
- Determinar o impacto de uma característica: quando se deseja fazer uma mudança no sistema, é necessário avaliar o impacto dessa nova característica adotada;
- Ajuste do sistema: abordagem utilizada para encontrar a combinação de parâmetros do sistema que permite obter seu melhor desempenho na métrica de interesse;
- Identificar o desempenho relativo: a avaliação de desempenho de um sistema consiste em confrontar os resultados das métricas desse sistema com outros sistemas ou com ele mesmo em diferentes configurações;
- Definir expectativas: é a percepção das capacidades de uma próxima linha de sistemas de computadores.

Para atingir tais objetivos, utiliza-se técnicas que são classificadas em: baseadas em medição e baseadas em modelagem. Esta, por sua vez, é classificada como técnica analítica e baseada em simulação (LILJA, 2004). A escolha da técnica adequada é fase primordial para alcançar os objetivos da avaliação.

A técnica simulação baseia-se em modelos abstratos do sistema, podendo-se omitir algumas de suas características, como questões de acessibilidade aos dados reais, ao passo que o controle dos parâmetros do sistema é mais viável quando comparado com o processo de medição. Essa técnica pode ser adotada tanto na avaliação de desempenho quanto na validação de modelos analíticos. Na modelagem analítica são utilizadas fórmulas fechadas ou conjuntos de equações para representar o comportamento do sistema, em que os parâmetros dessas equações são os fatores do sistema e as soluções representam o meio para atingir as métricas de interesse (SOUSA, 2009). As soluções analíticas são aquelas em que os modelos representam espaço de estados.

De acordo com SOUSA (2009), a técnica de medição consiste na observação do sistema sob determinada carga de trabalho, a qual deve ser selecionada de forma cuidadosa, podendo ser gerada a partir de dados reais ou usando mecanismos que provocam cargas de trabalho sintéticas. Submeter o sistema a uma avaliação utilizando a carga real parece ser uma boa escolha por representar, fielmente, o sistema, mas situações indesejadas como perturbações e dificuldade de acessibilidade dos dados torna essa opção pouco desejável. Por isso, alguns mecanismos são usados para a geração de carga de trabalho, como programas sintéticos e *benchmarks* (LILJA, 2004).

De acordo com KOZIOLEK (2010), há várias abordagens para avaliação de desempenho, como as métricas *response time* (tempo de resposta), *throughput* (vazão) e utilização dos componentes do sistema. Segundo BOLCH et al. (2006), tem-se que primeiro é o

tempo total que uma tarefa espera na fila do sistema, isto é, a soma do tempo de espera e o tempo de serviço. A utilização é a razão entre o tempo de serviço e o tempo entre chegadas de solicitação no sistema. Essa métrica pode ser entendida ainda como a razão entre o tempo total de todos os serviços e o tempo total observado de um recurso/sistema. Já a vazão é dada pela razão entre a quantidade de tarefas executadas e o tempo total observado.

## 2.3 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

Quando se deseja estudar o comportamento de variáveis em um sistema, isto é, a influência de sua variação, é necessário realizar experimentos. Para tanto, deve-se escolher, de acordo com a conveniência, os níveis das variáveis e selecionar as combinações desses níveis para experimentação. O planejamento de experimentos – Design of Experiments - DoE – é uma técnica que permite, de posse de variáveis e seus níveis, planejar experimentos, determinando os tratamentos a serem testados.

De acordo com JAIN (1990), o objetivo de um planejamento experimental proposto é obter o máximo de informações com o número mínimo de experimentos. Para isso, são feitas mudanças nos fatores envolvidos com o propósito de observar e identificar mudanças com efeitos na(s) variável(is) de saída. Um bom planejamento de experimento pode ajudar a ter a melhor orientação na hora de escolher quais experimentos realmente são relevantes e, conseqüentemente, quais precisam ser executados (LILJA, 2004). A partir da análise desses experimentos, é possível determinar as variáveis que exercem maior influência em uma métrica de desempenho, como se o fator observado é significativo ou se tem origem em variações aleatórias causadas por erros de medições ou variáveis não controladas (JAIN, 1990).

### 2.3.1 Conceitos

Em se tratando de planejamento de experimentos, o conhecimento de alguns termos é essencial para o entendimento do assunto. Além disso, esses conceitos são frequentemente usados nas demais partes deste documento.

Em um DoE, os **fatores** são os parâmetros ou variáveis de entrada e as considerações estruturais que se deseja observar durante o experimento. Eles são, durante o processo de experimentação, variados para que se possa verificar as suas influências nos resultados. Esses fatores não são mantidos de forma constante durante a experimentação, alternando-se em, no mínimo, dois valores ou **níveis**. Assim, os níveis representam os valores ou condições que um fator pode assumir durante o experimento e podem ter valores qualitativos ou quantitativos. Esses assumem valores numéricos enquanto aqueles representam considerações estruturais não quantificáveis.

Num **projeto de experimento** os níveis são identificados como inferior (-1) e superior (+1), em que o primeiro geralmente é o menor valor quando se trata de fatores quantitativos. A



escolha dos fatores e níveis é uma etapa importante para o sucesso das atividades de planejamento e realização dos experimentos. Após suas definições, os níveis dos fatores são combinados, formando um conjunto arranjos de níveis de fatores. Cada uma dessas combinações é um **tratamento**, que são executados posteriormente numa corrida de execução.

O objetivo do experimento é avaliar a influência dos fatores numa métrica ou conjunto de métricas. Para isso, é necessário coletar os valores de saída para cada execução de um tratamento. Essa variável, comumente chamada de **variável de resposta**, é entendida como o resultado obtido a partir do experimento com uma configuração de níveis de fatores quanto a uma métrica de interesse para o estudo.

Após a realização dos experimentos, uma análise dos resultados permite definir o **efeito** de um dado fator na métrica de interesse. Segundo MONTGOMERY (2012), o efeito de um fator é definido como sendo a mudança na resposta produzida pela modificação realizada no nível do fator. Assim, um efeito (também chamado de efeito principal) é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível de um fator. Adicionalmente, a experimentação baseada na abordagem DoE permite estimar não apenas os efeitos principais, mas também os **efeitos de interações**.

Os efeitos de interações, segundo MONTGOMERY (2012), são as falhas de um fator em produzir o mesmo efeito em diferentes níveis de outro fator. Assim, enquanto o efeito principal representa a mudança do valor de saída influenciado exclusivamente pela mudança de nível de um fator isoladamente, o efeito de interação é dado quando o efeito da mudança de um nível depende do nível de outro fator.

O resultado do processo de planejamento de experimento tem como resultado um **projeto**. Um projeto experimental é o resultado de todas (ou uma fração) as possíveis combinações de níveis de fatores (isto é, tratamentos) e o número de repetições de cada experimento. Cada um dos tratamentos existentes no projeto pode ser executado uma ou várias vezes. A repetição de todos os experimentos ou parte deles recebe o nome de **replicação**. As combinações de níveis de fatores são mostradas usando (-1) e (+1) (ou apenas os sinais - e +) numa matriz denominada **matriz do planejamento**. Os projetos de experimentos podem ser de diversos tipos, a depender da perspectiva de observação que se deseja ter a partir da execução dos experimentos, e a subseção a seguir fornece uma explanação acerca desses tipos.

### 2.3.2 Tipos de Projetos Experimentais

Há três tipos de planejamento fatorial mais largamente utilizados, a citar, *Simple Design*, *Full Factorial Design* e *Fractional Factorial Design*, e a escolha do tipo a ser adotado depende da situação e do objetivo do experimento.

**Simple Design.** Um planejamento simples resulta num projeto no qual os tratamentos gerados denotam a variação de um fator por vez, a fim de verificar a influência de cada fator separadamente numa métrica (como o desempenho). Supondo-se, por exemplo, o planejamento a

partir da definição de três fatores (A, B, e C) com dois níveis (1 e 2) cada, os tratamentos gerados podem ser dados pelos seguintes níveis de fatores: (i) A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub> e C<sub>1</sub>; (ii) A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub> e C<sub>2</sub>; (iii) A<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> e C<sub>2</sub>; e (iv) A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub> e C<sub>2</sub>. Assim, todos os fatores foram variados em todos os níveis possíveis, embora algumas combinações não tenham sido contempladas (por exemplo, A<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> e C<sub>1</sub>).

A partir do exemplo acima, é possível expandir a definição para um projeto com  $k$  fatores e  $i$  níveis para cada fator. Dessa forma, a quantidade total de tratamentos  $n$  é dada na Equação 2.1, onde o  $i$ -ésimo fator tem a quantidade de níveis igual a  $n_i$ .

$$n = 1 + \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \quad (2.1)$$

Entretanto, por não abranger todas as possíveis combinações de níveis de fatores, esse tipo de projeto não é capaz de estimar as interações entre fatores, de forma que se o efeito de A depender do nível de B, a combinação ótima de fatores pode ser falha.

**Full Factorial Design.** Diferentemente do tipo de planejamento mostrado anteriormente, um projeto fatorial completo utiliza todos os tratamentos possíveis. Dessa forma, os resultados experimentais permitem estimar não apenas os efeitos primários (dos fatores), mas também os secundários (de interação entre fatores). Entretanto, esse tipo de abordagem é mais cara em ambos os sentidos, tempo e dinheiro, dado o número de experimentos necessários para estimar os efeitos. Caso seja necessário o uso de replicações, esse aumento de custo torna-se ainda mais evidente. De forma geral, dado uma quantidade  $k$  de fatores, com o  $i$ -ésimo fator tendo níveis  $n_i$ , a resolução desse projeto requer  $n$  experimentos, dado por:

$$n = \prod_{i=1}^k n_i \quad (2.2)$$

Da Equação 2.2, é possível observar que o número de fatores é multiplicado por  $n_i$  a cada vez que um fator com  $n_i$  níveis é acrescentando. Para reduzir o número de tratamentos, JAIN (1990) apresenta três formas que podem ser usadas: reduzir o número de níveis dos fator (preferencialmente para apenas dois níveis), reduzir o número de fatores e utilizar fatoriais fracionários. A seguir, os projetos com dois níveis e fracionários são descrito mais detalhadamente.

#### 2.3.2.1 Planejamento fatorial $2^k$

O planejamento fatorial completo de dois níveis é o tipo de planejamento em que apenas dois valores possíveis são considerados para cada fator, a partir do qual definem-se todas as combinações desses níveis de fatores.

De acordo com MONTGOMERY (2012), o planejamento  $2^k$  é particularmente útil nos primeiros estágios de um trabalho experimental, quando muitos fatores são escolhidos para serem avaliados, permitindo que  $k$  fatores sejam estudados mesmo com uma pequena quantidade de tratamentos (e consequentemente execuções). O autor salienta ainda que, por considerar apenas

dois níveis de cada fator, tem-se que supor que a resposta é aproximadamente linear dentro do intervalo entre fatores escolhidos.

Como exemplo ao afirmado acima, supondo-se que um fator  $A$  é do tipo numérico e os níveis 1 e 100 são considerados, os resultados estimados para os níveis apresentarão sempre uma reta ligando-os, mesmo que o efeito real desse fator não tenha esse comportamento. O número de tratamentos necessários para estimar os efeitos principais e de interações em um planejamento  $2^k$  é dado pela Equação 2.2, sendo  $n_i = 2$ .

Mesmo com a redução do número de experimentos sendo reduzido pelo uso do planejamento  $2^k$ , o número de experimentos é grande quando se considera um número elevado de fatores. Nessa situação, o planejamento fracionário é usado para selecionar apenas uma fração de combinações, com objetivo de identificar fatores críticos para a métrica de interesse.

### 2.3.2.2 Planejamento fatorial fracionário $2^{k-p}$

Em um planejamento fatorial  $2^k$ , o número de experimentos dobra a cada fator acrescentado no planejamento, de forma que, a depender do número de fatores levantados, o custo de experimentação pode ser proibitivamente alto.

Do exemplo apresentado por MONTGOMERY (2012), um planejamento  $2^6$  resulta em 64 tratamentos. Supondo quatro replicações para todos os experimentos, 256 execuções são necessárias para estimar os efeitos principais e de interações. Por outro lado, apenas 21 dos 63 graus de liberdade correspondem a efeitos principais ou de interações de dois fatores, o que é de interesse na maioria dos experimentos, enquanto os demais 42 graus de liberdade estão associados com interações de três ou mais fatores, as quais são geralmente bem pequenas.

Segundo MONTGOMERY; RUNGER (2010), se for possível assumir que certas interações de alta ordem sejam negligenciáveis, um planejamento fatorial fracionário envolvendo menos tratamentos que um conjunto completo  $2^k$  de execuções pode ser usado para obter informações dos efeitos principais e de interações de poucos fatores. Assim, o planejamento  $2^{k-p}$  proverá uma forma de estimar os efeitos mais importantes em um trabalho experimental usando uma fração do esforço computacional de um experimento baseado no planejamento  $2^k$ .

Dada a economia de recurso possibilitada por planejamento fatorial fracionário, ele é usado principalmente em experimentos do tipo *screening* (triagem ou seleção de fatores) (MONTGOMERY, 2012). Um experimento de triagem é feito geralmente nas fases iniciais da experimentação em que muitos fatores são considerados e o objetivo é identificar aqueles fatores que tem grande efeito, os quais são reexperimentados em fase posterior.

Os planejamentos fatoriais  $2^{k-p}$  são classificados em resoluções, a depender da fração de tratamentos considerada. MONTGOMERY; RUNGER (2010) conceituam resolução como uma forma útil de catalogar os planejamentos fatorial fracionários de acordo com o padrão de associações de fatores que ele produz. A resolução usada é denotada por um numeral subscrito, por exemplo, a fração um meio do planejamento  $2^3$  é um planejamento  $2_{III}^{3-1}$  MONTGOMERY (2012). As resoluções III, IV e V são detalhadas a seguir MONTGOMERY (2012):

- **Planejamento de resolução III:** nenhum efeito principal está associado com qualquer outro efeito principal, mas efeitos principais estão associados com interações de dois fatores e estas interações podem estar associadas entre si. O planejamento  $2_{III}^{3-1}$  é desse tipo de resolução.
- **Planejamento de resolução IV:** nesse tipo de planejamento, nenhum efeito principal é associado com qualquer outro efeito principal ou interação de dois fatores, mas interações de dois fatores podem estar associadas entre si. Como exemplo, o planejamento  $2_{IV}^{4-1}$  é de resolução IV.
- **Planejamento de resolução V:** são planejamentos em que nenhum efeito principal ou interação de dois fatores estão associados com qualquer outro efeito principal ou interação de dois fatores, mas interações de dois fatores são associadas com interações de três fatores como, por exemplo, o planejamento  $2_V^{5-1}$ .

### 2.3.3 Análise de Variância (ANOVA)

Comparar duas coisas é atividade rotineira para muitas pessoas. Muitas vezes, compara-se o desempenho de diversas coisas, como equipamentos, processos e ferramentas. Quando o objetivo é entre duas coisas, como dois programas executando uma mesma operação, usa-se a técnica de comparação. Entretanto, quando se quer comparar múltiplas ferramentas executando uma tarefa, usa-se a técnica análise de variância – Analysis of Variance - ANOVA.

A ANOVA é uma abordagem estatística utilizada para verificar se a variação no valor de uma variável de saída provocada pela mudança de nível de um fator é estatisticamente significativa. Assim, ANOVA testa a importância de um ou mais fatores comparando as médias das variáveis de resposta em diferentes níveis de fatores.

Para que a técnica ANOVA seja usada, assume-se que os erros do modelo sejam variáveis aleatórias distribuídas de forma normal e independentes com média zero e variância  $\sigma^2$  constante para todos os níveis dos fatores (MONTGOMERY, 2012). Ronald Fisher foi o responsável pelo desenvolvimento dessa técnica como ferramenta para a análise estatística de projetos experimentais.

No contexto de DoE, um modelo é gerado para a observação dos resultados dos experimentos. A representação desse modelo é dada pela Equação 2.3 (ESTATÍSTICA UFPE, 2009).

$$Y_i = \mu + \tau_i + \varepsilon_i \quad (2.3)$$

Em que:

$Y_i$  é a observação do  $i$ -ésimo tratamento;  $\mu$  é o efeito constante (também chamado de média dos resultados);  $\tau_i$  é o efeito principal do fator  $\tau$  no  $i$ -ésimo tratamento;  $\varepsilon_i$  é o erro associado ao  $i$ -ésimo tratamento.

Nessa equação, o valor de  $i$  varia entre 1 e  $I$ , em que  $I$  é o número de fatores do projeto. Usando ANOVA, testam-se as seguintes hipóteses:

$H_0$ : as médias de todos os tratamentos são iguais, ou seja,  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_I$ .

$H_1$ : ao menos uma média é diferente, isto é,  $\mu_i \neq \mu_{i'}$  para ao menos um par  $(i, i')$ , com  $i \neq i'$ .

Em que  $\mu_i = \mu + \tau_i$  para  $i = 1, 2, 3, \dots, I$ .

Assim, as hipóteses nulas e alternativas podem ser reescritas como se segue:

$H_0$ :  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_I = 0$ .

$H_1$ :  $\tau_i \neq 0$ , para ao menos um  $i$ .

Dessa forma, a veracidade da hipótese nula representa que todos os tratamentos têm a mesma média  $\mu$ .

### 2.3.4 Desejabilidade

O processo de planejamento de experimento consiste em definir um projeto de experimento, considerando os fatores  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_i$  (em que  $i$  representa a quantidade de fatores) e seus níveis. Os tratamentos resultados serão usados em posterior experimentação, processo no qual essas configurações de níveis de fatores são testadas e, durante esse processo, observa os resultados associados a uma variável de resposta ou a um conjunto delas, as quais podem ser denotas por  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_i$ , em que  $i$  é a quantidade delas.

Os resultados obtidos para uma mesma métrica a partir da execução de todos os tratamentos considerados no modelo possibilitam verificar se os fatores são impactantes na métrica através da ANOVA (Seção 2.3.3). Dado que há efeito estatisticamente significativo, a tabela de efeitos ou um gráfico de efeitos principais permite averiguar qual nível para um dado fator  $X_i$  teve melhor resultado na métrica.

Tomando isso em consideração, o processo de experimentação e análise tem, comumente, objetivo geral de otimizar uma ou o conjunto de variáveis de resposta, isto é, encontrar a configuração de níveis que produza o resultado mais satisfatório do ponto de vista de uma métrica específica ou a composição delas.

Quando se deseja otimizar múltiplas respostas, pode-se usar a técnica de otimização simultânea popularizada por DERRINGER; SUICH (1980), a qual faz uso de funções de desejabilidade. Essa abordagem converte, inicialmente, cada resposta  $Y_i$  em uma função de desejabilidade individual  $d_i$ , como mostrado na desigualdade a seguir (MONTGOMERY, 2012):

$$0 \leq d_i \leq 1$$

na qual  $d_i$  varia num intervalo  $[0, 1]$ , em que a desejabilidade tende a 0 quando a pior configuração é escolhida, enquanto 1 representa o caso ideal.

Caso a resposta tenha limites inferior e superior (LI e LS) para a resposta  $Y$  e o alvo  $A$  é maximizar o seu valor, então a desejabilidade individual pode ser dada pela equação a seguir:

$$d = \left( \frac{y - LI}{A - LI} \right)^r$$

quando  $LI \leq d \leq A$ ; em caso de  $Y < LI$ ,  $d$  será igual a 0 e; quando  $Y > A$ ,  $d$  atingirá o valor 1 (caso ideal).

Na equação acima,  $r$  representa o peso associado à taxa de variação da desejabilidade e quando igual a 1 indica que a função de desejabilidade é linear,  $r > 1$  mostra maior ênfase no valor alvo, e  $0 < r < 1$  aponta a menor importância ao alvo (MONTGOMERY, 2012).

No caso do alvo (objetivo) seja minimizar  $Y$ , então a equação abaixo representa a desejabilidade individual:

$$d = \left( \frac{LS - Y}{LS - A} \right)^r$$

em caso de  $A \leq d \leq LS$ . Para os casos de  $Y < A$  e  $Y > A$  os valores de  $d$  serão, respectivamente, 1 e 0.

Após as funções de desejabilidade terem sido especificadas individualmente para as respostas, uma desejabilidade composta (ou global) ( $D$ ) é obtida pela média geométrica das  $i$  desejabilidades individuais (MONTGOMERY, 2012):

$$D = \sqrt[i]{d_1 * d_2 * d_3 * \dots * d_i} \quad (2.6)$$

Dessa forma, a otimização simultânea das variáveis de saída se reduz à maximização da desejabilidade composto e o objetivo passa a ser encontrar os níveis que maximizam o valor de  $D$ .

Além disso, a observação da Equação 2.6 permite perceber que a desejabilidade composta torna-se 0 sempre que uma ou mais desejabilidades individuais atingirem um valor inaceitável, não importando quão satisfatórias foram as outras desejabilidades.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo tratou-se dos conceitos fundamentais que norteiam este trabalho. Nesse sentido, foram discutidos os principais conceitos relativos ao protocolo de transporte TCP, com ênfase em seu desempenho, avaliação de desempenho e o processo de planejamento de experimento. No próximo capítulo será discutida detalhadamente a metodologia utilizada para a experimentação.

# 3

## METODOLOGIA E AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO

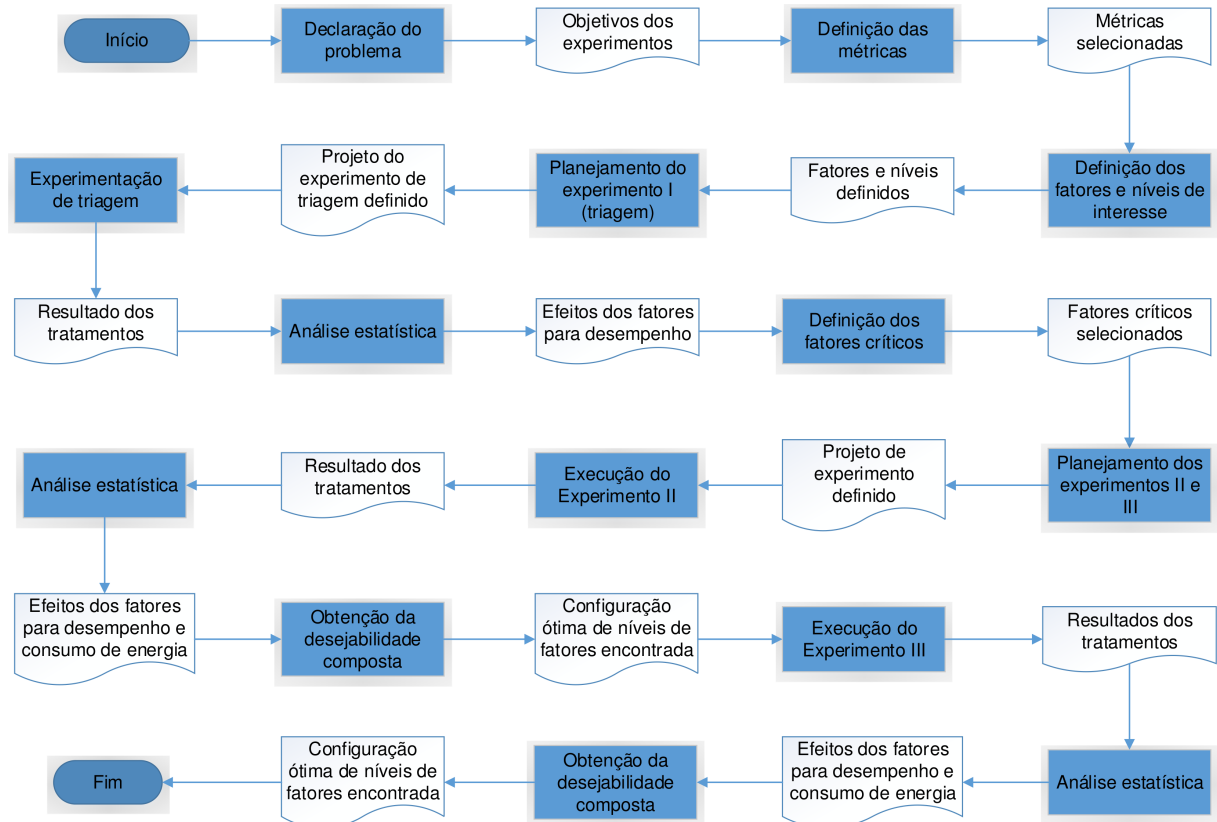
Este capítulo apresenta a metodologia proposta para a avaliação de parâmetros TCP/IP no contexto de desempenho e consumo de energia de dispositivo móvel, bem como demonstra o ambiente de experimentação, incluindo as ferramentas utilizadas.

### 3.1 METODOLOGIA

A metodologia adotada nos experimentos é baseada em DoE (MONTGOMERY, 2012) – Seção 2.3 – e, devido à grande quantidade de fatores envolvidos, o planejamento fatorial fracionado  $l^{k-p}$  é adotado, com  $r$  replicações, em que  $k$  e  $l$  denotam, respectivamente, a quantidade fatores e de níveis de todos os fatores. Esse planejamento define o número de ensaios ou tratamentos como sendo a fração  $\frac{1}{l^p}$  do número de ensaios gerados com as mesmas quantidades de fatores e níveis em um planejamento  $2^k$ .

A Figura 6 contém a metodologia para planejamento do processo de experimento e execução deste. O planejamento corresponde à definição do plano geral dos experimentos que são posteriormente realizados. A primeira etapa corresponde à declaração do problema, que é fundamental para realizar adequadamente uma experimentação, entender o processo e encontrar uma solução. Essa fase indica os objetivos do processo de experimentação e seus resultados práticos. A segunda fase é a definição das variáveis de respostas (métricas) de interesse do experimento, as quais devem se relacionar diretamente com os requisitos que serão avaliados. Dado o objetivo da deste trabalho, as métricas *goodput* e consumo de energia são selecionadas como variáveis de interesse. Após defini-las, é realizado o levantamento dos fatores de interesse. Esse levantamento é fruto de uma investigação exploratória a partir da literatura e tem como produto a lista de fatores (e seus níveis) que podem ser representativos para a pesquisa.

Após os estágios supracitados, é necessário definir o objetivo do experimento o qual deseja-se planejar. Esse objetivo enquadra um experimento em dois tipos distintos, chamados de triagem (*screen*) e de otimização, a depender do seu propósito. O processo de planejamento do primeiro tipo é usado quando a meta do experimento é examinar os efeitos principais para



**Figura 6:** Planejamento e criação dos experimentos

identificar os fatores que têm grande influência nas métricas de interesse. Assim, é possível isolar alguns fatores e, conseqüentemente, reduzir a quantidade deles em experimentos posteriores. Por outro lado, o planejamento do segundo tipo de experimentos é usado para construir modelos com fatores críticos do ponto de vista da investigação, com a finalidade de identificar a melhor configuração de fatores, a observar efeitos principais e de interações entre eles. Dessa forma, cria-se modelo com os fatores aos quais deseja-se observar com maior precisão sua influência nas respostas. Neste trabalho, um experimento é considerado de triagem quando é de Resolução III, ao passo que o critério adotado para um experimento de otimização dá-se quando este é de Resolução IV ou superior.

A etapa planejamento do experimento de triagem assume que o processo de experimentação começa com um grande número de fatores potenciais e, em seguida, aqueles com pouco efeito sobre a resposta devem ser eliminados. Esses fatores devem ser controláveis e ter sistemas de medição adequados, para que possam ser configurados de forma confiável em valores específicos na experiência. Nessa fase, são definidos ainda os tratamentos que serão utilizados na experimentação. Esses tratamentos serão executados no ambiente de experimentação na fase posterior (realização do experimento de triagem), coletando as respostas para cada tratamento. Esses dados serão analisados e a influência de cada fator para a(s) métrica(s) adotada(s) serão obtidas. Esses resultados permitirão selecionar os fatores críticos, os quais deverão ser usados no próximo planejamento.



O planejamento do experimento de otimização corresponde à criação de um projeto com os fatores críticos identificados no experimento de triagem, definindo os tratamentos que serão executados no ambiente experimentação de fase posterior. Após a execução do experimento e coleta dos dados, estes serão analisados e poder-se-á, então, determinar as configurações dos fatores críticos que criam uma resposta desejada, considerando a(s) métrica(s) de interesse. Essa análise pode ser feita com o objetivo de determinar a melhor configuração de fatores para otimizar uma métrica individualmente ou uma composição de duas ou mais métricas.

As subseções a seguir apresentam o planejamento dos três experimentos realizados neste trabalho, sendo um experimento de triagem e dois de otimização. Um planejamento de experimento tem como resultado um projeto de experimento, o qual contém os tratamentos e as replicações a ser realizadas. A análise estatística é processada para cada experimento, sendo que a do experimento de triagem é importante para a definição dos fatores críticos da pesquisa. Já para os experimentos de otimização, essa análise encontra a melhor configuração de níveis de fatores para cada métrica e o índice de desabilidade composta (isto é, considerando as duas métricas de interesse conjuntamente).

### 3.1.1 Planejamento do Experimento I: triagem

O primeiro experimento considera nove fatores ( $k_1 = 9$ ) e dois níveis para cada um deles ( $l = 2$ ). Esses fatores são tecnologia de rede, largura de banda da rede e importantes parâmetros configuráveis do TCP no Android: reconhecimento seletivo (SACK), escalonamento da janela (*Window Scaling*), baixa latência do TCP, *timestamps*, algoritmo de controle de congestionamento e tamanho do *buffer* de recepção do TCP. Além disso, o parâmetro de rede que define o número máximo de pacotes permitidos na fila quando uma interface de rede recebe pacotes de forma mais rápida que o *kernel* pode processá-los também é considerado. A Tabela 2 apresenta esses fatores e seus níveis.

Para o fator tecnologia de rede (*A*), os níveis são 3G (WCDMA) e 4G (LTE), e para largura de banda (*B*), os níveis são 1,0Mbps e 1,8Mbps. Acerca dos fatores reconhecimento seletivo (*C*), escalonamento da janela (*D*), baixa latência do TCP (*E*), e *timestamps* (*F*), os níveis são lógicos, em que 0 indica o estado desabilitado e 1 representa o estado habilitado para cada fator. Para o fator algoritmo de controle de congestionamento (*G*), as opções Cubic e Reno foram selecionadas, pois são os dois algoritmos padrão disponíveis no Android. O fator tamanho do *buffer* de recepção (*H*) é um conjunto de três valores e, no planejamento, foram considerados "2048 43690 1976960" e "8192 174760 7907840" como níveis inferior e superior, respectivamente. A escolha por esses valores ocorreu devido a eles serem a metade e o dobro do valor padrão encontrado em dispositivos *Android*. Os níveis 500 e 2000 para o fator *I* foram assim selecionados pela mesma razão.

A partir do número de fatores avaliados neste trabalho, ao usar um planejamento fatorial geral  $2^9$ , o número de tratamentos gerados é de 512, ou seja, são necessárias 512 execuções

**Tabela 2:** Fatores e níveis

| Fator | Nome                                      | Níveis               |                       |
|-------|-------------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| A     | Rede                                      | WCDMA                | LTE                   |
| B     | Largura de banda                          | 1,Mbps               | 1,8Mbps               |
| C     | Reconhecimento seletivo                   | 0                    | 1                     |
| D     | Escalonamento da janela                   | 0                    | 1                     |
| E     | Baixa latência do TCP                     | 0                    | 1                     |
| F     | <i>Timestamps</i>                         | 0                    | 1                     |
| G     | Algoritmo de controle de congestionamento | Cubic                | Reno                  |
| H     | Tamanho do <i>buffer</i> de recepção      | "2048 43690 1976960" | "8192 174760 7907840" |
| I     | Tamanho máximo da fila de recebimento     | 500                  | 2000                  |

(sem considerar replicações) para encontrar os efeitos de fatores e interações. Não obstante, esse número seria indesejado devido ao custo e tempo de execução elevados. Por isso, para esse experimento, a abordagem *screening* foi adotada, o que possibilita considerar todos os fatores, a identificar aqueles que têm os maiores efeitos (MONTGOMERY, 2012). De forma mais específica, o planejamento  $2_{III}^{9-5}$  (de Resolução III) é adotado, ou seja, é considerada apenas a fração 1/32 do número total de tratamentos do planejamento fatorial completo com os mesmos fatores e níveis. Assim, com a execução de 16 tratamentos é possível observar os efeitos principais, mesmo que esses possam estar confundidos com interações de dois ou mais fatores.

No entanto, nesse planejamento, os efeitos principais não podem ser estimados separadamente porque nem todas as combinações de níveis de fatores são executadas. Desta forma, o efeito estimado para um fator é a soma do efeito desse fator e das interações com as quais ele é confundido. A Tabela 3 apresenta a estrutura de confundimento, também chamada de *alias* ou associação de fatores, deste experimento para os nove fatores e algumas interações, ignorando aquelas de alta ordem (4 ou mais fatores), que geralmente apresentam valores ínfimos. Os efeitos de fatores e interações são estimados através da experimentação de 16 tratamentos, que são resultados de combinações de níveis de fatores, como apresentado na Tabela 4, em que os sinais + e - indicam os níveis superior e inferior para cada fator.

Este experimento utiliza 75 replicações ( $r = 75$ ) para cada tratamento para obter valores médios (com uma distribuição normal aproximada) e reduzir o impacto dos ruídos de medição (isto é, erros aleatórios). Uma replicação é obtida considerando o início de um *streaming* de vídeo até sua conclusão. Adicionalmente, adotou-se *goodput* (em MB/ms) como métrica de interesse devido à sua importância no contexto de avaliação de desempenho em nível de aplicação (WU et al., 2016). *Goodput* mede a quantidade de dados úteis transmitidos num determinado *link* durante um intervalo, a desconsiderar pacotes perdidos, bem como os dados que não são úteis à aplicação, como aqueles do cabeçalho do protocolo TCP. Dessa forma, essa métrica é calculada de acordo com a Equação 3.1. Neste trabalho, apenas para efeito de apresentação dos resultados, adota-se o inverso da métrica ( $goodput^{-1}$ ), apresentando-o em milissegundos (*ms*).



$$Goodput = \frac{(dados\_enviados - dados\_retransmitidos)}{tempo\_transferencia} \quad (3.1)$$

### 3.1.2 Planejamento dos Experimentos II e III

No primeiro experimento, o fator largura de banda ( $B$ ) mostrou-se responsável por quase toda a variação do *goodput*. Com o objetivo de analisar mais profundamente o efeito dos demais fatores levantados na pesquisa, esse fator é isolado, mantido fixado no melhor nível (1,8Mbps).

Assim, o segundo experimento considera 8 fatores ( $k_2 = 8$ ): tecnologia de rede, largura de banda, reconhecimento seletivo, escalonamento da janela, baixa latência do TCP, *timestamps*, algoritmo de controle de congestionamento, tamanho do *buffer* de recepção do TCP e tamanho máximo da fila de recebimento. Os níveis desses fatores são os mesmo do primeiro experimento (Seção 3.1.1), de acordo com a Tabela 2.

A partir do número de fatores disponíveis, foi adotado o planejamento  $2_{IV}^{8-4}$ , ou seja, considera apenas a fração 1/16 do número total de tratamentos do planejamento fatorial completo com os mesmos fatores e níveis. Dessa forma, com 16 tratamentos é possível observar os efeitos principais, bem como algumas interações de dois fatores. Pelo fato de este experimento ser de Resolução IV, efeitos principais não são confundidos com efeitos da interação de dois fatores, mas estas podem ser associados entre si. Além disso, este experimento é de otimização, isto é, define a configuração de fatores que otimiza as métricas avaliadas.

Entretanto, os efeitos principais e as interações de dois fatores não podem ser estimados separadamente porque nem todas as combinações de níveis de fatores são executadas. A Tabela 5 apresenta a estrutura de associação de fatores, que define a soma da qual os efeitos foram estimados, a desconsiderar interações de quatro fatores ou mais. Os tratamentos usados na experimentação para estimar os efeitos de fatores e interações são apresentados na Tabela 6, na qual os níveis inferior e superior dos fatores são indicados, respectivamente, por - e +.

Para avaliar o desempenho e o consumo de energia no *smartphone* em condições adversas do meio de transmissão, o terceiro e último experimento contempla a injeção de probabilidade de perda de pacote e atraso (*delay*) na rede, ou seja, quanto tempo irá demorar para um pacote de dados atravessar uma rede desde a origem até o destino, passando pelos roteadores e enlaces intermediários. O experimento considera um *delay* médio de 30 ms (baseado na distribuição exponencial) e uma probabilidade de perda de pacote igual a 0,03.

Este experimento adota o mesmo planejamento utilizado no segundo experimento, de forma que os efeitos estimados para cada fator ou interação são resultantes da soma de diversos efeitos, como apresentadas na Tabela 5. Da mesma forma, os tratamentos usados na experimentação para estimar esses efeitos são mostrados na Tabela 6.

Adicionalmente, os experimentos II e III utilizam 75 replicações ( $r = 75$ ) para cada tratamento e adota o *goodput* e consumo de energia, em *joules*, como métrica de interesse.

**Tabela 5:** Estrutura de *aliases* dos experimento II e III

| Fator | <i>Aliases</i>                              |
|-------|---------------------------------------------|
| A     | A + CDH + CEI + CFG + DEG + DFI + EFH + GHI |
| C     | C + ADH + AEI + AFG + DEF + DGI + EGH + FHI |
| D     | D + ACH + AEG + AFI + CEF + CGI + EHI + FGH |
| E     | E + ACI + ADG + AFH + CDF + CGH + DHI + FGI |
| F     | F + ACG + ADI + AEH + CDE + CHI + DGH + EGI |
| G     | G + ACF + ADE + AHI + CDI + CEH + DFH + EFI |
| H     | H + ACD + AEF + AGI + CEG + CFI + DEI + DFG |
| I     | I + ACE + ADF + AGH + CDG + CFH + DEH + EFG |
| AC    | AC + DH + EI + FG                           |
| AD    | AD + CH + EG + FI                           |
| AE    | AE + CI + DG + FH                           |
| AF    | AF + CG + DI + EH                           |
| AG    | AG + CF + DE + HI                           |
| AH    | AH + CD + EF + GI                           |
| AI    | AI + CE + DF + GH                           |

**Tabela 6:** Matriz do planejamento dos experimentos II e III

| Tratamento | Fatores |   |   |   |   |   |   |   |
|------------|---------|---|---|---|---|---|---|---|
|            | A       | C | D | E | F | G | H | I |
| 1          | -       | - | - | - | - | - | - | - |
| 2          | +       | - | - | - | - | + | + | + |
| 3          | -       | + | - | - | + | - | + | + |
| 4          | +       | + | - | - | + | + | - | - |
| 5          | -       | - | + | - | + | + | + | - |
| 6          | +       | - | + | - | + | - | - | + |
| 7          | +       | - | + | - | + | - | - | + |
| 8          | +       | + | + | - | - | - | + | - |
| 9          | -       | - | - | + | + | + | - | + |
| 10         | +       | - | - | + | + | - | + | - |
| 11         | -       | + | - | + | - | + | + | - |
| 12         | +       | + | - | + | - | - | - | + |
| 13         | -       | - | + | + | - | - | + | + |
| 14         | +       | - | + | + | - | + | - | - |
| 15         | -       | + | + | + | + | - | - | - |
| 16         | +       | + | + | + | + | + | + | + |

## 3.2 FERRAMENTAS

O dispositivo móvel adotado nos experimentos é um *smartphone* com as seguintes características: (i) Qualcomm Snapdragon S400 1.2 GHz quad-core; (ii) 1GB RAM; (iii) sistema operacional Android 4.4; (iv) e capacidade de comunicação para redes Wi-Fi, 3G e LTE. Dada as inúmeras configurações de *hardware* de *smartphones* disponíveis no mercado e, conseqüentemente, a dificuldade em avaliar um conjunto expressivo delas, esta pesquisa atem-se à influência de parâmetros TCP/IP no consumo de energia e no desempenho no tipo de dispositivo móvel acima citado.

Para isso, utiliza-se como carga de trabalho um serviço de *streaming* de vídeo sobre HTTP e o aplicativo reprodutor de mídia Google ExoPlayer (EXOPLAYER, 2016). Este é um projeto *open source* que permite ao desenvolvedor personalizar e/ou estender seus recursos da forma que lhe é conveniente, possibilitando a substituição ou modificação de componentes. Dada essa facilidade, esse aplicativo, além de ser usado em sua função primordial de execução do vídeo, também foi customizado e empregado para a aferição do consumo de energia durante cada execução do experimento.

O consumo de energia é estimado usando os dados obtidos do *chip Fuel Gauge* (ANDROID, 2016), que permite obter a tensão e a corrente instantaneamente, os quais foram observados em intervalos de meio segundo. Desses valores, a potência é calculada, de acordo com Equação 3.2, onde  $V$  é a tensão elétrica em relação ao tempo, em *volts*, e  $I$  é a corrente elétrica expressada na unidade de *ampere* (A). Então, o consumo de energia requerido para realizar uma tarefa ( $E$ ) pode ser calculado pela potência,  $P$ , e o tempo de duração da tarefa,  $T$ , seguindo a Equação 3.3, em unidade de *joules*. Nesta equação, a potência ( $P$ ) é obtida da equação anterior, em relação ao intervalo de tempo entre observações de corrente e tensão elétricas ( $t$ ). O valor obtido através desse resultado expressa a energia elétrica consumida pelo dispositivo móvel durante uma execução do vídeo. Dessa forma, a energia consumida não tem como fonte apenas o recebimento e execução do vídeo, mas do dispositivo como um todo. Em contrapartida, medidas foram tomadas no sentido de minimizar o impacto de alguns componentes de *software* e *hardware* nas estimativas do consumo de energia, como a manutenção constante do brilho da tela e volume (mantidos fixos em 50%). Além disso, apenas serviços essenciais do Android permaneceram em execução, ao passo que outras aplicações foram desabilitadas, bem como outros tipos de comunicação (como *bluetooth* e Wi-Fi).

$$P(t) = V(t).I(t) \quad (3.2)$$

$$E = \int_0^T P(t) dt. \quad (3.3)$$

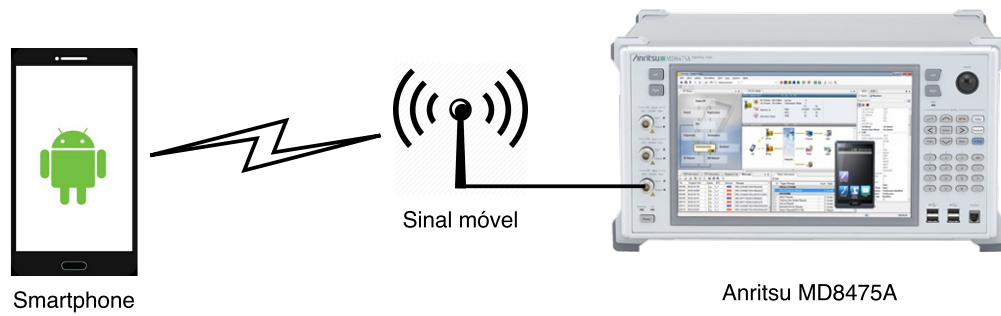
Em relação ao conteúdo de mídia, utilizou-se o primeiro minuto do vídeo BigBuckBunny (BLENDER, 2008) com resolução de 720p, que tem o tamanho do arquivo igual

10,2 MB. O tráfego TCP foi capturado usando a ferramenta tcpdump para Android (TCPDUMP, 2015), que é um utilitário via linha de comando que pode capturar tráfego de uma interface de rede particular (como redes móveis) no *smartphone*. Um arquivo de captura contém os dados de *download* do vídeo (no dispositivo móvel cliente) e é necessário para o cálculo da métrica de desempenho *goodput*. Como essa métrica necessita que a quantidade de úteis (*payload* dos pacotes) seja conhecida, uma aplicação em Java foi desenvolvida para tal propósito, usando a Application Programming Interface - API *jNetPcap* para extrair e tratar os dados desses arquivos. A partir dessa aplicação, é possível obter a quantidade de dados úteis à camada de aplicação, de dados retransmitidos e de dados específicos dos protocolos que estão abaixo da aplicação. Desses valores, *goodput* é calculado, seguindo a Equação 3.1.

### 3.3 AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO

No ambiente de experimentação, um teste é iniciado através de uma requisição de vídeo pelo ExoPlayer no *smartphone* a um servidor *web* HTTP, usando uma rede de dados móveis (3G ou LTE, a depender do experimento processado) e finaliza no momento em que o vídeo é completamente consumido pelo dispositivo cliente. A Figura 7 mostra a infraestrutura usada nesse processo. Para prover ambas as redes, adotou-se um equipamento Anritsu MD8475A (ANRITSU, 2015), que é capaz de simular uma estação base multifuncional de telefonia móveis, permitindo a comunicação entre esta e celulares. Este equipamento suporta grande número de padrões de comunicação móvel, tais como LTE, W-CDMA/HSPA/HSPA e GSM, ajustáveis através do *software* SmartStudio, que permite configurar variados cenários de testes através de uma interface gráfica. O MD8475A foi conectado a uma antena de propagação de sinal através de um cabo RF, o que cria uma conectividade bidirecional com o dispositivo cliente.

O Anritsu MD8475A, mostrado na Figura 7, é também um computador e, por isso, permite a instalação de muitos sistemas operacionais e outros programas. Para a realização desta pesquisa, ele foi configurado com o sistema operacional Windows 7 e o servidor *web* Apache, este usado para simular o servidor de vídeo que fornece o *streaming* com o padrão MP4. Além disso, as ferramentas NetBalancer e Dummynet foram instaladas no equipamento com objetivo de fazer o controle da rede. O primeiro foi usado para definir a largura da rede móvel, nos casos da rede LTE (pois o *software* SmartStudio não permite configurar esse parâmetro para esse tipo de rede), enquanto o último foi adotado para gerar artificialmente *delay* e probabilidade de perda de pacote em um ambiente experimental (simulando o comportamento da rede real), necessário para a realização do terceiro experimento.



**Figura 7:** Arquitetura do sistema para a comunicação móvel

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a metodologia, ambiente experimental e as ferramentas adotadas na realização desta pesquisa. A metodologia, baseada em DoE, ao utilizar a abordagem fracionada, possibilitou planejar experimentos com apenas uma fração de tratamentos de um planejamento completo, mas suficientes para estimar os efeitos dos fatores e de algumas interações. Esses efeitos, por sua vez, são apresentados e discutidos no próximo capítulo.



# 4

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta os resultados dos experimentos realizados para avaliar a influência dos parâmetros TCP/IP configuráveis no desempenho e no consumo de energia em *smartphone* quando esse dispositivo estiver sendo usado para acessar o serviço de *streaming* de vídeo sobre HTTP. Para cumprir esse propósito, os seguintes fatores foram investigados: (i) tecnologias de redes; (ii) largura de banda e; (iii) parâmetros configuráveis do protocolo TCP, incluindo extensões para alto desempenho. Foram considerados três experimentos para avaliar esses parâmetros, utilizando dois valores (níveis) para cada um deles (Tabela 2). Doravante, o primeiro experimento (I) é nomeado como *triagem (screening)*, dado que ele considera todos os fatores e a meta é detectar os mais críticos, de forma a reduzir no número de fatores para os experimentos posteriores. Este experimento é baseado no planejamento apresentado na Seção 3.1.1 e adota *goodput* como métrica.

Em seguida, apresenta-se o segundo experimento (II), a saber, *largura de banda fixa*, pois a largura de banda da rede é consideravelmente influente no primeiro experimento e para avaliar mais detalhadamente o efeito de outros fatores, ele foi isolado (assumindo a largura de banda fixa no melhor nível encontrado no primeiro experimento). Finalmente, o terceiro experimento é apresentado (chamado *injeção de perda e atraso*, que considera os mesmos fatores e níveis do segundo experimento, mas também assume a injeção de perda de pacotes e atraso na rede. Os experimentos II e III consideram *goodput* e consumo de energia com as métricas de interesse e são baseados no planejamento apresentado na seção 3.1.2.

### 4.1 EXPERIMENTO I: TRIAGEM

Os resultados deste experimento são apresentados considerando a técnica estatística Análise de Variância (ANOVA) e adota o nível de significância  $\alpha = 0,05$ , os quais são apresentados na Tabela 7. Nessa tabela, a coluna *Fonte* descreve a fonte de variação para o *goodput*, que inclui os fatores: tecnologia de rede (Rede), largura de banda, reconhecimento seletivo (Sack), escalonamento da janela TCP, baixa latência do TCP, *timestamps*, algoritmo de controle de congestionamento, tamanho do *buffer* de recepção e tamanho máximo da fila de

recebimento. Além disso, algumas interações de fatores são apresentadas e o erro é também uma fonte de variação e representa o ruído nas medições (MONTGOMERY, 2012).

As outras colunas representam os itens a seguir: *Var.%* é o impacto de cada fator (ou interação) na variação da métrica; *df* denota o grau de liberdade; e *F-stat.* é o F estatístico com o respectivo valor de *p* (*p-value*).

Os resultados indicam que a largura de banda da rede é o fator que teve maior impacto no desempenho, com 91,4%, seguido por tecnologia de rede, com 1,5%, e reconhecimento seletivo, com 1,3%. Outros fatores e interações não tiveram impacto significativo no *goodput*. Além disso, não há evidência estatística ( $p\text{-value} < 0,05$ ) de que as interações dos fatores tecnologia de rede e reconhecimento seletivo tiveram efeito no *goodput* (JAIN, 1990). Dessa forma, a análise do experimento demonstra que modificações de parâmetros configuráveis do protocolo TCP tem pouca influência nos resultados para a referida métrica. Ainda, os resultados indicam que o erro randômico explica 2,2% da variação.

A análise de variância testa a importância de um ou mais fatores comparando as médias das variáveis de resposta em diferentes níveis dos fatores. O teste mostrado na Tabela 7 e acima explanado demonstra que há diferenças do nível de influência entre os diferentes fatores, mas não determina qual nível de um determinado fator influencia positivamente a métrica de interesse.

Para que isso fique explícito, a Figura 8 apresenta os gráficos de efeitos principais para cada fator e seus níveis, em que os valores do eixo horizontal representa os níveis de cada fator e os valores no eixo vertical representa o valor do  $\text{goodput}^{-1}$ . Analisando-o, observa-se que o fator B = largura de banda apresenta forte efeito positivo, ou seja, alterando-o do nível inferior (1.0Mbps) para o superior (1.8Mbps), aumenta-se o valor do *goodput* (o fator tem efeito negativo sobre a forma apresentada,  $\text{goodput}^{-1}$ ), demonstrado pela inclinação decrescente do gráfico. Para ratificar essa assertiva, a Tabela 8 mostra o efeito para cada fator (dentre os que são estatisticamente significativos), e a mudança do nível 1,0 Mbps para 1,8 Mbps provoca uma diminuição média de 4,22967 ms no tempo de *download* de 1 MB do vídeo.

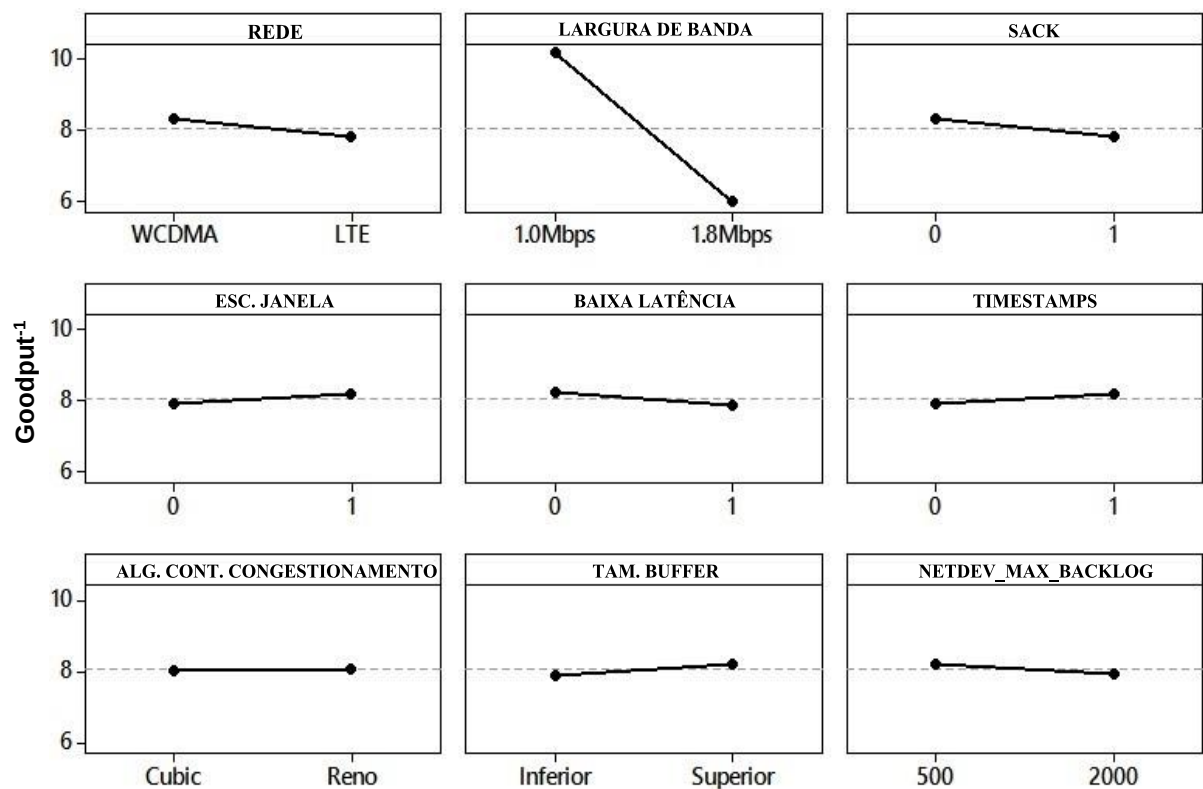
Já para o fator A = tecnologia de rede, o nível LTE (4G) provém alguma melhora no *goodput* (diminuição de 0,53733 ms em relação à WCDMA), assim como a habilitação do reconhecimento seletivo (0,50327 ms).

## 4.2 EXPERIMENTO II: LARGURA DE BANDA FIXA

Como a largura de banda é uma grande fonte de variação (como demonstrado na análise do primeiro experimento), houve a necessidade de avaliar com mais detalhe a influência de outros fatores neste experimento. Para atingir tal objetivo, o fator tecnologia de rede é mantido fixo no melhor nível (1.8Mbps) e outros fatores são reavaliados. Os resultados são apresentados na Tabela 9 para a métrica *goodput* e na Tabela 11 para o consumo de energia. Os efeitos principais para o *goodput* e consumo de energia estão presentes na Figura 9 e na Figura 10, respectivamente. Adicionalmente, em Tabela 10 e Tabela 12 apresentam os efeitos dos fatores

**Tabela 7:** Experimento I - Teste ANOVA

| Fonte                                        | Goodput <sup>-1</sup> |      |          |         |
|----------------------------------------------|-----------------------|------|----------|---------|
|                                              | Var.%                 | df   | F-stat.  | p-value |
| Rede                                         | 1,5                   | 1    | 777,41   | < 0,001 |
| Largura de Banda                             | 91,4                  | 1    | 48171,23 | < 0,001 |
| Sack                                         | 1,3                   | 1    | 682,00   | < 0,001 |
| Esc. Janela                                  | 0,4                   | 1    | 227,55   | < 0,001 |
| Baixa Latência                               | 0,7                   | 1    | 358,91   | < 0,001 |
| Timestamps                                   | 0,3                   | 1    | 154,47   | < 0,001 |
| Alg. Cont. Congestionamento                  | 0,0                   | 1    | 7,57     | 0,006   |
| Tam. <i>Buffer</i>                           | 0,6                   | 1    | 305,94   | < 0,001 |
| netdev_max_backlog                           | 0,4                   | 1    | 202,73   | < 0,001 |
| Largura de Banda*Rede                        | 0,0                   | 1    | 5,93     | 0,015   |
| Largura de Banda*Sack                        | 0,0                   | 1    | 1,72     | 0,190   |
| Largura de Banda*Esc. Janela                 | 0,1                   | 1    | 60,68    | < 0,001 |
| Largura de Banda*Baixa Latência              | 0,1                   | 1    | 76,01    | < 0,001 |
| Largura de Banda*Alg. Cont. Congestionamento | 0,8                   | 1    | 447,45   | < 0,001 |
| Largura de Banda*Tam. <i>Buffer</i>          | 0,1                   | 1    | 29,24    | < 0,001 |
| Erro                                         | 2.2                   | 1184 |          |         |

**Figura 8:** Experimento I - efeitos principais

**Tabela 8:** Ranqueamento dos efeitos dos fatores

| Fator                                 | Efeito ( <i>ms</i> ) |
|---------------------------------------|----------------------|
| Rede                                  | -0,53733             |
| Largura de banda                      | -4,22967             |
| Reconhecimento seletivo               | -0,50327             |
| Escalonamento da janela               | 0,29070              |
| Baixa latência do TCP                 | -0,36509             |
| <i>Timestamps</i>                     | 0,23951              |
| Tamanho do <i>buffer</i> de recepção  | 0,33708              |
| Tamanho máximo da fila de recebimento | -0,27439             |

estatisticamente significativos para cada métrica.

#### 4.2.1 Goodput

Esta seção apresenta os resultados da avaliação de desempenho, considerando a métrica *goodput*, e os resultados são mostrados na Tabela 9. A tecnologia de rede é o fator responsável pela maior parte da variação, a explicar 56,8% dela, seguido pelo reconhecimento seletivo (Sack), com 3,9%, e a opção do TCP de escalonamento da janela, com 2,9%. Além disso, a variação explicada pelo fator que define o algoritmo de controle de congestionamento e algumas interações não são estatisticamente significativas, como indicada pelo  $p$  – *value* superior a 0,05.

A grande influência do fator tecnologia de rede é ratificada pela alta inclinação do gráfico relativo a ele na Figura 9, onde é possível observar um decréscimo do  $goodput^{-1}$  quando a rede LTE é a adota. Mais especificamente, o fator tecnologia de rede justifica uma diferença média de 1,24651 *ms* para *download* de 1 *MB* do vídeo, como mostrado na Tabela 10, em que LTE apresenta o menor valor. O reconhecimento seletivo, segundo fator de maior impacto na variação, decresce em 0,3252 *ms* quando habilitado.

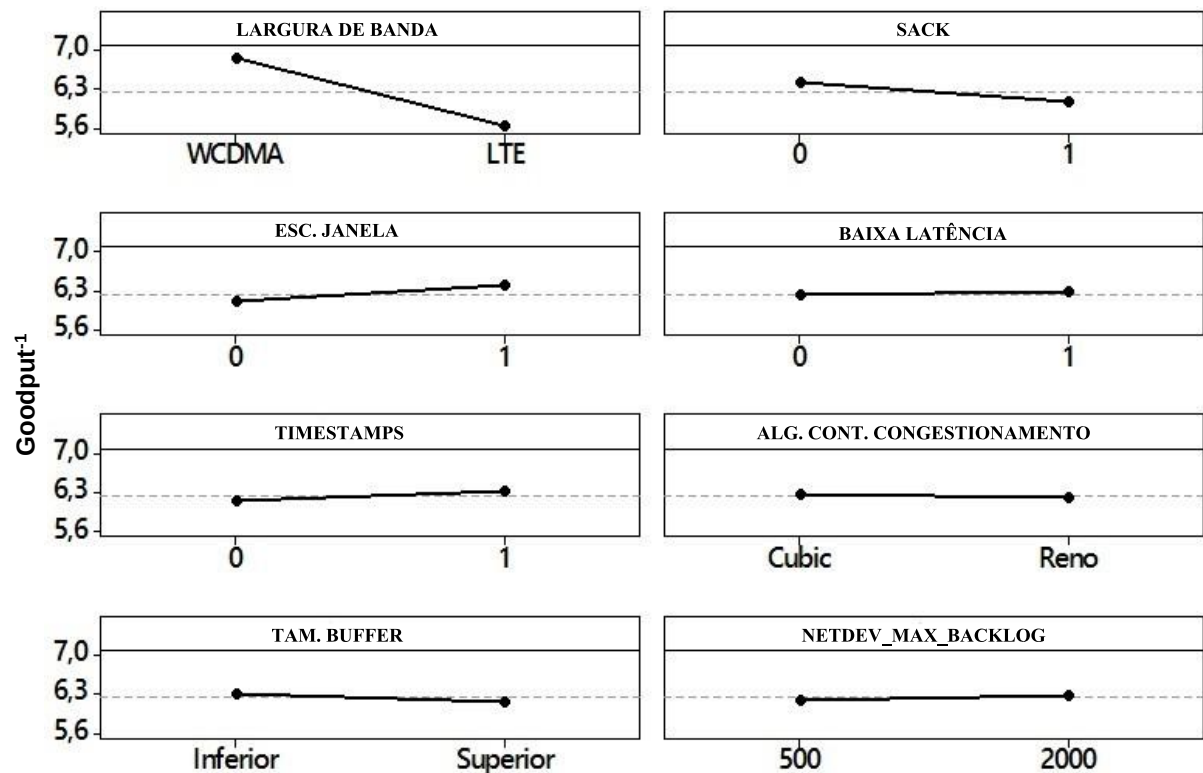
#### 4.2.2 Consumo de Energia

Esta seção avalia o consumo de energia, um problema abordado em muitas pesquisas relacionadas a dispositivos móveis. Como mostrado na Tabela 11, o fator tecnologia de rede explica a maior variação do consumo de energia, seguido pelo reconhecimento seletivo. Por outro lado, alguns fatores têm baixa influência na variação do consumo de energia. Nota-se ainda que os  $p$ -*values* dos fatores algoritmo de controle de congestionamento e *netdev\_max\_backlog* são 0,423 e 0,240, respectivamente, isto é, não há nenhuma evidência que eles tenham efeitos significantes na métrica. Por último, o erro aleatório explica 7,7% da variação.

Dado que a rede é o fator com maior impacto no consumo de energia, a Figura 10 mostra que LTE apresenta o maior consumo de energia no *smartphone*, apesar de prover o melhor desempenho, como denotado pela inclinação crescente do gráfico. Usando a rede WCDMA, o período de *download* e reprodução do vídeo consome, em média, 122,665 *J*, enquanto o uso

**Tabela 9:** Experimento II - Teste ANOVA: *goodput*

| Fonte                            | Goodput <sup>-1</sup> |      |         |         |
|----------------------------------|-----------------------|------|---------|---------|
|                                  | Var. %                | df   | F-stat. | p-value |
| Rede                             | 56,8                  | 1    | 2283,53 | < 0,001 |
| Sack                             | 3,9                   | 1    | 155,43  | < 0,001 |
| Esc. Janela                      | 2,9                   | 1    | 116,04  | < 0,001 |
| Baixa Latência                   | 0,1                   | 1    | 2,88    | 0,090   |
| Timestamps                       | 0,9                   | 1    | 35,29   | < 0,001 |
| Alg. Cont. Congestionamento      | 0,1                   | 1    | 2,10    | 0,148   |
| Tam. <i>Buffer</i>               | 0,6                   | 1    | 22,66   | < 0,001 |
| netdev_max_backlog               | 0,0                   | 1    | 12,18   | < 0,001 |
| Rede*Sack                        | 2,7                   | 1    | 107,13  | < 0,001 |
| Rede*Esc. Janela                 | 0,7                   | 1    | 26,22   | < 0,001 |
| Rede*Baixa Latência              | 0,1                   | 1    | 3,46    | 0,063   |
| Rede*Timestamps                  | 0,1                   | 1    | 3,31    | 0,069   |
| Rede*Alg. Cont. Congestionamento | 0,0                   | 1    | 0,41    | 0,522   |
| Rede*Tam. <i>Buffer</i>          | 1,7                   | 1    | 66,87   | < 0,001 |
| Rede*netdev_max_backlog          | 0,1                   | 1    | 2,27    | 0,132   |
| Erro                             | 29,4                  | 1184 |         |         |

**Figura 9:** Experimento II - efeitos principais: *goodput*

**Tabela 10:** Ranqueamento dos efeitos dos fatores – *goodput*

| Fator                                 | Efeito ( <i>ms</i> ) |
|---------------------------------------|----------------------|
| Rede                                  | -1,2465              |
| Reconhecimento seletivo               | -0,3252              |
| Escalonamento da janela               | 0,2810               |
| <i>Timestamps</i>                     | 0,1550               |
| Tamanho do <i>buffer</i> de recepção  | -0,1242              |
| Tamanho máximo da fila de recebimento | 0,0911               |

de LTE representa um consumo médio de 165,815 *J*, isto é, uma economia de 43,15 *J*, como mostrado na Tabela 12. Desta forma, LTE tem um consumo de energia médio 35,2% maior que WCDMA. Adicionalmente, habilitar o reconhecimento seletivo representa uma economia média de 6,575 *J* para cada execução do vídeo.

**Tabela 11:** Experimento II - Teste ANOVA: consumo de energia

| Fonte                            | Consumo de energia |      |          |         |
|----------------------------------|--------------------|------|----------|---------|
|                                  | Var.%              | df   | F-stat.  | p-value |
| Rede                             | 86,0               | 1    | 13275,47 | < 0,001 |
| Sack                             | 2,0                | 1    | 308,27   | < 0,001 |
| Esc. Janela                      | 0,4                | 1    | 60,02    | < 0,001 |
| Baixa Latência                   | 0,5                | 1    | 69,67    | < 0,001 |
| Timestamps                       | 0,0                | 1    | 4,04     | 0,045   |
| Alg. Cont. Congestionamento      | 0,0                | 1    | 0,64     | 0,423   |
| Tam. <i>Buffer</i>               | 0,1                | 1    | 13,96    | < 0,001 |
| netdev_max_backlog               | 0,0                | 1    | 1,38     | 0,240   |
| Rede*Sack                        | 0,1                | 1    | 9,48     | 0,002   |
| Rede*Esc. Janela                 | 0,4                | 1    | 54,90    | < 0,001 |
| Rede*Baixa Latência              | 0,2                | 1    | 34,46    | < 0,001 |
| Rede*Timestamps                  | 0,5                | 1    | 74,06    | < 0,001 |
| Rede*Alg. Cont. Congestionamento | 1,1                | 1    | 170,82   | < 0,001 |
| Rede*Tam. <i>Buffer</i>          | 0,4                | 1    | 66,80    | < 0,001 |
| Rede*netdev_max_backlog          | 0,7                | 1    | 106,08   | < 0,001 |
| Erro                             | 7,7                | 1184 |          |         |

### 4.2.3 Correlação

Esta seção explica a correlação entre os resultados das duas métricas consideradas, *goodput* e consumo de energia. Particularmente, a análise foca nos níveis dos dois fatores mais influente na variação dessas métricas neste experimento, a citar, tecnologia de rede e reconhecimento seletivo, como mostrado em Tabela 9 e Tabela 11. Assim, a análise de correlação é realizada apenas entre tratamentos que tenham o mesmo nível para os fatores supracitados, isto é, nunca um tratamento que tenha a rede LTE estará na mesma análise que um tratamento

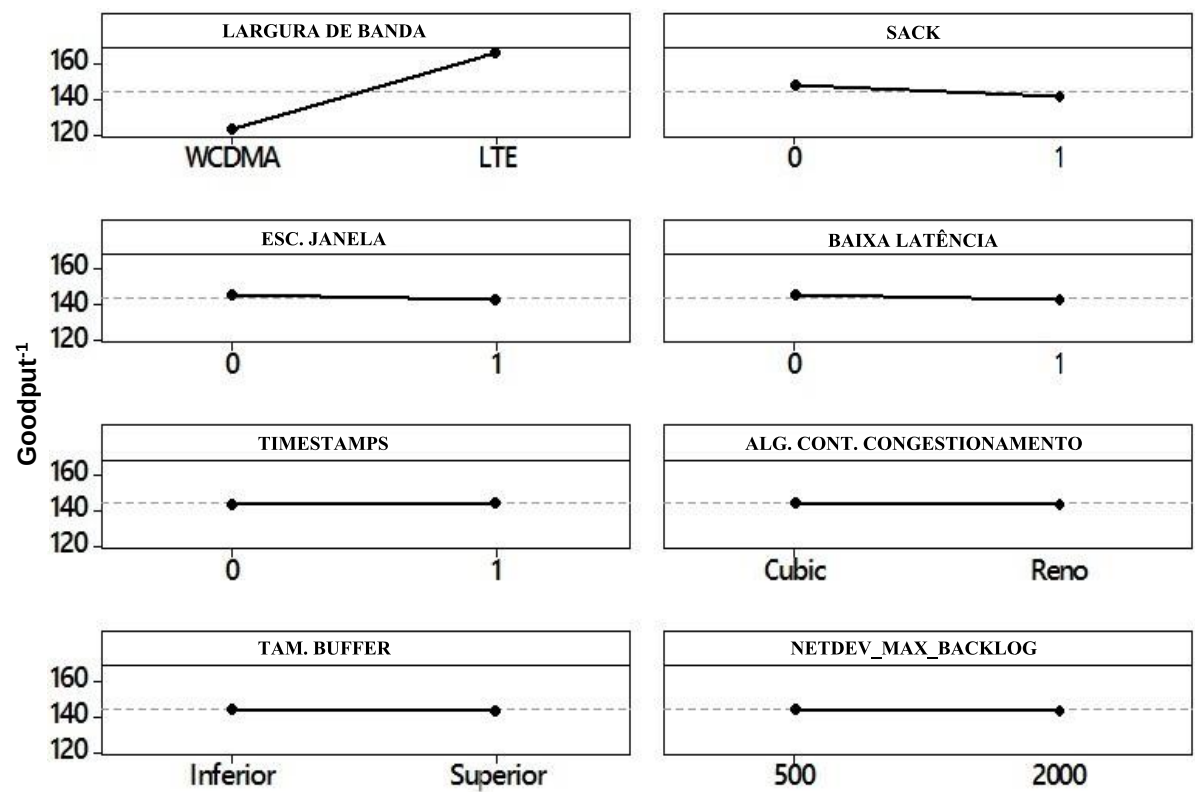


Figura 10: Experimento II - efeitos principais: consumo de energia

Tabela 12: Ranqueamento dos efeitos dos fatores – consumo de energia

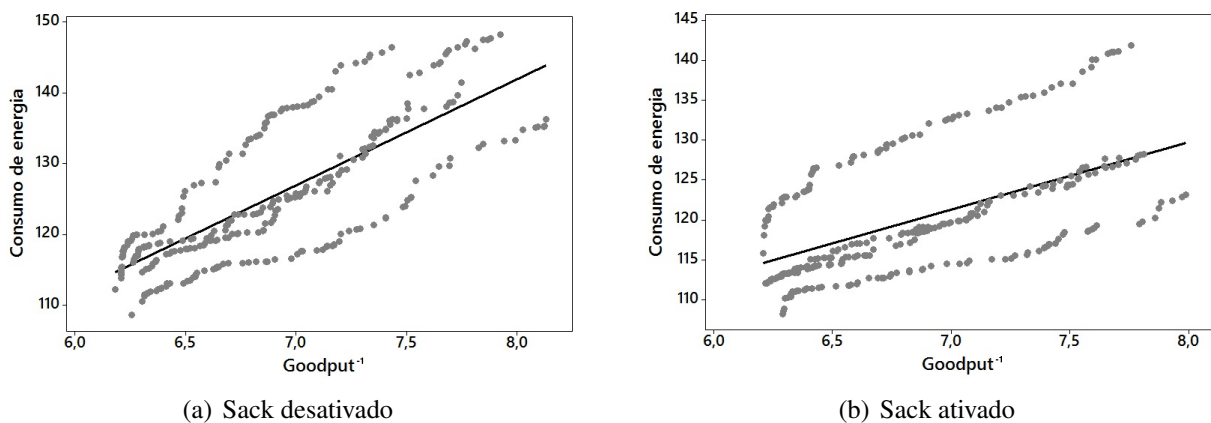
| Fator                                | Efeito ( <i>J</i> ) |
|--------------------------------------|---------------------|
| Rede                                 | 43,15               |
| Reconhecimento seletivo              | -6,575              |
| Escalonamento da janela              | -2,901              |
| Baixa latência                       | -3,126              |
| <i>Timestamps</i>                    | 0,753               |
| Tamanho do <i>buffer</i> de recepção | -1,4                |

que envolva a rede WCDMA, assim como dois tratamentos que tenham níveis diferentes para o reconhecimento seletivo não se agrupam para uma mesma análise.

A Figura 11 apresenta os gráficos de correlação entre o  $goodput^{-1}$  e o consumo de energia, envolvendo a rede WCDMA e as duas opções para o reconhecimento seletivo. Em ambos, pela inclinação crescente das linhas dos gráficos, é possível perceber que há um relacionamento direto entre consumo de energia e o inverso do  $goodput$ , isto é, uma cresce de acordo com o incremento da outra. Dessa forma,  $goodput$  e consumo energético têm relacionamento inverso, pois este tende a ser maior quando do decremento do primeiro. Além disso, o índice de correlação de Pearson em 4.11(a) igual a 0,767 e 4.11(b) igual a 0,567 determina que o  $goodput$  implica de forma direto ou indireta no consumo de energia, com 76,7% e 56,7%, respectivamente. Esses valores correspondem a uma correlação forte no primeiro caso e moderada no segundo.

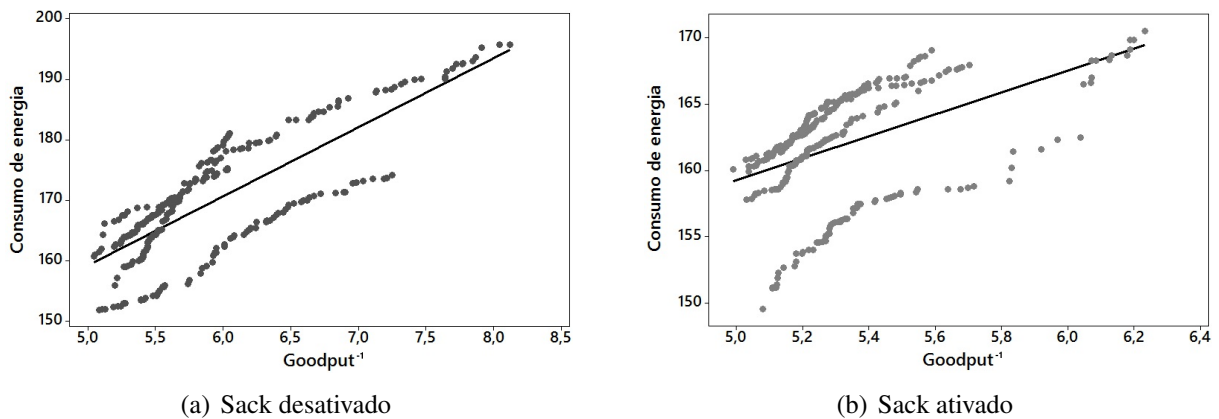
O  $goodput$  provavelmente influencia de forma direta no consumo de energia pois ele é resultado da razão entre a quantidade de dados transmitidos que são de fato aproveitados pela aplicação e o intervalo de tempo. Assim, para transmissão de um mesmo vídeo, a quantidade de dados é imutável (o tamanho do vídeo em MB) e, portanto, a diminuição dessa métrica é justificada pelo aumento intervalo tempo necessário para *download* do arquivo e, conseqüentemente, maior período em que a tela do dispositivo passa ligada consumindo energia.

O gráfico da Figura 12 mostra a correlação entre o  $goodput^{-1}$  e o consumo de energia, considerando a tecnologia de rede LTE e ambas as opções de níveis do reconhecimento seletivo. Nos dois gráficos (4.12(a) e 4.12(b)), a inclinação crescente das linhas dos gráficos indicam que, assim como ocorre na rede WCDMA, há um relacionamento direto entre o consumo de energia e o inverso do  $goodput$ . Conseqüentemente,  $goodput$  e consumo de energia têm relacionamento inverso, ou seja, há o incremento de uma como consequência à diminuição da outra. O índice de correlação de Pearson associado ao reconhecimento seletivo desativado (4.12(a)) é 0,800, indicando que há um relacionamento forte entre as duas métricas. Por outro lado, quando o reconhecimento seletivo está ativado (4.12(b)), há uma fraca correlação entre as duas métricas, indicada pelo índice da correlação de Pearson igual a 0,480.



**Figura 11:** Correlação: consumo de energia x  $goodput$  em rede WCDMA





**Figura 12:** Correlação: consumo de energia x *goodput* em rede LTE

**Tabela 13:** Fatores com diferentes comportamento em diferentes métricas

| Fator                     | $Goodput^{-1}$ (J) | Consumo de energia (J) |
|---------------------------|--------------------|------------------------|
| Escalonamento da janela   | 0,2810             | -2,901                 |
| Baixa latência do TCP     | -                  | -3,126                 |
| <i>netdev_max_backlog</i> | 0,0911             | -                      |

Da análise dos índices apresentados, observa-se que nem sempre há forte ou muito forte cocorreção entre as métricas, indicando que há fatores que, quando há a mudança de um nível para o outro, ele modifica o valor de uma métrica (incrementa ou decrementa) e inaltera a outra ou muda-a no sentido inverso. Para este experimento, a Tabela 13 expõe uma relação de fatores que apresentam esse comportamento.

Nela, o fator escalonamento da janela aumentou o inverso do *goodput* (isto é, piorou o *goodput*), mas diminuiu o consumo de energia quando foi ativado, ou seja, o uso de energia foi melhorado mesmo diante da degradação do desempenho. A opção de baixa latência do TCP, quando ativado, também lida melhor com o consumo de energia, mas não ser estatisticamente significativo em se tratando da variação do *goodput*. Por outro, a mudança de nível do fator *netdev\_max\_backlog* não influencia na variação do consumo de energia, mas piora o *goodput* quando definido como 2000.

#### 4.2.4 Desejabilidade composta para desempenho e consumo de energia

Como demonstrado nos resultados prévios, a tecnologia de rede (sem considerar a largura de banda) é o fator mais influente para ambas as métricas de interesse, *goodput* e consumo de energia. O nível LTE apresenta o melhor desempenho, mas também é responsável pelo maior consumo de energia. Assim, o usuário que deseja assistir ao vídeo dispondo das condições de rede e energia considerados neste trabalho deve optar ou pela economia da bateria e, conseqüentemente, da autonomia do dispositivo, ou pelo melhor desempenho e ter a melhor qualidade de experiência.

**Tabela 14:** Comparação - desejabilidade composta encontrada e para a configuração padrão do Android

|                    | Configuração Encontrada |          | Padrão Android |          |
|--------------------|-------------------------|----------|----------------|----------|
|                    | LTE                     | WCDMA    | LTE            | WCDMA    |
| $D$                | 0,7167                  | 0,6409   | 0,5158         | 0,5830   |
| $Goodput^{-1}$     | 4,75 ms                 | 6,66 ms  | 5,47 ms        | 6,97 ms  |
| Consumo de energia | 150,83 J                | 119,21 J | 166,34 J       | 115,59 J |

Para a tomada dessa decisão, pode-se obter a configuração ótima de fatores e níveis para as métricas adotadas. Para atingir essa meta, este trabalho adota a abordagem desejabilidade composta (Seção 2.3.4). A desejabilidade composta ( $D$ ) avalia a configuração que otimiza um conjunto de métricas, e os valores a ela atribuídos varia de zero a um.  $D$  tende a 0 quando uma configuração ruim é selecionada, e 1 representa o caso ideal.

Neste experimento, a mais alta desejabilidade composta é  $D = 0,7167$ , associada com os seguintes níveis de fatores: LTE para tecnologia de rede; 1 para reconhecimento seletivo e baixa latência; 0 para escalonamento da janela e *timestamps*; o nível superior para o tamanho do *buffer* de recepção; e 500 para o tamanho da fila de recebimento (*netdev\_max\_backlog*). Além disso, qualquer algoritmo de controle de congestionamento pode ser escolhido, não acarretando mudança estatisticamente significativa.

Para tal configuração, o consumo de energia e o  $goodput^{-1}$  são 150,83 J e 4,75 ms, na devida ordem. Essa combinação é diferente da configuração padrão adotada pelo sistema operacional Android, que tem desejabilidade composta igual a 0,5158 e 0,5830, considerando as LTE e WCDMA, respectivamente. De forma mais explícita, para a configuração padrão do Android, o consumo de energia é 166,33 J e a métrica de desempenho é 5,47 ms, em rede LTE; considerando a rede WCDMA, esses os valores são 115,59 J e 6,97 ms. A Tabela 14 apresenta a comparação entre os índices de desejabilidade para a configuração encontrada nesta pesquisa e a configuração padrão do Android. Devido ao fato de que esta pesquisa encontrou a desejabilidade composta com rede LTE e a configuração padrão do Android teve esse índice melhorado em rede WCDMA, a tabela supracitada mostra uma comparação para ambas as redes.

Da observação da tabela, pode-se perceber que a configuração ótima encontrada melhora o valor de ambas as métricas (*goodput* e consumo de energia), permitindo uma redução de 15,5 J em cada execução do vídeo e uma redução do  $goodput^{-1}$  de 2,2 ms na rede da quarta geração. Já em rede da terceira geração, a melhor configuração encontrada, quando comparada a configuração padrão do Android, aumenta o consumo de energia em 3,62 J, mas reduz o  $goodput^{-1}$  em 0,31 ms. Portanto, a melhor configuração encontrada neste experimento pode melhorar a experiência do usuário no contexto do *streaming* de vídeo em um *smartphone* Android, e essa melhoria fica mais evidente quando do uso de rede LTE.

## 4.3 EXPERIMENTO III: INJEÇÃO DE PERDA DE PACOTE E ATRASO

Este experimento considera um atraso médio de 30 *ms* (baseado na distribuição exponencial) e uma probabilidade de perda igual a 0,03.

Mesmo com atraso e perda de pacote, o fator algoritmo de controle de congestionamento não tem impacto significativo em ambas as métricas consideradas, *goodput* e consumo de energia. Acerca da avaliação de desempenho, resultados similares são encontrados em MIKI; YAMAGUCHI; OGUCHI (2011) e ABDELSALAM et al. (2017).

Os resultados deste experimento são apresentados na Tabela 15, Tabela 17, Figura 13 e Figura 14. Por último, Tabela 16 e Tabela 18 apresentam os efeitos dos fatores estatisticamente significativos para as métricas *goodput* e consumo de energia, respectivamente. Ademais, as discussões dos resultados são apresentadas nas subseções a seguir.

### 4.3.1 Goodput

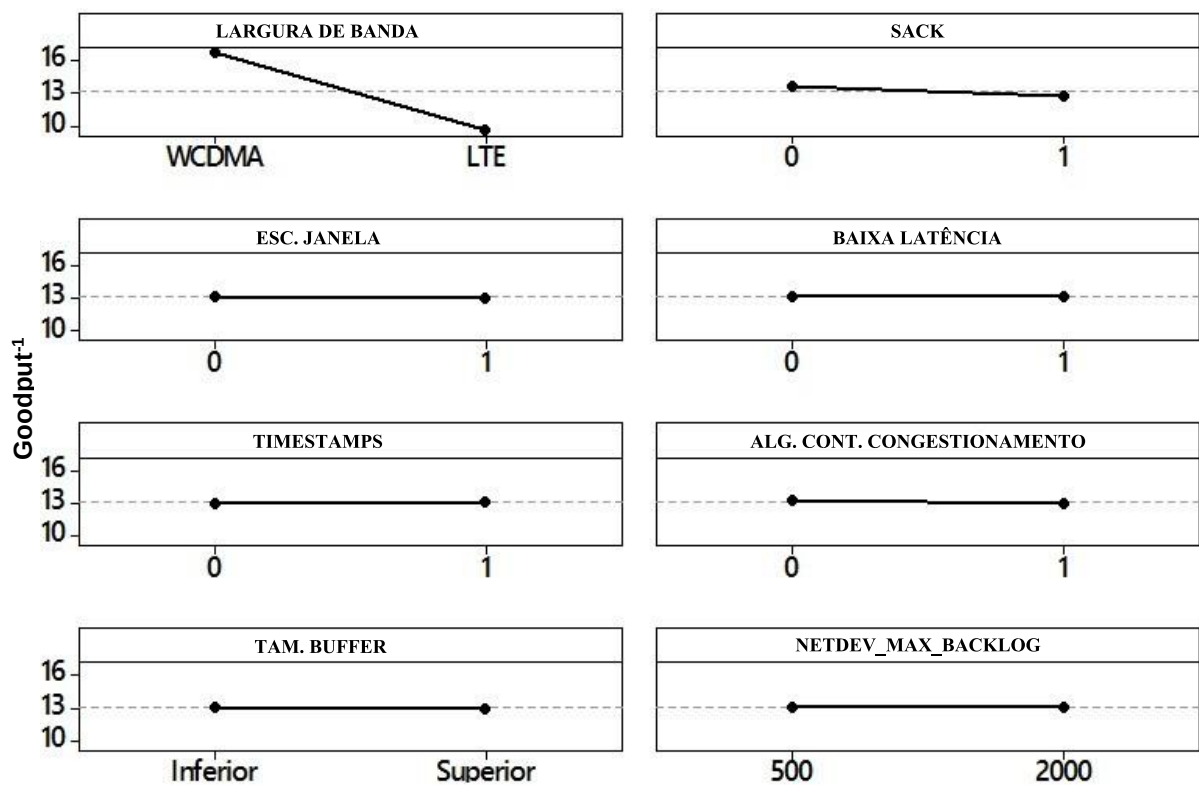
Esta seção apresenta os resultados para avaliação de desempenho, considerando a rede com probabilidade de perda de pacote e *delay* a ela associado. Similarmente ao experimento anterior, os resultados experimentais (veja Tabela 15) apontam a tecnologia de rede como o fator com a maior contribuição na variação do *goodput*, com 95,2%, seguido pelo reconhecimento seletivo (1,8%), ao passo que o fator algoritmo de controle de congestionamento tem uma pequeníssima contribuição (0,1%), mesmo o *p-value* indicando que há significância estatística. Além disso, as interações entre a rede e o reconhecimento é responsável por menos que 1%, enquanto outras interações não são estatisticamente significativas. Vale salientar, ainda, que o erro explica 2,2% da variação.

Destacado a tecnologia de rede como fator que representa quase toda fonte de variação da métrica, é possível verificar o tipo de tecnologia que melhora a métrica de desempenho. O gráfico de efeitos principais ( Figura 13) destaca WCDMA como o nível que degrada fortemente o *goodput*, como pode-se observar pela inclinação da linha do gráfico. Ainda, a opção ativada do reconhecimento provoca uma certa melhora no desempenho.

Sabendo-se quais níveis de fatores melhoram o desempenho, é possível mensurar o quanto a métrica é melhorada a partir da escolha do melhor nível. Como mostra a Tabela 16, mudando a tecnologia de rede de LTE para WCDMA, o tempo médio de *download* de 1 MB do vídeo aumenta de 9,56770 *ms* para 16,73030 *ms*, isto é, aproximadamente 74,9%. Portanto, a modificação da tecnologia de rede de provoca uma diferença no  $goodput^{-1}$  de 7,1626 *ms*. Adicionalmente, habilitar o reconhecimento seletivo eleva o nível o *goodput*, diminuindo o tempo de *download* em 0,9748 *ms*. Por outro lado, algoritmo de controle de congestionamento tem uma influência muito pequena, explicando uma variação de apenas 0,1797 *ms*, em que Reno é um pouco melhor que Cubic.

**Tabela 15:** Experimento III - Teste ANOVA: *goodput*

| Fonte                            | Goodput <sup>-1</sup> |      |          |         |
|----------------------------------|-----------------------|------|----------|---------|
|                                  | Var. %                | df   | F-stat.  | p-value |
| Rede                             | 95,2                  | 1    | 51701,04 | < 0,001 |
| Sack                             | 1,8                   | 1    | 957,52   | < 0,001 |
| Esc. Janela                      | 0,0                   | 1    | 25,28    | < 0,001 |
| Baixa Latência                   | 0,0                   | 1    | 1,48     | 0,224   |
| Timestamps                       | 0,0                   | 1    | 16,33    | < 0,001 |
| Alg. Cont. Congestionamento      | 0,1                   | 1    | 32,56    | < 0,001 |
| Tam. <i>Buffer</i>               | 0,0                   | 1    | 20,12    | < 0,001 |
| netdev_max_backlog               | 0,0                   | 1    | 2,93     | 0,087   |
| Rede*Sack                        | 0,6                   | 1    | 318,13   | < 0,001 |
| Rede*Esc. Janela                 | 0,0                   | 1    | 13,36    | < 0,001 |
| Rede*Baixa Latência              | 0,0                   | 1    | 0,22     | 0,639   |
| Rede*Timestamps                  | 0,0                   | 1    | 10,74    | 0,001   |
| Rede*Alg. Cont. Congestionamento | 0,0                   | 1    | 2,91     | 0,088   |
| Rede*Tam. <i>Buffer</i>          | 0,0                   | 1    | 16,77    | < 0,001 |
| Rede*tcp_netdev_max_backlog      | 0,0                   | 1    | 0,13     | 0,717   |
| Erro                             | 2,2                   | 1184 |          |         |

**Figura 13:** Experimento III - efeitos principais: *goodput*

**Tabela 16:** Ranqueamento dos efeitos dos fatores – *goodput*

| Fator                                | Efeito ( <i>ms</i> ) |
|--------------------------------------|----------------------|
| Rede                                 | -7,1626              |
| Reconhecimento seletivo              | -0,9748              |
| Escalonamento da janela              | -0,1584              |
| <i>Timestamps</i>                    | 0,1273               |
| Alg. Cont. Congestionamento          | -0,1797              |
| Tamanho do <i>buffer</i> de recepção | -0,1413              |

### 4.3.2 Consumo de Energia

Esta seção analisa os resultados da avaliação do consumo de energia no *smartphone* quando este acessa o serviço de *streaming* de vídeo usando uma rede de dados móveis sob condições de atraso e probabilidade de perda de pacotes.

De forma similar ao segundo experimento, a tecnologia de rede é o fator que mais impacta no consumo de energia, sendo responsável por 63,8% da variação dessa métrica (Tabela 17). Outros fatores explicam uma pequena parte dessa variação, sendo reconhecimento seletivo e *timestamps* com 7,2% e 2,4%, respectivamente. Os demais fatores e interações têm impacto pequeno ou não são estatisticamente significativos no consumo de energia.

O impacto do tipo de rede neste experimento é notório, e LTE destaca-se como a rede que oferece melhor economia da bateria, como mostrado na Figura 14. Acessando o *streaming* de vídeo via LTE, o dispositivo gasta, em média, 239,73 *J* para receber 1 MB de dados, enquanto é necessário 281,37 *J* para receber a mesma quantidade de dados usando WCDMA, sob as mesmas condições de atraso e perda de pacotes na rede. Acerca dos parâmetros configuráveis do TCP, o reconhecimento seletivo permite uma economia média de 13,96 *J*, quando habilitado, se comparado à opção desativada. Outros fatores e interações contribuem de forma muito pequena ou estatisticamente insignificante para a variação de economia de energia, como apenas 1 *J* poupado usando o algoritmo Reno. A Tabela 18 apresenta a quantidade de *joules* economizada ao mudar o nível de cada fator que tem seu efeito estatisticamente significativo neste experimento.

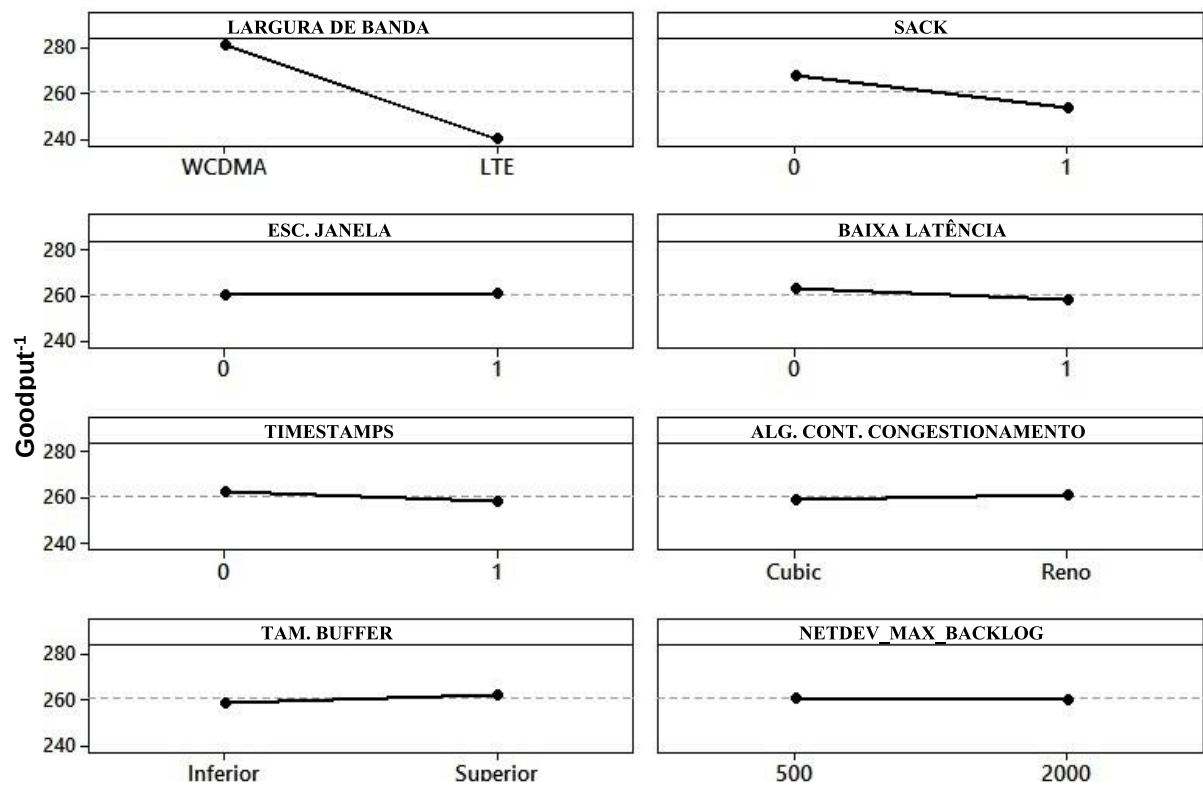
## 4.4 CORRELAÇÃO

Esta seção apresenta a análise de correlação entre os resultados do *goodput* e do consumo de energia resultados do terceiro experimento. Assim como a análise apresentada na Seção 4.2.3, o foco é nos níveis dos fatores tecnologia de rede e reconhecimento seletivo, já que estes são os mais influentes em ambas as métricas (Tabela 15 e Tabela 17).

No que diz respeito à rede WCDMA, o gráfico da Figura 15 apresenta a correlação entre  $goodput^{-1}$  e o consumo de energia, considerando ambos níveis do reconhecimento seletivo. Em 4.15(a) e 4.15(b), a inclinação crescente da linha indica que há um relacionamento direto entre  $goodput^{-1}$  e consumo de energia, isto é, a relação deste com o *goodput* é inverso. Ainda,

**Tabela 17:** Experimento III - Teste ANOVA: consumo de energia

| Fonte                            | Consumo de energia |      |         |         |
|----------------------------------|--------------------|------|---------|---------|
|                                  | Var. %             | df   | F-stat. | p-value |
| Rede                             | 63,8               | 1    | 3548,22 | < 0,001 |
| Sack                             | 7,2                | 1    | 399,35  | < 0,001 |
| Esc. Janela                      | 0,0                | 1    | 0,33    | 0,563   |
| Baixa Latência                   | 0,8                | 1    | 43,54   | < 0,001 |
| Timestamps                       | 0,7                | 1    | 40,81   | < 0,001 |
| Alg. Cont. Congestionamento      | 0,2                | 1    | 10,43   | 0,001   |
| Tam. <i>Buffer</i>               | 0,4                | 1    | 24,15   | < 0,001 |
| netdev_max_backlog               | 0,0                | 1    | 0,96    | 0,327   |
| Rede*Sack                        | 0,1                | 1    | 3,32    | 0,069   |
| Rede*Esc. Janela                 | 0,5                | 1    | 27,00   | < 0,001 |
| Rede*Baixa Latência              | 0,4                | 1    | 23,93   | < 0,001 |
| Rede*Timestamps                  | 2,4                | 1    | 133,90  | < 0,001 |
| Rede*Alg. Cont. Congestionamento | 1,1                | 1    | 62,94   | < 0,001 |
| Rede*Tam. <i>Buffer</i>          | 1,0                | 1    | 55,64   | < 0,001 |
| Rede*tcp_netdev_max_backlog      | 0,0                | 1    | 0,95    | 0,329   |
| Erro                             | 21,3               | 1184 |         |         |

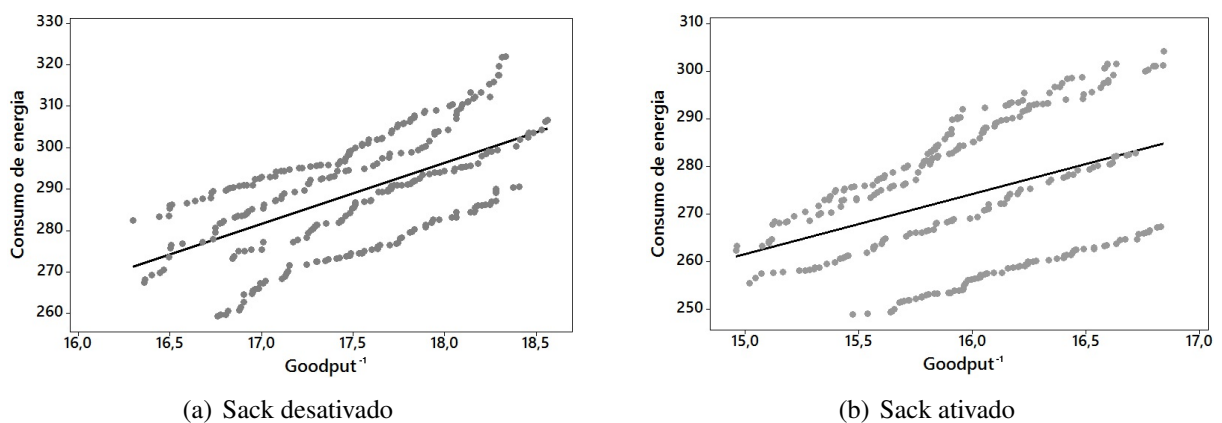
**Figura 14:** Experimento III - efeitos principais: consumo de energia

**Tabela 18:** Ranqueamento dos efeitos dos fatores – *goodput*

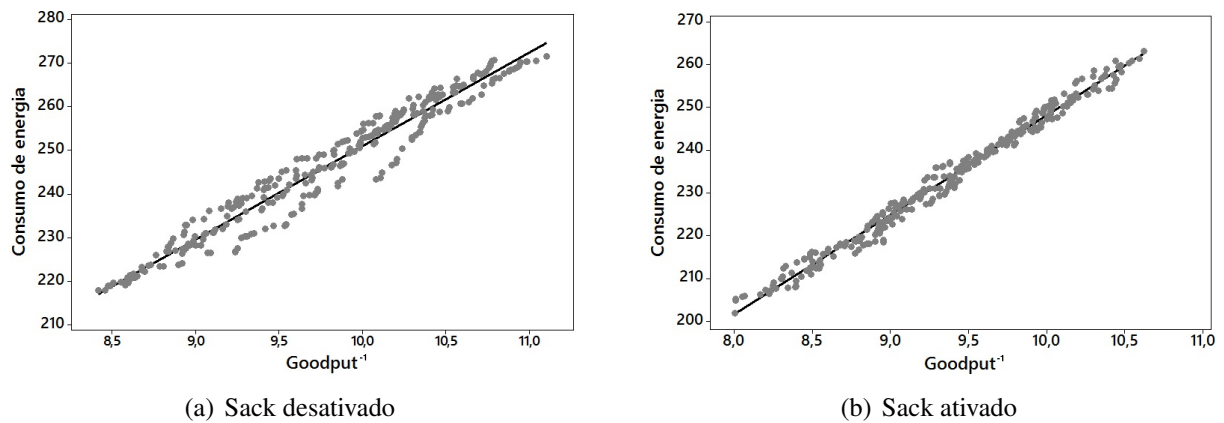
| Fator                                | Efeito (J) |
|--------------------------------------|------------|
| Rede                                 | -41,631    |
| Reconhecimento seletivo              | -13,967    |
| Baixa latência                       | -4,612     |
| <i>Timestamps</i>                    | -4,465     |
| Alg. Cont. Congestionamento          | 2,257      |
| Tamanho do <i>buffer</i> de recepção | 3,435      |

o índice de correlação de Pearson em 4.15(a) é igual a 0,613, indicando que há uma relação moderada entre as duas métricas, em que o *goodput* implica direta ou indiretamente o consumo de energia com 61,3%. Em contrapartida, o relacionamento entre essas métricas em 4.15(b) é de apenas 0,409, o que significa que o *goodput* implica de forma direta ou indireta em apenas 40,9% no consumo de energia, um relacionamento fraco.

No tocante à rede LTE, a correlação entre as duas métricas é mais forte que a apresentada na rede WCDMA. A Figura 16 apresenta o gráfico de correlação entre  $goodput^{-1}$  e consumo de energia, em que o reconhecimento seletivo pode ser desativado 4.16(a) ou ativado 4.16(b). Dada a inclinação nas linhas dos gráficos, percebe-se que há uma relação direta entre o inverso do *goodput* e o consumo energético. Dessa forma, o aumento do consumo energético é explicado, em parte, direta e indiretamente pelo valor do *goodput*. Ainda, a proximidade dos pontos das linhas denota uma relação muito forte, o que é ratificado pelo índice de correlação de Pearson, sendo para 0,975 e 0,993 para 4.16(a) e 4.16(b), respectivamente. Dessa forma, em rede LTE, o *goodput* implica de forma muito forte o consumo de energia, com 97,5% quando o reconhecimento seletivo está desativado e 99,3% quando ativado.

**Figura 15:** Correlação: consumo de energia x *goodput* em rede WCDMA

Dos índices acima apontados, nota-se que há casos em que a correção entre as métricas são média, fraca ou muito fraca. Isso indicando que há fatores que, quando há mudança de um nível para o outro, ele modifica o valor de uma métrica e inaltera a outra ou muda-o no sentido inverso. Para este experimento, a Tabela 19 mostra uma relação de fatores que que apresentam



**Figura 16:** Correlação: consumo de energia x *goodput* em rede LTE

**Tabela 19:** Fatores com diferentes comportamentos em diferentes métricas

| Fator                                | $Goodput^{-1}$ (J) | Consumo de energia (J) |
|--------------------------------------|--------------------|------------------------|
| Escalaonamento da janela             | -0,1584            | -                      |
| Baixa latência do TCP                | -                  | -4,612                 |
| <i>Timestamps</i>                    | 0,1273             | -4,465                 |
| Alg. Cont. Congestionamento          | -0,1797            | 2,257                  |
| Tamanho do <i>buffer</i> de recepção | -0,1413            | 3,435                  |

esse modo de atuação.

O fator escalonamento da janela, quando definido como 1, reduziu o inverso do *goodput* – ou seja, melhorou a métrica de desempenho – em relação a quando foi definido como 0. Todavia, essa variação no fator não resultou em variação do consumo de energia. Por outro lado, o fator baixa latência do TCP não foi estatisticamente significativo no *goodput*, mas melhorou o consumo de energia quando ativado. Os fatores algoritmo de controle de congestionamento e tamanho do *buffer* de recepção, quando definido como o nível superior, foram responsável pela redução do  $goodput^{-1}$ , melhorando o desempenho, mas apresentaram piores resultados no consumo de energia para os mesmos níveis. Já ativar a opção *timestamps* acarretou na redução do consumo de energia, mas piorou o desempenho.

#### 4.4.1 Desejabilidade Composta para Desempenho e Consumo de Energia

Como mostrado nas seções acima, a tecnologia de rede é o fator mais influente neste experimento para ambas as métricas, assim como no segundo experimento. Todavia, com a presença de atraso e perda de pacote na rede, LTE apresentou melhor desempenho e consumo de energia que WCDMA.

A mais alta desejabilidade composta  $D = 0,8506$  é associada com os seguintes níveis: LTE para tecnologia de rede; 1 para reconhecimento seletivo, escalonamento da janela e baixa latência; 0 para *timestamps*; o nível superior para o tamanho do *buffer*; e 2000 para o fator *netdev\_max\_backlog*. Nota-se que esta configuração é diferente da encontrada a partir da análise



**Tabela 20:** Comparação - desejabilidade composta encontrada e para a Configuração padrão do Android

|                    | Configuração Encontrada | Padrão Android  |
|--------------------|-------------------------|-----------------|
| $D$                | 0,8506                  | 0,7896          |
| $Goodput^{-1}$     | 8,9271 <i>ms</i>        | 9,49 <i>ms</i>  |
| Consumo de energia | 226,83 <i>J</i>         | 234,94 <i>J</i> |

do segundo experimento, bem como da configuração padrão do Android.

Para este experimento, a configuração padrão do Android tem uma desejabilidade igual a 0,7896, usando a tecnologia de rede LTE. A Tabela 20 apresenta a comparação entre os índices de desejabilidade para a configuração encontrada nesta pesquisa e a configuração padrão do Android, bem como os valores do  $goodput^{-1}$  e do consumo de energia associados a cada configuração. Usando esta configuração ótima, 226,83 *J* e 8,9271 *ms* são os valores do consumo de energia e do inverso do  $goodput$ . Para o padrão do Android, o consumo de energia 234,94 *J* e o tempo necessário para descarregar 1 MB do vídeo no aparelho é 9,49 *ms*. Assim, a configuração encontrada reduz em 3% o consumo de energia e 5,9% o  $goodput^{-1}$  em relação à configuração de parâmetros TCP no Android.

Todavia, este experimento também almejava melhor avaliar os algoritmos de controle de congestionamento, mas a injeção de atraso e perda de pacotes não contribuiu para encontrar uma grande influência daqueles algoritmos nas métricas adotadas.

## 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a influência dos parâmetros TCP/IP configuráveis no desempenho e no consumo de energia no dispositivo *smartphone*, quando este é usado em serviços de *streaming* de vídeo. Para atingir tal objetivo, três experimentos foram planejados e realizados, baseado em DoE, utilizando a abordagem fracionária.

O primeiro experimento permitiu estimar os valores de efeitos principais (ou seja, dos fatores separadamente), de forma a facilitar o processo de seleção de fatores críticos para os demais experimentos. Nele, fator largura de banda mostrou-se como sendo altamente influente na métrica de desempenho  $goodput$ . Com objetivo de avaliar com maior acurácia a influência dos demais fatores, a largura de banda foi isolada nos demais experimentos, mantida fixa em 1.8Mbps, o melhor nível encontrado.

O segundo experimento avaliou a influência dos parâmetros TCP/IP considerando, além do  $goodput$ , o consumo de energia. A tecnologia de rede foi o fator mais influente, e LTE sobressaiu-se com o melhor desempenho em relação à WCDMA. Entretanto, esta apresentou melhores resultados no contexto do consumo de energia.

O terceiro experimento considerou os mesmos fatores e níveis do segundo, mas com a injeção de atraso e probabilidade de perda de pacotes na rede. A tecnologia de rede novamente

foi o fator mais influente, com LTE sendo melhor em ambas as métricas adotadas. Isso mostra que WCDMA, apesar de ter um menor consumo energético em relação a LTE em um tempo determinado, apresenta desempenho muito inferior, de modo que o tempo necessário para baixar o vídeo é tão alto que resultou em um consumo maior em relação à tecnologia da quarta geração. Dessa forma, o uso de WCDMA em meio com essas características (perda de pacotes e atraso) pode provocar uma péssima experiência para o usuário, mesmo considerando o consumo de energia.

# 5

## CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

As atividades cotidianas têm se transformado ao longo dos anos, convergindo para a evolução dos meios de comunicação. A Internet, a maior rede de computadores, abrange cada vez usuários e contempla, atualmente, atividades diversas como comércio, mercado financeiro, educação e entretenimento. Por esse motivo, a quantidade de tráfego na grande rede aumenta substancialmente no decorrer dos anos, de forma que lidar com isso é desafio para provedores de redes.

Parte considerável desse acesso de serviços na Internet é realizado a partir dos "dispositivos inteligentes", devido às facilidades fornecidas por esses equipamentos, como as opções de conectividade, de mobilidade e custo de aquisição consideravelmente inferior aos *desktops*. Como consequência, o segmento de telecomunicações precisou se adaptar a essa nova realidade, com destaque para a evolução das tecnologias redes de dados móveis. Ainda, houve a explosão no desenvolvimento de aplicativos e adaptação de serviços antes tipicamente de computadores pessoais para esses dispositivos.

Grande parte do tráfego advindo de serviços acessados através dos *smartphones* têm requisito de desempenho e confiabilidade da transmissão, ou seja, a garantia de entrega dos dados. Para cumprir este requisito, os serviços usam o TCP como protocolo de transporte devido a ele ser orientado à conexão. Entretanto, TCP não foi planejado com objetivo prover alto desempenho da transmissão, de forma que a comunicação de um serviço pode experimentar baixo desempenho mesmo utilizando uma rede com alta taxa de transmissão. Para mitigar esse problema, extensões para alto desempenho foram desenvolvidas ao longo dos anos.

Os dispositivos móveis, notadamente os *smartphones* e *tablets*, foram um dos principais fatores impactante para o desenvolvimento dos serviços de *streaming* de vídeo, juntamente com a evolução das tecnologias de redes de dados móveis. Esse tipo de serviço é altamente explorado pelas empresas de entretenimento, fornecendo vídeos de alta qualidade a visar a satisfação do usuário. Não obstante, esse tipo de serviço necessita de considerável largura de banda da rede, bem como alto provimento de energia, uma vez que faz uso intensivo da tela do dispositivo. Por sua vez, os *smartphones* ainda são limitados pela capacidade de armazenamento de energia da bateria, e consequentemente, a autonomia energética é uma preocupação para usuários que consomem esse tipo de serviço, pois *streaming* de vídeo é uma fonte importante no consumo de

energia.

Este trabalho apresenta uma investigação de parâmetros TCP, de largura de banda e de tecnologia rede em dispositivos móveis, considerando *streaming* de vídeo sobre HTTP como carga de trabalho e adotou consumo de energia e a *goodput* como as métricas de interesse. Para isso, investigam-se os seguintes fatores: (i) a tecnologia de rede; (ii) a largura de banda da rede; e (iii) diversos parâmetros TCP, incluindo extensões para alto desempenho.

Três experimentos foram realizados: o primeiro foi usado com objetivo de selecionar o conjunto de fatores críticos para o desempenho; o segundo define a melhor configuração de níveis de fatores para ambas as métricas, *goodput* e consumo de energia, separado e conjuntamente; e o terceiro considera as condições de perda de pacote e atraso na rede.

Os resultados experimentais demonstram que largura de banda é o fator mais influente e o nível 1.8Mbps apresentou o melhor resultado. O fator tecnologia de rede, que aparece como o segundo mais influente, teve o melhor desempenho com o nível LTE. Entretanto, em boas condições de rede, LTE apresentou consumo energético muito superior a WCDMA, de modo que a decisão de usá-la depende da quantidade de energia disponível. Por outro lado, WCDMA apresentou desempenho muito ruim quando atraso e perda de pacotes elevado na rede estão presentes, de forma que o consumo energético com esta tecnologia é pior que LTE, devido ao tempo de *download* e reprodução do vídeo. Ao avaliar as duas métricas conjuntamente, o nível de desejabilidade é sempre maior com o uso da rede LTE.

Acerca dos parâmetros TCP, o desempenho e o consumo de energia é também afetada por alguns níveis e, assim, estes parâmetros são também fonte para a obtenção de uma melhor experiência do usuário. Entretanto, os algoritmos de controle de congestionamento não demonstraram impacto significativo nas métricas de interesse.

A análise de desejabilidade composta adotada neste trabalho permitiu encontrar, para cada experimento, a configuração de níveis de fatores que otimizam ambas as métricas conjuntamente. Como principal contribuição deste trabalho, foram encontradas configurações de níveis de fatores que apresenta melhor desejabilidade que a configuração padrão do Android nos experimentos II e III, reduzindo, em alguns casos, ambas as métricas investigadas.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa foca na avaliação de parâmetros TCP/IP configuráveis, considerando as métricas de desempenho e consumo de energia em *smartphone* Android, usando um serviço de *streaming* de vídeo como carga de trabalho. Entretanto, várias questões estão em abertas, de modo que é possível estender este trabalho em pesquisa futuras, como listada a seguir.

- Explorar outros fatores relativo à rede no dispositivo Android, bem como outros configurações da rede que podem influenciar na métrica de desempenho/consumo energético.

- Avaliar os parâmetros configuráveis TCP/IP do ponto de vista de outras métricas de desempenho, assim como aquelas ligadas à qualidade de experiência do usuário.
- Estimar métricas de dependabilidade e performabilidade em *smartphones* Android a partir da configuração de parâmetros TCP/IP.
- Avaliar questões de infraestruturas e configuração de parâmetros TCP/IP do lado do servidor que podem influenciar o *streaming* de vídeo, bem como outros serviços que usam a rede intensivamente.

# REFERÊNCIAS

- ABDELJAOUAD, I. et al. Performance analysis of modern TCP variants: a comparison of cubic, compound and new reno. In: COMMUNICATIONS (QBSC), 2010 25TH BIENNIAL SYMPOSIUM ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p.80–83.
- ABDELSALAM, A. et al. TCP Wave: a new reliable transport approach for future internet. **Computer Networks**, [S.l.], v.112, p.122–143, 2017.
- ANDREASSON, O. **Ipsysctl tutorial 1.0. 4**. [S.l.]: Free Software Foundation, 2002.
- ANDROID. Power Profiles for Android. , [S.l.], 2016. Disponível em: <https://source.android.com/devices/tech/power/index.html>. Acesso em: nov. 2016.
- ANRITSU. **Signalling Tester (Base Station Simulator)**. Disponível em: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/md8475a>. Acesso em: nov. 2016.
- ARAS, S.; GNIADY, C. GreenTouch: transparent energy management for cellular data radios. In: ACM INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON PERVASIVE AND UBIQUITOUS COMPUTING, 2016. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2016. p.970–980.
- AZWAR, H. et al. H. 265 video delivery using dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH) on LAN network. In: TELECOMMUNICATION SYSTEMS SERVICES AND APPLICATIONS (TSSA), 2014 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.1–6.
- BEZERRA, C. et al. QoE and Energy Consumption Evaluation of Adaptive Video Streaming on Mobile Device. In: ANNUAL IEEE CONSUMER COMMUNICATIONS & NETWORKING CONFERENCE (CCNC 2017), 14. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017.
- BLENDER. **Bigbuckbunny**. Disponível em: <https://peach.blender.org>. Acesso em: nov. 2016.
- BOLCH, G. et al. **Queueing networks and Markov chains**: modeling and performance evaluation with computer science applications. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.
- BORMAN, D.; SCHEFFENEGGER, R.; JACOBSON, V. TCP extensions for high performance. , [S.l.], 2014.
- CERWALL, P.; LUNDVALL, A. et al. Ericsson Mobility Report: on the pulse of the networked society. **Ericsson, Nov**, [S.l.], 2016.
- CISCO. **White paper**: cisco vni forecast and methodology, 2015-2020. Disponível em: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>. Acesso em: jan. 2017.
- DENG, S.; BALAKRISHNAN, H. Traffic-aware techniques to reduce 3G/LTE wireless energy consumption. In: EMERGING NETWORKING EXPERIMENTS AND TECHNOLOGIES, 8. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2012. p.181–192.
- DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of quality technology**, [S.l.], v.12, n.4, p.214–219, 1980.

- DINH, H. T. et al. A survey of mobile cloud computing: architecture, applications, and approaches. **Wireless communications and mobile computing**, [S.l.], v.13, n.18, p.1587–1611, 2013.
- ESTATÍSTICA UFPE, D. de. **CE003 - Estatística II - ANOVA**. Disponível em: "http://www.est.ufpe.br/ce003/material/cap7.pdf". Acesso em: maio 2017.
- EXOPLAYER. Developer guide. , [S.l.], 2016. Disponível em: <https://google.github.io/ExoPlayer/guide.html>. Acesso em: jan. 2017.
- HOURS, H.; BIERSECK, E.; LOISEAU, P. A causal approach to the study of TCP performance. **ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)**, [S.l.], v.7, n.2, p.25, 2016.
- HUANG, J. et al. A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks. In: MOBILE SYSTEMS, APPLICATIONS, AND SERVICES, 10. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2012. p.225–238.
- INFOWESTER. Tecnologias 3G e 4G: cdma-2000, umts, hspa, hspa+ e lte. , [S.l.], 2012. Disponível em: <https://www.infowester.com/3g4g.php>. Acesso em: jan. 2017.
- JAIN, R. **The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1990.
- KNUTH, D. E. Computer Programming As an Art. **Commun. ACM**, New York, NY, USA, v.17, n.12, p.667–673, Dec. 1974.
- KOZIOLEK, H. Performance evaluation of component-based software systems: a survey. **Performance Evaluation**, [S.l.], v.67, n.8, p.634–658, 2010.
- KULKARNI, S.; AGRAWAL, P. et al. **Analysis of TCP performance in data center networks**. [S.l.]: Springer, 2014.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Computer Networking: a top-down approach** (6th edition). 6th.ed. [S.l.]: Pearson, 2012.
- LILJA, D. J. **Measuring computer performance: a practitioner's guide**. [S.l.]: Cambridge university press, 2004.
- LINUX Kernel Documentation. Disponível em: <https://www.kernel.org/doc/Documentation/networking/ip-sysctl.txt>. Acesso em: dez. 2016.
- LINUX Kernel Documentation. Disponível em: <https://www.kernel.org/doc/Documentation/sysctl/net.txt>. Acesso em: dez. 2016.
- LUDWIG, R.; KATZ, R. H. The Eifel algorithm: making tcp robust against spurious retransmissions. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, [S.l.], v.30, n.1, p.30–36, 2000.
- MIKI, K.; YAMAGUCHI, S.; OGUCHI, M. Kernel Monitor of Transport Layer Developed for Android Working on Mobile Phone Terminals. In: THE TENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKS (ICN). **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2011. p.297–302.

MISHRA, A. R. **Advanced cellular network planning and optimisation: 2g/2.5 g/3g... evolution to 4g**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

MOK, R. K. et al. Inferring the QoE of HTTP video streaming from user-viewing activities. In: ACM SIGCOMM WORKSHOP ON MEASUREMENTS UP THE STACK. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2011. p.31–36.

MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments, 8th Edition**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Incorporated, 2012.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

PERRUCCI, G. P.; FITZEK, F. H.; WIDMER, J. Survey on energy consumption entities on the smartphone platform. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING), 2011 IEEE 73RD. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.1–6.

POSTAL, J. RFC 793: transmission control protocol. **DARPA Internet Program for Protocol Specification**, [S.l.], 1981.

SANADHYA, S.; SIVAKUMAR, R. Rethinking TCP flow control for smartphones and tablets. **Wireless Networks**, [S.l.], v.20, n.7, p.2063–2080, 2014.

SATYANARAYANAN, M. et al. The case for vm-based cloudlets in mobile computing. **IEEE pervasive Computing**, [S.l.], v.8, n.4, 2009.

SOUSA, E. d. **Avaliação do impacto de uma política de manutenção na performabilidade de sistemas de transferência eletrônica de fundos**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática.

STOCKHAMMER, T.; LUBY, M. G. Dash in mobile networks and services. In: VISUAL COMMUNICATIONS AND IMAGE PROCESSING (VCIP), 2012 IEEE. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. p.1–6.

TCPDUMP, A. **Android Tcpdump**. Disponível em: <http://www.androidtcpdump.com>. Acesso em: dez. 2016.

WU, J. et al. Content-aware concurrent multipath transfer for high-definition video streaming over heterogeneous wireless networks. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, [S.l.], v.27, n.3, p.710–723, 2016.

YOUTUBE. **Statistics**. Disponível em: <https://www.youtube.com/yt/press/statistics.html>. Acesso em: out. 2016.

YUE, Z. et al. The performance evaluation and comparison of TCP-based high-speed transport protocols. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND AUTOMATION ENGINEERING, 2012. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. p.509–512.