



POSICIONAMENTO DE SERVIDORES COM MINIMIZAÇÃO DE LATÊNCIA EM REDES DE OPERADORAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Fábio Affonso Portela

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Luís Henrique Maciel Kosmalski
Costa
Rodrigo de Souza Couto

Rio de Janeiro
Junho de 2017

POSICIONAMENTO DE SERVIDORES COM MINIMIZAÇÃO DE LATÊNCIA
EM REDES DE OPERADORAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Fábio Affonso Portela

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Prof. Igor Monteiro Moraes, D.Sc.

Prof. Rodrigo de Souza Couto, D.Sc.

Prof. Miguel Elias Mitre Campista, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JUNHO DE 2017

Portela, Fábio Affonso

Posicionamento de Servidores com Minimização de Latência em Redes de Operadoras de Telecomunicações/Fábio Affonso Portela. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIII, 44 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa
Rodrigo de Souza Couto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 40 – 44.

1. Operadoras de telecomunicações. 2. Centros de Dados. 3. Sobrevivência. 4. Latência. 5. Computação na Nuvem. I. Costa, Luís Henrique Maciel Kosmalski *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Aos meus pais, Carlos e Lucia, e
à minha noiva Ana Carolina.*

Agradecimentos

Ao longo da minha vida o título de Mestre sempre me pareceu algo distante, pois entendia que era parte de seguir uma carreira acadêmica que, a princípio, não era meu objetivo. Durante a graduação, percebi que cursar um programa de mestrado era uma forma de me desenvolver e meu interesse foi aumentando. Estudar na UFRJ sempre fora um sonho para mim, que não realizei na graduação. Ao finalizar a graduação e decidir trilhar este caminho, ser aceito na UFRJ foi um estímulo a mais para a concretização desse sonho.

Conquistar esse título passa obrigatoriamente pela minha família, em especial aos meus pais, Carlos e Lucia. Eles sempre me incentivaram a estudar, a me dedicar e deram todo o apoio para tornar isso possível. Há 10 anos, conheci minha noiva, Ana Carolina, que tem tido igual importância em todas as minhas conquistas desde então. Agradeço-os por todo o carinho, incentivo e apoio que me deram.

Uma parte muito importante de todo o processo é ter pessoas com quem compartilhar as alegrias e frustrações. Assim, os amigos e colegas de graduação e mestrado foram muito importantes e sou extremamente grato a todos que estão e passaram pela minha vida.

Olhando especificamente para o período do caminho para o título de Mestre, preciso agradecer a algumas pessoas que foram fundamentais para alcançar essa honra.

Aos meus orientadores, Luís Henrique e Rodrigo, que me deram suporte, direcionamento e apoio para perseguir este objetivo. E extrema paciência e compreensão também. O mesmo posso dizer da minha banca composta pelos Professores Igor e Miguel.

Ao time do qual faço parte na NET, por me apoiarem nos momentos em que não pude estar presente no trabalho. Enquanto eu estava cumprindo as matérias e elaborando a dissertação, toda minha equipe me deu o suporte necessário. Obrigado Andreza, Bruno, Cristiano, Gabriel, Luiz, Rafael, Vivian e Evandro. Um agradecimento especial ao meu gestor, Marcos, que sempre me deu apoio, incentivo e compreensão. Também, ao antigo time da Tim Brasil, do qual eu fazia parte no início dessa caminhada e me deu o apoio necessário.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

POSICIONAMENTO DE SERVIDORES COM MINIMIZAÇÃO DE LATÊNCIA EM REDES DE OPERADORAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Fábio Affonso Portela

Junho/2017

Orientadores: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa
Rodrigo de Souza Couto

Programa: Engenharia Elétrica

As operadoras de telecomunicações atravessam um momento de transformação de seu negócio, passando de empresas fornecedoras de conectividade para empresas de soluções integradas de telecomunicações e tecnologia da informação (TI). Para atender a esse novo paradigma, torna-se necessário agregar capacidade de computação, armazenamento e manipulação de dados à rede através da implantação de servidores em uma infraestrutura de centro de dados. Esta dissertação estuda a implantação de um centro de dados em pontos de presença já existentes na rede visando atender um novo serviço. Devido a requisitos de alta disponibilidade, utiliza-se a geodistribuição de servidores para aumentar a sobrevivência dos serviços. Em contrapartida, essa abordagem aumenta a latência entre os servidores, podendo ser um fator a impactar na percepção de qualidade do usuário final.

A fim de estudar o comportamento do compromisso entre a sobrevivência e a latência devido à geodistribuição, faz-se a formulação de um problema de otimização com objetivo de minimizar a latência média entre os sítios. Os parâmetros de entrada do problema são dados relativos a topologia e medições de latência entre os sítios, disponibilizados pela provedora. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da latência e sobrevivência em diferentes topologias e utilizando valores de latência diários e mensais. Os resultados mostraram, em todos os cenários, que existe uma faixa grande em que se obtém ganhos significativos de sobrevivência com pouco impacto na latência média entre os sítios e latência máxima entre os sítios.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MINIMUM LATENCY SERVER POSITIONING ON
TELECOMMUNICATIONS SERVICE PROVIDER NETWORKS

Fábio Affonso Portela

June/2017

Advisors: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa
Rodrigo de Souza Couto

Department: Electrical Engineering

Telecom service providers are going through a transformation moment, leaving the status of connectivity providers to providers of integrated solutions of telecommunications and information technology (IT). This paradigm shift demands aggregation of process, storage and data management to their network by activating servers in datacenters located at the network. This dissertation studies the deployment of a datacenter in points of presence through the network in order to allow new services. Due to high availability requirements of this kind of service, it is proposed to use geodistribution of servers to increase service survivability. This approach causes increase of latency between servers, which is a factor that could have a negative effect on quality experience of and users.

In order to explore the behavior of the commitment between survivability and latency in a geodistributed environment, we formulated an optimization problem with the objective to minimize the average latency between sites. The input parameters are the topology and inter-site latency measurements of an academic research network which provides broadband connectivity to academic facilities. The goal of this dissertation is to analyze the behavior of latency and survivability subject to different topologies using daily and monthly latency values. The results show that there is a band where it is possible to have big earnings in survivability with a little loss of performance in average and maximum latency inter-sites.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas	xii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Organização do Texto	4
2 Trabalhos Relacionados	6
3 Redes de Operadoras de Telecomunicações	9
4 Formulação do Problema de Posicionamento de Servidores Geodistribuídos	13
4.1 Modelagem de Falhas	14
4.2 Modelagem da Sobrevivência	16
4.3 Modelagem da Latência	17
4.4 Formulação do Problema de Otimização	18
5 Avaliação da Rede e Resultados	22
5.1 Rede Analisada	22
5.1.1 Topologia do Backbone	23
5.2 Medições	24
5.3 Escolha de Parâmetros e Conjuntos	26
5.4 Avaliação	27
5.4.1 Comportamento com Granularidade Diária	27
5.4.2 Comportamento com Granularidade Mensal	32
5.4.3 Comportamento Dinâmico da Escolha da Solução	33
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	37

Lista de Figuras

3.1	Topologia genérica de uma rede óptica conectando um <i>datacenter</i> geodistribuído.	11
4.1	Representação do conceito de sobrevivência em uma rede de DCs.	17
5.1	Topologias de referência da rede Ipê.	25
5.2	Resultados do problema de otimização com os dados do dia 02 de agosto de 2016.	28
5.3	Resultados do Problema de Otimização com os dados de 06 de setembro de 2016.	29
5.4	Resultados do Problema de Otimização utilizando como entrada a latência média entre PoPs de Setembro de 2016	33
5.5	Comparação de resultados para dados de entrada da latência média para as 6 topologias de referência.	35

Lista de Tabelas

4.1	Causas de falhas ópticas e tempo médio de solução	15
4.2	Notações utilizadas no problema.	19
5.1	Sítios ativos e média de latência entre eles para as 6 curvas de latência, considerando a sobrevivência de bastidores entre 0,05 e 0,50.	30

Lista de Abreviaturas

TIC - Tecnologia da Informação e Comunicação;

DC - *Datacenter*;

IP - *Internet Protocol*;

RTT - *Round Trip Time*;

PoP - *Point of Presence*;

CAPEX - *Capital Expenditures*;

OPEX - *Operational Expenditures*;

DCN - *Datacenter Network* ;

NAT - *Network Address Translator*;

NFV - *Network Functions Virtualization*;

COTS - *Commercial Off the Shelf*;

CDN - *Content Distribution Network*;

ISP - *Internet Service Provider*;

TI - Tecnologia da Informação;

QoE - Qualidade de Experiência;

MTTR - *Mean Time To Recovery*;

SRG - *Shared Risk Group*;

OTN - *Optical Transport Network*;

MILP - *Mixed-Integer Linear Programming*.

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de telecomunicações surgiram para prover os enlaces físicos e a infraestrutura necessária para interconectividade entre usuários, através de serviços de voz e de dados. Com a revolução dos aplicativos e a pressão por menores custos na conectividade com a Internet, a receita dos serviços de voz tem caído drasticamente e a dos serviços de dados possui perspectiva de ir pelo mesmo caminho nos próximos anos [1]. O transporte de dados passou a ser um serviço mais barato aos clientes e com menores margens financeiras. Isso forçou as empresas de telecomunicações a buscarem novas tecnologias para reduzir custos e ofertar serviços baseados no provimento de conteúdo. Assim, tecnologias tipicamente associadas ao mercado de TI - Tecnologia da Informação têm ganhado relevância nas operadoras de telecomunicações, como computação na nuvem, virtualização e Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) [2, 3]. Cunhou-se, inclusive, o termo TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação), em inglês, (*ICT - Information and Communications Technology*) para descrever este novo nicho de mercado. Essa nomenclatura associa a capacidade de tráfego de dados das redes de telecomunicações à capacidade de computação, processamento e armazenamento na infraestrutura de TI. Esta infraestrutura que torna possível o armazenamento e manipulação de dados em larga escala é fornecida pelos centros de dados (DCs - *Datacenters*). Os DCs são infraestruturas compostas por comutadores, dispositivos de armazenamento (*storages*) e bastidores, que abrigam servidores formando aglomerados (*clusters*), elementos interconectados por uma rede de comunicação de alta capacidade que fornece ainda a conectividade com a Internet ou outras redes de centros de dados.

No Brasil, as principais operadoras já oferecem produtos baseados na convergência de infraestruturas de comunicação e de informação. Em 2015, na Oi, por exemplo, mais de 10% dos clientes utilizavam alguma de suas soluções de computação na nuvem. Um exemplo dessas soluções é o Oi Smart Cloud, que provê armazenamento e processamento de conteúdo na nuvem [4]. Já a Embratel possui o Embratel Cloud Server, que permite que os clientes aluguem servidores na nuvem,

podendo configurar parâmetros como velocidade de processamento e quantidade de memória, número de endereços IP (*Internet Protocol*) válidos, entre outros [5]. A Vivo possui produto similar, com o diferencial de garantir contratualmente 99,95% de disponibilidade do serviço [6].

As operadoras de telecomunicações possuem atributos vantajosos para concorrer no mercado de TIC. Do ponto de vista de negócios, elas possuem uma base de clientes consolidada nos segmentos de varejo, empresarial e corporativo. Os novos serviços seriam uma extensão dos contratos já existentes de conectividade, de maneira a agregar mais valor numa cadeia fim-a-fim de soluções. Além disso, já possuem equipes estruturadas e experientes em vendas e atendimento ao cliente. Do ponto de vista de tecnologia, a infraestrutura é uma grande vantagem natural por possuírem redes com alta capilaridade e enlaces centrais de alta capacidade, cobrindo grandes regiões geográficas e interligando pontos de presença próprios. Assim, é interessante para as operadoras aumentar a sua capacidade computacional através da alocação de servidores em sua própria rede, implantando-os nos locais mais vantajosos.

A decisão de onde implantar os equipamentos do centro de dados passa pela definição de um ou mais critérios que irão condicionar essa escolha. É importante que essa avaliação reflita os objetivos da empresa, aumento de receitas e redução de custos, para atingir o resultado esperado. Um fator crítico para isso é a satisfação do usuário, pois um serviço mal prestado em um ambiente altamente competitivo reduz a capacidade de venda, aumenta o número de cancelamentos e pode acarretar desastres financeiros para as empresas. A TIM, a segunda maior operadora móvel do Brasil e subsidiária da Telecom Italia, por exemplo, acumulou reclamações junto ao órgão regulatório brasileiro, a ANATEL, e em 2012 foi proibida de ativar novos clientes por alguns dias. Isso provocou queda de receita e perda de valor de mercado através da queda do preço das suas ações [7]. Esse é um dos motivos que fez a qualidade percebida pelo usuário ser tratada como um tema de maior relevância entre as empresas e no meio acadêmico, tornando-se objeto de diversos estudos com o intuito de desenvolver métricas e maneiras de mensurá-la. Assim, surgiram termos como “Qualidade de Serviço” e “Qualidade de Experiência”, considerando diferentes fatores para diferentes serviços, a fim de determinar o significado de uma “boa qualidade” [8]. Uma importante métrica é a disponibilidade do serviço, pois não há percepção da qualidade do serviço se este estiver indisponível. Por isso, a resiliência de uma rede, ou seja, a sua habilidade em realizar a comunicação da forma esperada apesar de alguma falha, é também um fator relevante a ser considerado.

Uma das soluções para aumentar a resiliência a falhas é distribuir os recursos geograficamente, obtendo assim robustez e garantindo o funcionamento se um dos pontos falhar [9]. Por outro lado, ao aumentar a distância entre os servidores, o atraso entre eles aumenta, o que poderia levar a uma degradação da qualidade

do serviço. Considerando esses fatores, a escolha da distribuição e instalação da capacidade computacional se torna um problema de posicionamento de servidores em um *datacenter* de maneira geograficamente distribuído que garanta alta resiliência dos servidores com baixo atraso na comunicação entre eles. Uma solução para aumentar a redundância dos serviços é a replicação do conteúdo ou de máquinas virtuais nos diferentes locais [9][10].

1.1 Objetivos

Couto *et al.* [11] propõem a solução do problema de posicionamento de servidores em *datacenters* geodistribuídos através do uso de programação linear inteira mista. O objetivo do problema proposto é maximizar a resiliência e minimizar a latência máxima. Para fornecer os valores de latência ao problema de otimização, Couto *et al.* consideram que a latência do enlace é composta apenas pelo atraso de propagação na fibra óptica entre os nós. Esse atraso é estimado em função da distância geográfica em linha reta entre os nós.

Esta dissertação estende o trabalho de Couto *et al.* [11], utilizando medições reais de uma rede de longa distância para o modelo de latência. Além disso, Couto *et al.* definem como objetivo reduzir a latência máxima. Assim, o resultado obtido pelo problema de otimização é função da pior latência dos enlaces, independente dos valores de latência entre os outros sítios. O problema de otimização desta dissertação minimiza o somatório da latência entre os sítios sendo, assim, menos restritivo que o proposto por Couto *et al.*. Para tal, tanto a latência máxima como a sobrevivência, que eram consideradas como objetivo por Couto *et al.*, tornam-se restrições nessa nova formulação.

Em [11], Couto *et al.* analisaram o compromisso entre latência e resiliência, concluindo que para requisitos altos de tolerância a falhas, um pequeno ganho na resiliência representa um alto acréscimo na latência e que para valores mais baixos, uma redução significativa da resiliência resulta em uma melhora insignificante na latência.

Assim, esta dissertação visa responder às seguintes questões:

- O comportamento obtido com o atraso de propagação por Couto *et al.* em [11] continua válido quando são considerados valores reais de latência entre os sítios, medidos através do tempo de ida e volta (RTT – *Round Trip Time*) entre os nós?
- Como se comporta o compromisso entre a latência e a tolerância a falhas ao estabelecer como objetivo a minimização do somatório da latência entre sítios

ao invés da abordagem de minimizar a latência máxima dos enlaces, como realizado em Couto *et al.*?

Com as questões apresentadas acima, busca-se analisar o compromisso entre latência e sobrevivência e definir os sítios que serão parte do *datacenter* geodistribuído, através da instalação de bastidores. Os sítios são escolhidos dentre todos os pontos de presença (PoP - *Point of Presence*) candidatos constituintes da rede da operadora. Mesmo abrigando a nova estrutura proposta, os sítios continuarão desempenhando as antigas funções para os outros serviços da operadora, com os quais dividirá a capacidade dos enlaces (*links*). Portanto, o tráfego nos enlaces poderá aumentar devido à utilização desses outros serviços. Dependendo de quanto seja essa variação, pode ser necessário aumentar a capacidade entre os pontos de presença ou criar novos enlaces entre sítios que antes não possuíam conexão direta, alterando a topologia da rede. A alteração da topologia pode provocar mudanças no conjunto dos sítios que minimizam a latência média, fazendo com que sítios eram até então escolhidos não sejam mais os ideais. O posicionamento físico de servidores é uma operação custosa em despesas de capital (*Capital Expenditures*) e despesas operacionais (*Operational Expenditures*), pois envolve ações como adequar a infraestrutura física dos sítios, a compra de equipamentos, os custos de transporte, configuração e ativação, consumo de energia elétrica adicional e equipe de suporte. Então, ao definir os sítios do *datacenter* e a quantidade de bastidores em cada um, é desejável que esta estrutura continue satisfatória por, no mínimo, o período necessário para o retorno do investimento do projeto. Assim, torna-se importante responder a seguinte questão:

- Como é o comportamento das soluções de posicionamento no tempo, conforme a topologia da rede é alterada para suprir a necessidade de crescimento de capacidade para atender aos serviços de telecomunicações?

Nesta dissertação, foi definido um problema de programação linear inteira que permite responder às três questões mencionadas anteriormente. A resolução desse problema permitiu a estudar o comportamento do compromisso entre latência e resiliência para diferentes cenários, melhor detalhados ao longo da dissertação.

1.2 Organização do Texto

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta o estudo da literatura e os principais trabalhos relacionados. No Capítulo 3, são apresentadas as características das redes de operadoras de telecomunicações e o formato de implantação do *datacenter*. O Capítulo 4 define os conceitos relevantes

e descreve a modelagem das condições e a formulação do problema de programação linear inteira mista. No Capítulo 5, apresenta-se a rede real analisada, uma rede nacional de pesquisa que é compatível com as premissas apresentadas de uma rede de telecomunicações, as medidas utilizadas e são mostrados os resultados da execução da otimização proposta e a discussão dos resultados. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões desta dissertação de mestrado e discute trabalhos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

Estruturar um *datacenter* através de uma rede (DCN - *DataCenter Network*) com servidores distribuídos em múltiplos pontos de presença é uma tarefa complexa, que possui diversos fatores que devem ser considerados como, por exemplo, a resiliência a falhas, a distância entre os pontos de presença e a capacidade dos enlaces, a matriz de tráfego e o posicionamento de conteúdo. Neste capítulo, são apresentados os trabalhos relacionados a pesquisas de otimização de posicionamento de infraestrutura ou de conteúdo em *datacenters* e/ou redes de operadoras de telecomunicações.

O avanço da Internet e da conectividade em banda larga levou ao crescimento da utilização dos serviços de computação na nuvem e aplicações *web*. A importância que esses serviços têm na vida das pessoas justifica a necessidade de mantê-los operacionais pelo maior tempo possível ter se tornado um ponto relevante de pesquisa. Xiao *et al.* [12] ressaltam que a maioria dessas aplicações são providas por redes de *datacenters* e que a replicação de conteúdo em diferentes sítios permite explorar dois grandes benefícios, a redução da latência e do custo de transmissão ao posicionar o conteúdo mais próximo dos usuários finais e a melhoria da disponibilidade do serviço, pois outro DC pode assumir a transmissão em caso de desconexão de um sítio. Em contrapartida a esses benefícios, existe um compromisso entre a quantidade de sítios utilizados, e conseqüentemente a proximidade entre os mesmos, e os custos envolvidos com a construção e manutenção desses locais, os custos com equipamentos de transmissão (como roteadores e *switches*) e custo de proteção de enlaces ópticos que interconectam esses pontos. Xiao *et al.* formula um problema de programação linear inteira com o objetivo de minimizar esses custos sujeito às demandas de serviço serem atendidas com proteção para qualquer falha única de enlace ou serviço. A motivação desta dissertação é aproveitar os recursos de rede com sítios e enlaces já existentes, tornando o custo menor do que se considerasse a construção de uma nova rede. Assim, não se utiliza a métrica de custo. A limitação do número de sítios utilizados é dependente do compromisso com a latência.

Diferentemente do foco em replicação de conteúdo, Habib *et al.* [13] estudam as modelagens e impactos de falhas e desastres em redes ópticas utilizadas para interconectar sítios de um *datacenter* e técnicas de proteção para implementar maior resiliência nessas redes. Esse trabalho define o modelo de falha única, em que apenas um elemento falha por vez, e as modelagens determinísticas e probabilísticas de desastres. Em [14], Habib *et al.* estendem o trabalho anterior propondo um problema de posicionamento de *datacenter* por programação inteira linear minimizando o uso de recursos, enlaces primários e reservas, da rede. Nesse trabalho, Habib *et al.* utilizam o modelo de múltiplas falhas.

Já Savas *et al.* [15] propõem um problema de otimização de posicionamento minimizando a perda de banda após a ocorrência de um desastre. Indiretamente, a latência é minimizada através de um fator de escolha do menor caminho. A sobrevivência é analisada além da falha causada pelo desastre, observando falhas secundárias que possam ocorrer. Nessa abordagem, é necessário que o mesmo conteúdo esteja espalhado em vários sítios para aumentar a sobrevivência. Diferentemente, esta dissertação possui foco na posição dos servidores e não do conteúdo. Um ponto interessante desse artigo é a utilização de um modelo probabilístico de falhas calculada a partir do epicentro do desastres. Esse modelo de falhas também é utilizado por Li *et al.* [16] e Guo *et al.* [17], que assumem que a probabilidade de falha de cada enlace é conhecida pelo dono da rede, embora não apresentem como essas probabilidades foram calculadas, e não consideram falha de sítio. Li *et al.* e Guo *et al.* formulam o problema de otimização com objetivo de minimizar a distância entre os nós da rede e a probabilidade de falhas, que são similares aos fatores de latência e sobrevivência da rede.

Os trabalhos de Couto *et al.* [11, 18] se diferem ao modelar a sobrevivência por modelo determinístico e falha única, considerando falhas de enlaces e sítios. O objetivo do problema proposto é otimizar a latência máxima e resiliência de forma conjunta, de forma a explorar o compromisso entre esses dois fatores. Couto *et al.* utilizam como latência, o atraso de propagação entre os enlaces. Esta dissertação se baseia nos trabalhos de Couto *et al.*, pois visa aprofundar a análise do compromisso entre essas duas métricas e validar a aproximação por atraso de propagação.

Embora não aborde a otimização de posicionamento de DCs, Kokkinos *et al.* [10] complementam os trabalhos que otimizam a latência, pois fornecem uma base de valores que podem ser considerados como restrições máximas de latências. Eles analisam os requisitos de latência em termos do tempo de ida e volta (RTT) em redes de longa distância, para aplicação de um serviço de migração em tempo real de máquinas virtuais em um DC geodistribuído. Os valores apresentados variam de 5 ms a 200 ms, dependendo da plataforma de orquestração utilizada.

As duas literaturas seguintes contextualizam o posicionamento do *datacenter* alo-

cados em redes de operadoras de telecomunicações, focando em serviços específicos e posicionamento de conteúdo. Mandal *et al.* [19] afirma que as empresas de telecomunicações tiveram um aumento enorme de tráfego devido a novos serviços baseados em distribuição de conteúdo, como entrega de vídeo por demanda. Para lidar com esse tráfego e trazer o conteúdo para mais perto dos seus clientes, essas empresas têm considerado a implantação de uma rede de distribuição de conteúdo (CDN - *Content Delivery Network*) em sítios da rede *backbone* já existente das operadoras. Mandal *et al.* propõem a escolha dos sítios através de um problema de otimização dos fatores de otimização energética, posicionamento do conteúdo e replicação do conteúdo entre os sítios. O problema de programação inteira linear é resolvido pelo *software* IBM CPLEX para uma pequena rede e uma heurística é proposta e avaliada sobre a rede europeia de pesquisa, GEANT.

Diferentemente do posicionamento de uma CDN, Mehraghdam *et al.* [20] estudam o uso da capacidade de computação para melhorar a eficiência da própria rede da operadora. Mehraghdam *et al.* exploram o posicionamento de encadeamento de funções de rede (*network service chaining*) em redes de operadoras de telecomunicações. Alguns exemplos de funções de rede citados são NAT (*Network Address Translator*), *firewalls* e *load balancers*. Eles são partes constituintes da rede da operadora tradicionalmente implementadas em *middle-boxes*, que são implantados em caros *hardwares* específicos, difíceis de dar manutenção e de atualizar. Essas funções podem ser alocadas de diversas maneiras na rede, de acordo com a dependência que existe entre elas, definidas pelo fluxo de rede (*network flow*). Mehraghdam *et al.* propõem o posicionamento das funções de rede baseado em três objetivos: minimizar a ocupação dos enlaces, minimizar o número de sítios utilizados e, assim como esta dissertação, minimizar a latência entre todos os caminhos.

O presente trabalho se diferencia da literatura de referência de posicionamento de DCs, pois avalia o compromisso entre a latência e a resiliência no cenário de otimização da latência média entre os pontos de presença de uma rede. Isola-se essas duas métricas, ignorando outros fatores como custos de ativação do sítio e a matriz de tráfego dos serviços para fornecer uma visão mais focada dessas duas métricas consideradas em diversos trabalhos citados. Além disso, a latência é dada por atrasos entre os sítios medidos ao longo de três anos em uma rede real ao invés das abordagens de enlaces e atraso de propagação, permitindo que a análise seja mais prática e permitindo acrescentar a dimensão de tempo às conclusões.

Capítulo 3

Redes de Operadoras de Telecomunicações

Os sistemas de telecomunicações são responsáveis pelos enlaces físicos e a conectividade entre usuários através de serviços de voz, mensagens e de dados. A oferta desses serviços a muitos clientes espalhados por diversas localidades fez as operadoras de telecomunicações construírem redes com alta capilaridade e um núcleo de rede de alta capacidade. A evolução dos sistemas e convergência das redes com TI levou esse núcleo a adotar a tecnologia de comutação de pacotes, tornando esta uma rede *backbone* IP que não difere das redes que algumas literaturas se referem como redes inter-*datacenter*.

Essa rede interconecta diferentes sítios agregadores de tráfego proveniente dos usuários. Esse tráfego é advindo do fornecimento de última milha fixa para clientes residenciais ou empresariais e também do fornecimento de conectividade móvel. Esses sítios agregadores são estruturas físicas com sistemas de climatização, grupos geradores, banco de baterias, segurança e projetos especiais de alimentação de energia elétrica. Podem abrigar desde módulos de radiofrequência até servidores e roteadores. Segundo dados colhidos pelo autor junto à área de operações de uma das maiores operadoras de telefonia móvel do Brasil, essa empresa possui, apenas em dois estados, 1.953 sítios próprios que abrigam seus equipamentos das camadas de acesso, agregação e *backbone*.

As operadoras de telecomunicações estão atravessando um momento em que a receita por cliente está diminuindo, afetando a sua margem e lucratividade, devido ao custo operacional para manter a sua rede. É uma necessidade do mercado encontrar maneiras de oferecer novos serviços, de maior valor agregado, aproveitando ao máximo a infraestrutura das redes já instaladas e assim com baixo custo de implementação. Assim, buscam novos paradigmas para melhorar a eficiência operacional, reduzindo seus custos e aumentando a receita através de novas tecnologias na sua rede.

Um dos esforços das operadoras em implementar novos paradigmas em sua rede se baseia na técnica de virtualização das funções de rede (NFV - *Network Functions Virtualization*). Atualmente, a arquitetura de funções de rede está concentrada em equipamentos proprietários com *software* embarcado. Esse novo paradigma libera as funções de rede de *hardware* específico e permitem utilizar servidores de prateleira (COTS - *Commercial Off the Shelf*), que são utilizados em *datacenters* de TI. Essa abordagem é uma arquitetura mais dinâmica para reconfiguração da rede e permite entrega de novos serviços mais rapidamente. Taleb [21] faz uma breve descrição do momento das operadoras de telecomunicações e propõe uma arquitetura para implantação de uma nuvem na rede móvel, utilizando virtualização de funções. Mijumbi [22] apresenta a importância do NFV na redução dos custos das operadoras.

A entrada no mercado de computação na nuvem através de ofertas de *IaaS - Infrastructure as a Service* é um outro exemplo de novo serviço que as operadoras têm ofertado. Esse serviço se baseia em oferecer uma infraestrutura de processamento e armazenamento sob demanda, pago pelo uso e transparente para o cliente. Nesse cenário, a infraestrutura de *datacenter* é responsabilidade da operadora e o cliente apenas administra as máquinas virtuais. Kantarci e Mouftah [23] descrevem essa tendência ao propor uma arquitetura para implantação de *IaaS* sobre um *backbone* óptico. Nesse modelo, os clientes subcontratam a infraestrutura de TI, executando seus serviços dentro de máquinas virtuais (VMs - *Virtual Machines*) hospedadas na infraestrutura física do provedor, pagando-se pelo serviço um valor proporcional à sua utilização.

Outro serviço é a implantação de redes de distribuição de conteúdo (*CDN - Content Distribution Network*), através da colocação de servidores e *storages* em sítios das operadoras de telecomunicações. A Akamai, por exemplo, colocou mais de 20000 servidores de *cache* de conteúdo em mais de 1000 redes em aproximadamente 70 países, através de parcerias com as grandes operadoras [24]. O conteúdo é atualizado através da Internet e distribuído aos usuários através do *backbone* e da rede de acesso da operadora.

Os três serviços citados anteriormente compartilham algumas características em comum. Todos dependem de servidores alocados em *datacenters* e conexão com a Internet, todos apresentam restrição de latência e em todos os casos, é desejável que sejam resilientes a falhas e a desastres.

Todos esses serviços podem se beneficiar da infraestrutura de sítios e da capilaridade e alta capacidade da rede já instalada nas operadoras de telecomunicações. Assim, a escolha dos sítios para abrigar os servidores necessários pode ser modelada como um problema de posicionamento de *datacenters* geodistribuídos em uma rede em funcionamento.

No contexto deste trabalho, considera-se como uma rede de operadora de telecomunicações qualquer rede que interconecte nós ou sítios responsáveis por garantir a troca de dados. Assim, podem ser consideradas como objeto de estudo as redes de operadoras que possuam uma rede *backbone*, como provedoras de banda larga fixa, de serviços móveis e redes de provedoras de serviço de Internet (ISP - Internet Service Provider) .

O conceito de *datacenter* surgiu no âmbito da computação para atender à crescente necessidade das áreas de tecnologia da informação (TI). Veras [25] define o *datacenter* como um conjunto de componentes que permitem fornecer serviços de infraestrutura de TI, tipicamente processamento e armazenamento de dados em larga escala. A menor unidade de um *datacenter* é um bastidor (ou *rack*), que é um conjunto de servidores interligados com infraestrutura de alimentação e conexão.

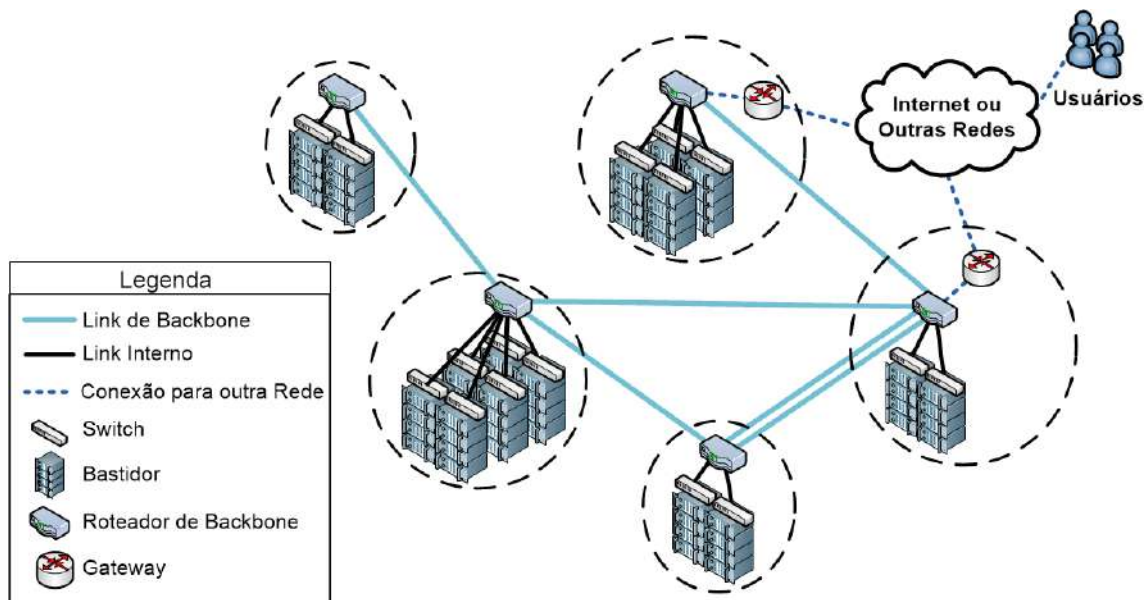


Figura 3.1: Topologia genérica de uma rede óptica conectando um *datacenter* geodistribuído.

A Figura 3.1 representa a topologia genérica de uma rede inter-DC. No contexto deste trabalho, pode-se considerar que seja a rede *backbone* de uma provedora de serviços de telecomunicações, neste caso formada por cinco pontos de presença que foram escolhidos para abrigar os bastidores. Os bastidores possuem conectividade entre eles e com as redes através de comutadores (*switches*) e roteadores de alta capacidade conectados através de uma rede em malha óptica. Também estão representados dois roteadores, chamados de *gateways*, que oferecem conectividade com a Internet ou outras redes, como por exemplo com a rede de acesso móvel da operadora. Note que apenas dois sítios possuem *gateways*. Assim, os servidores alocados nos outros três pontos de presença precisam obrigatoriamente passar por um desses

dois sítios para alcançar a Internet.

Este capítulo discutiu a importância e os possíveis ganhos da implantação de DCs em redes de operadoras de telecomunicações e os serviços que poderiam utilizar essa infraestrutura. Além disso, há a definição das características das redes que são objeto deste estudo e, por fim, fez-se a modelagem de uma rede genérica. No Capítulo 4, faz-se a modelagem do problema de otimização para posicionamento dos servidores e no Capítulo 5 esse problema é aplicado a uma rede real que atende aos requisitos definidos neste capítulo.

Capítulo 4

Formulação do Problema de Posicionamento de Servidores Geodistribuídos

O objetivo deste capítulo é formular o problema de otimização do posicionamento de servidores nos pontos de presença de uma rede de dados, tendo como parâmetro de entrada as medições de latência entre esses pontos. A unidade física de *data-center* considerada no problema é o bastidor, pois é a estrutura mínima necessária para que um servidor esteja funcional, ou seja, com fonte de energia e conectividade com outros servidores. Assim, a formulação que se segue considera a escolha dos pontos de presença e posicionamento dos bastidores nos mesmos. Para esse propósito, considera-se que exista uma rede fisicamente implantada com um serviço principal ativo como, por exemplo, conectividade à Internet e deseja-se implantar novos serviços que necessitam de capacidade computacional, como os descritos no Capítulo 3. Assim, deseja-se implantar nessa rede um *datacenter* que será utilizado para prover serviços restritivos em latência e que necessitam de redundância geográfica para obter maior resiliência. Esse cenário é típico das operadoras de telecomunicações atuais, que estão migrando para um modelo consolidado de telecomunicações e TI.

Este capítulo está organizado da seguinte forma. A Seção 4.1 descreve o impacto das falhas em uma rede e o modelo utilizado para considerá-las no problema. A Seção 4.2 apresenta o conceito de sobrevivência, utilizado para modelar como restrição do problema o que foi considerado como um conceito mais amplo de resiliência até aqui. A Seção 4.3 descreve o conceito de latência e a forma como a modelagem da mesma foi realizada. Por fim, a Seção 4.4 descreve o problema de programação linear inteira mista. O resultado desse problema determina o posicionamento de bastidores em uma rede, visando otimizar a latência entre os sítios ativos para um

dado grau de sobrevivência.

4.1 Modelagem de Falhas

Uma falha ocorre quando alguma parte do sistema apresenta um comportamento diferente do esperado em razão da ocorrência de algum evento não planejado. O impacto causado por uma falha depende de fatores como, por exemplo, o grau de redundância da rede. Existem casos de falhas, nos quais há pouco ou nenhum prejuízo, como no caso da falha de uma placa de um roteador em que há comutação automática para outra interface em funcionamento. Há por outro lado situações em que o serviço pode ficar indisponível, como em um duplo rompimento de enlaces físicos em uma rede com topologia em anel. No contexto deste trabalho, as falhas são divididas em duas categorias: falha na malha óptica e falha no sítio.

As redes ópticas são responsáveis por conexões de alta capacidade entre pontos distantes através de cabos de fibra óptica. Esses cabos estão expostos a intempéries, vandalismo e acidentes, o que pode acarretar em perda de desempenho por atenuação ou rompimento total. Para evitar que falhas nessa infraestrutura impactem severamente o serviço, são utilizadas estratégias como redundância através de outras rotas e recuperação por camadas superiores, como mudança no roteamento para considerar outros enlaces [9]. Um indicador usado para avaliar a eficiência de reestabelecimento do serviço é o tempo médio de recuperação (MTTR - *Mean Time To Recovery*), que é o tempo decorrido entre a percepção da falha e a sua resolução.

A Tabela 4.1 exibe um resumo dos eventos de rompimento óptico que ocorreram na rede da maior empresa de acesso de banda larga do Brasil. Os dados foram coletados pelo autor junto à área de operações da empresa, e representam os eventos consolidados da cidade do Rio de Janeiro, que possui cerca de 3.000 km de rotas de fibra óptica instaladas. A tabela mostra que as principais causas estão relacionados ao vandalismo, à queima de cabos por curto na rede da concessionária de energia e rompimentos por danos aos cabos sem causa definida, totalizando 58,34% das causas dos 84 eventos. Ao lado de cada causa está o MTTR medido, que variou entre 01:23 (uma hora e vinte e três minutos) e 04:25 (quatro horas e vinte e cinco minutos).

Os sítios proveem a infraestrutura necessária para abrigar equipamentos de rede, como comutadores e transmissores ópticos, ou *datacenters* com servidores e outros equipamentos necessários à computação. Esses sítios podem ser contêineres adaptados ou até prédios com infraestrutura redundante em climatização e alimentação. As falhas pontuais intra-sítios estão relacionadas ao mau funcionamento de algum equipamento, como um comutador (*switch*), que desconecta um conjunto de bastidores. Um evento que causa a desconexão de um sítio inteiro pode ser classificado como um desastre. Desastres são eventos de grande proporção que impactam uma

Tabela 4.1: Causas de falhas ópticas e tempo médio de solução

Descrição	% do Total	MTTR [hh:mm]
Rompimento por vandalismo	28,57%	03:26
Rompimento por queima do cabo	15,48%	03:19
Quebra de fibra na caixa de emenda	14,29%	03:26
Rompimento parcial da rota	7,14%	04:25
Atenuação do cabo óptico	7,14%	01:23
Rompimento por veículo com altura irregular	5,95%	03:50
Furto de caixa de emenda	4,76%	02:49
Rompimento por obras públicas	4,76%	04:07
Rompimento causado por concessionária	1,19%	03:46
Outras causas	10,72%	02:33
Total	100%	03:17

região geográfica e acarretam a interrupção de serviços. Devido à sua imprevisibilidade e impacto, existem vários estudos com propostas para mitigar o prejuízo que possam causar [10, 14, 26–28]. Exemplos de desastres variam desde eventos de falha de energia elétrica em uma cidade, incêndio em um *datacenter*, a eventos naturais de grandes proporções como furacões e terremotos. Por exemplo, em novembro de 2009, uma pane no sistema de transmissão de energia elétrica nacional impactou o fornecimento em 18 estados do Brasil para cerca de 60 milhões de consumidores [29]. Em 2008, o terremoto Wenchuan atingiu a China e deixou oito condados sem nenhum tipo de conexão após a destruição de mais de 28.000 km de fibra óptica e 142.000 postes. Impactos parecidos ocorreram após os ataques do 11 de setembro, em 2001, após as explosões em Londres em 2005 e devido ao furacão Katrina na costa leste dos Estados Unidos, em 2008 [28]. Nos últimos anos, além dos desastres físicos, tem sido mais comuns ataques a servidores de grande escala, causando interrupções em gigantes, como o Google [30].

A modelagem de falhas e desastres afetando enlaces e sítios é necessária para que o programa de otimização consiga avaliar a resiliência da rede. Habib *et al.* [13] dividem os modelos existentes em três categorias: determinístico, probabilístico e considerar as múltiplas camadas da rede. Os modelos determinísticos consideram que todas as partes da rede, seja enlace ou sítio, falham juntas se estiverem dentro da região afetada por um mesmo evento [14]. Uma abordagem determinística clássica é a da utilização de grupos de risco compartilhado, SRG - *Shared Risk Group*. Um SRG é definido como um conjunto de elementos suscetíveis a uma falha comum que desconecta todos os elementos de todo o grupo ao mesmo tempo. Esse modelo é adotado nesta dissertação e utilizado por outros trabalhos, como [18]. Cabe ressaltar que as causas de falhas descritas neste capítulo podem ser inteiramente modeladas como causas de desconexão de SRGs. Já os modelos probabilísticos assumem que os equipamentos dentro da mesma região de um evento falham com probabilidades

diferentes. As probabilidades são calculadas de acordo com diversos fatores, como dimensões do equipamento, especificações, área de exposição ao evento, tornando-o um modelo interessante para cenários mais específicos de falhas. As abordagens que consideram as diferentes camadas, avaliam o impacto de uma falha na camada óptica e seu efeito em camadas superiores, como rotas IP e conexões TCP. Ainda há pouca literatura modelando as falhas dessa maneira [18]. Além disso, é um modelo mais complexo que os dois citados anteriormente, no qual se precisa conhecer a topologia lógica da rede e os protocolos que ela utiliza e a relação entre falhas.

Além do modelo determinístico de SRG, este trabalho adota o modelo de falha única, em que apenas um enlace ou sítio falha por vez. Mukherjee [31] afirma que este modelo é utilizado em diversos trabalhos relativos a falhas em redes ópticas, pois é o cenário dominante em redes ópticas de transporte OTN (*Optical Transport Network*), significando resolver uma falha antes que uma nova falha ocorra na rede. A análise das causas de rompimento e o tempo de recuperação na Tabela 4.1 se mostra em concordância com esta afirmação, pois os eventos descritos afetam pontos específicos da rede e são resolvidos em um tempo relativamente curto. Já a desconexão de um sítio devido à ocorrência de um desastre é um fenômeno mais raro e devido à magnitude do evento, considera-se pouco provável que ocorram dois destes eventos simultaneamente. Assim, considera-se que o modelo de falha única é ideal para representar as falhas no problema de otimização.

4.2 Modelagem da Sobrevivência

Para avaliar a resiliência de um DC geodistribuído, é necessário utilizar uma métrica que possa quantificá-la. Liu e Kishor [32] discutem quantificação da resiliência de uma rede ou sistema através do valor de sobrevivência, definida como “a fração de recursos que continuam disponíveis após a incidência de falha única”. Esta abordagem é chamada de “sobrevivência de pior caso em [33]”. Aplicando esse conceito à modelagem de falha descrita em 4.1, a sobrevivência é considerada nesta dissertação como *a menor fração dos servidores que possuem caminho para um gateway após a falha de um único SRG, considerando todos os possíveis SRGs*.

Desta forma, o pior caso de sobrevivência é definido pelo SRG que desconecta o maior número de servidores da rede. Formalmente, a métrica de sobrevivência, s , utilizada neste capítulo pode ser calculada por:

$$s = \min_{f \in \mathcal{F}} \left(\frac{\sum_{k \in \mathcal{A}_f} r_k}{R} \right), \quad (4.1)$$

onde \mathcal{F} é o conjunto formado por todos os SRGs, R é o número total de bastidores,

\mathcal{A}_f é o conjunto das sub-redes alcançáveis após a falha do SRG f , e r_k é o número de bastidores na sub-rede alcançável $k \in \mathcal{A}_f$. Uma sub-rede alcançável é definida como uma parte da rede que está isolada das outras sub-redes, porém que possui acesso a pelo menos um *gateway*. Note que, após uma falha, a rede pode ser particionada em diferentes sub-redes.

De acordo com a definição fornecida acima, a métrica de sobrevivência assume valores no intervalo $[0, 1]$. Seu valor mínimo (zero) ocorre quando todos os bastidores são afetados por um mesmo SRG. O valor máximo, por sua vez, ocorre quando a rede tem um certo nível de redundância e o DC é distribuído de forma que nenhuma falha única de SRG pode desconectar nenhum bastidor.

Na Figura 4.1 está representada uma rede composta de 3 sítios, PoP A, PoP B e PoP C; 2 enlaces, 1 e 2; e um *gateway* localizado no PoP C. Cada sítio representa um SRG e abriga dois bastidores com o mesmo número de servidores. Os bastidores são considerados ativos quando têm acesso ao *gateway*. Considera-se que o “Enlace 1” falha, causando a desconexão do PoP B. Assim, apenas 4 bastidores continuam ativos e a sobrevivência depois dessa falha seria de $2/3$ ou aproximadamente 0,67.

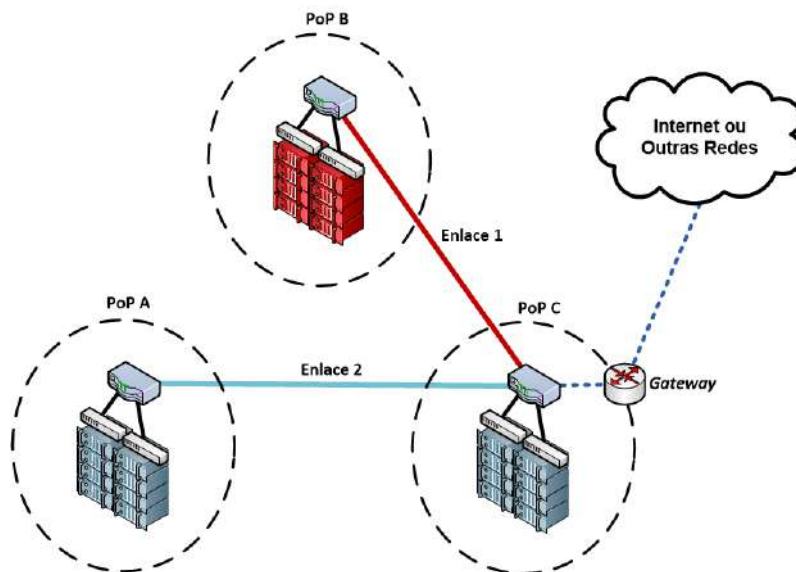


Figura 4.1: Representação do conceito de sobrevivência em uma rede de DCs.

4.3 Modelagem da Latência

A latência é definida como o tempo gasto para os dados trafegarem entre dois pontos em uma rede. Nesta dissertação, considera-se a latência medida pelo tempo RTT, que é o tempo entre o envio do sinal mais o tempo de confirmação que este sinal foi recebido. Ele é composto pelo tempo de propagação na fibra, o tempo de manipulação do sinal pela cadeia de equipamentos de transmissão entre os pontos

de origem e destino, o tempo de processamento dos protocolos envolvidos, atrasos de transmissão e de fila [34]. As medições de latência utilizadas estão descritas na Seção 5.2.

Considera-se neste trabalho que a capacidade de rede é bem provisionada, não havendo variações de tráfego que justifiquem grandes alterações nas medições. Essa premissa mostrou-se real durante os experimentos com as medições, conforme exposição no próximo capítulo. É uma condição válida do ponto de vista teórico, dado que o interesse de fornecer novos serviços atendendo à expectativa de qualidade de experiência (QoE) dos usuários não pode ser realizada sobre uma rede que apresente “gargalos” de desempenho.

Os atrasos descritos nesta seção são parâmetros de entrada do problema de otimização sob a forma de um valor único de latência de interconexão entre o ponto de origem e o ponto de destino. Formalmente, a latência entre dois sítios ativos é definida como:

$$l_{ij} = (\Delta_{ij}u_iu_j), \forall i, j \in \mathcal{D}, \quad (4.2)$$

onde \mathcal{D} é o conjunto de todos os sítios, ativos ou não; Δ_{ij} é a medição de atraso entre os sítios i e j e u_i é uma variável binária indicando se o sítio i está ativo ou não. Um sítio está ativo quando há pelo menos um bastidor instalado nele e há caminho para chegar em pelo menos um *gateway*. O objetivo do problema é escolher quais sítios devem estar ativos com os menores valores de latência de interconexão entre esses pontos. Os valores de l_{ij} e Δ_{ij} abrangem o atraso de caminho completo entre os sítios i e j e não de um enlace específico. Isso significa que mais de um enlace pode fazer parte desse caminho. É importante ressaltar que os valores não consideram situações de falhas, de forma a melhor analisar o compromisso entre latência e resiliência. Entretanto, após uma falha, caminhos alternativos podem ser escolhidos para permitir que os servidores acessem um *gateway*, o que possivelmente implicará em atrasos maiores.

4.4 Formulação do Problema de Otimização

Nesta seção, apresenta-se a modelagem da otimização do problema de posicionamento de servidores como uma programação linear inteira mista (MILP - *Mixed-Integer Linear Programming*).

A otimização utiliza como parâmetros a latência entre os sítios, o nível de sobrevivência desejado, a informação sobre SRGs e a topologia da rede utilizada. A saída do programa fornece a quantidade de servidores alocados para cada sítio para um dado nível de sobrevivência. A Tabela 4.2 resume as notações utilizadas, indicando o tipo de cada termo. As notações do tipo conjunto e parâmetro se referem aos dados

Tabela 4.2: Notações utilizadas no problema.

Notação	Descrição	Tipo
\mathcal{D}	Sítios candidatos	Conjunto
\mathcal{F}	SRGs	Conjunto
M_{fi}	Valor binário indicando se o SRG f desconecta da rede o sítio i	Parâmetro
Δ_{ij}	Medição da latência entre os sítios i e j	Parâmetro
L	Valor máximo de latência tolerado	Parâmetro
R	Número total de bastidores a serem posicionados	Parâmetro
Z_i	Capacidade (máximo número de bastidores suportados) do sítio i	Parâmetro
S	Valor mínimo de sobrevivência	Parâmetro
l_{ij}	Latência de interconexão entre os sítios ativos i e j	Variável
s	Sobrevivência do DC	Variável
x_i	Número de bastidores na localização i	Variável
u_i	Valor binário indicando se o sítio i está ativo ($x_i > 0$)	Variável

do problema, enquanto as variáveis são ajustadas pelo algoritmo de otimização.

Conforme descrito no Capítulo 1, deseja-se otimizar o posicionamento ao minimizar a média das latências entre todos os sítios ativos. Ao formular esse objetivo, chega-se à equação:

$$\frac{\sum_{i,j \in \mathcal{D}} l_{ij}}{(\sum_{i \in \mathcal{D}} u_i)(\sum_{i \in \mathcal{D}} u_i - 1)} \quad (4.3)$$

Entretanto, devido a multiplicação de variáveis no denominador, essa equação é não linear e não pode ser resolvida por um problema de programação linear. A fim de linearizar o objetivo, manteve-se apenas o numerador. O cálculo da média é feito posteriormente na apresentação dos resultados. Esta abordagem não traz prejuízo à análise, pois os sítios continuam sendo escolhidos com base na latência entre eles. A formulação MILP é apresentada a seguir:

$$\text{minimizar } \sum_{i,j \in \mathcal{D}} l_{ij} \quad (4.4)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{i \in \mathcal{D}} M_{fi} x_i - sR \geq 0 \quad \forall f \in \mathcal{F}. \quad (4.5)$$

$$l_{ij} - \Delta_{ij} u_i - \Delta_{ij} u_j \geq -\Delta_{ij} \quad \forall i, j \in \mathcal{D} \quad (4.6)$$

$$R u_i - x_i \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{D}. \quad (4.7)$$

$$u_i \leq x_i \quad \forall i \in \mathcal{D}. \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{D}} x_i = R. \quad (4.9)$$

$$x_i \leq Z_i \quad \forall i \in \mathcal{D}. \quad (4.10)$$

$$l \leq L \quad \forall i \in \mathcal{D}. \quad (4.11)$$

$$s \geq S \quad \forall i \in \mathcal{D}. \quad (4.12)$$

$$s \geq 0, \quad l \geq 0, \quad x_i \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{D}. \quad (4.13)$$

$$s \in \mathbb{R}; \quad l \in \mathbb{R}; \quad u_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{D}; \quad x_i \in \mathbb{Z}, \quad \forall i \in \mathcal{D}. \quad (4.14)$$

O objetivo dado pela Equação (4.4) minimiza o somatório da latência inter-sítios, l_{ij} , definida em 4.2. Como as Equações 4.1 e 4.2 não são lineares, a linearização de cada uma é dada respectivamente pelas Equações 4.5 e 4.6.

A Equação 4.5 força que o valor da sobrevivência s seja um fator multiplicativo do total de bastidores R e que sR seja igual ao número de servidores que estão ativos após uma falha, dado por $\sum_{i \in \mathcal{D}} M_{fi}x_i$. Assim, s representa a proporção de servidores que estão ativos após uma falha, em concordância com a definição estipulada, variando entre 0 e 1.

A Equação 4.6 força l_{ij} a ter o valor da latência medida entre os sítios i e j se ambos estiverem ativos. Caso contrário, $l_{ij} = 0$. Ou seja, essa equação garante que no objetivo só sejam considerados os valores de Δ_{ij} se ambos os sítios i e j estiverem ativos. Para considerar apenas sítios ativos no cálculo de l_{ij} , utilizam-se as variáveis binárias $u_i, i \in \mathcal{D}$. Assim, se u_i ou u_j possuírem valor zero para um determinado par de sítios, a restrição dada pela Equação 4.6 não será efetiva para esse par. Por exemplo, se $u_i = 0$ e $u_j = 1$, a restrição será $l_{ij} \geq 0$. Os valores binários u_i são definidos pelas Equações 4.7 e 4.8, fazendo $u_i = 0$ se $x_i = 0$ e $u_i = 1$ se $x_i > 0$. A Equação 4.12 garante que o posicionamento de bastidores possua, pelo menos, um determinado valor de sobrevivência. Como o objetivo é minimizar o somatório das latências inter-sítios, o programa irá escolher a melhor configuração de sítios ativos que garante o valor S com a menor perda em latência.

A Equação 4.9 restringe o número total de bastidores do DC (R), enquanto que a Equação 4.10 limita o número de bastidores (x_i) permitido em cada sítio i , respeitando sua capacidade Z_i . Finalmente, as Equações 4.13 e 4.14 definem, respectivamente, os limitantes inferiores e o domínio de cada variável.

Os parâmetros de latência Δ_{ij} são dados de entrada, obtidos de medições entre os sítios i e j da rede escolhida para análise. Os parâmetros binários M_{fi} , para um SRG f , são obtidos pela remoção do elemento referente a esse SRG, dado que o modelo de falha única é utilizado. Assim, após a remoção, verifica-se para cada SRG quais os sítios que possuem acesso aos *gateways*. Obviamente, se um sítio pertence a um determinado SRG, ele já é considerado como desconectado na análise desse SRG. Esse modelo pode ser estendido para o caso de falhas múltiplas, retirando mais de um elemento de rede na análise de um determinado SRG.

O problema de otimização formulado nesse capítulo é resolvido através do software de cálculo de otimização de variáveis IBM ILOG CPLEX 12.5.1. Os conjuntos e parâmetros definidos nesse Capítulo são configurados com dados referentes a rede

backbone de uma provedora de banda larga. A descrição da rede, os valores que os parâmetros e conjuntos assumem e a análise dos resultados são discutidos no próximo capítulo.

Capítulo 5

Avaliação da Rede e Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos do problema de otimização descrito no Capítulo 4. A Seção 5.1 descreve as características da rede *backbone* de um provedor de banda larga com pontos de presença em todos os estados do Brasil. As medições de latência dessa rede são utilizadas como parâmetros da formulação MILP. A descrição dessas medidas é feita na Seção 5.2. A Seção 5.3 descreve os valores utilizados para os parâmetros e conjuntos definidos na Seção 4.4. Por fim, os gráficos obtidos, a análise do compromisso entre latência e sobrevivência e as respostas às questões apresentadas na Seção 1.1 são discutidos na Seção 5.4.

5.1 Rede Analisada

A rede Ipê [35] é uma infraestrutura de rede dedicada à comunidade acadêmica brasileira, que interconecta as universidades, institutos de pesquisa e instituições culturais, conectando-as à Internet. Seu objetivo é atender a demanda das instituições em termos de tráfego de Internet de aplicações básicas (navegação *web*, correio eletrônico e transferência de arquivos), assim como tráfego de serviços, aplicações avançadas e projetos científicos, e também a demanda por experimentação de novas tecnologias, serviços e aplicações. Além disso, ela oferece serviços avançados como videoconferência e conexões ponto-a-ponto especiais entre instituições para atender a finalidades específicas. A rede Ipê é operada pela RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa) [36].

A infraestrutura da rede Ipê é composta por uma rede *backbone* que engloba 27 pontos de presença (PoPs), enlaces de interconexão entre esses nós com capacidades que vão até 20 Gbps e a rede de acesso que conecta os PoPs aos usuários finais. Os dados mais recentes, de agosto de 2016, mostram que 1.522 pontos de clientes possuem conexão com esta rede, atendendo aproximadamente 3,5 milhões de usuários [35]. Nesse contexto, a RNP assume o papel de uma empresa provedora de conectividade com a Internet com abrangência em todo o país, com números de

infraestrutura e de usuários compatíveis com uma operadora de banda larga residencial de abrangência nacional. Como essa é uma rede de pesquisa voltada ao meio acadêmico, é possível obter dados públicos sobre as características da rede, sobre medições de desempenho e relatórios de operação que não estão disponíveis pelas operadoras voltadas ao mercado residencial e corporativo. Assim, as simulações contidas neste trabalho utilizam os dados reais disponíveis sobre as topologias ativas com suas respectivas medições.

5.1.1 Topologia do Backbone

Desde a sua inauguração, em 2005, o *backbone* da RNP possui 27 sítios ou PoPs ativos que estão alocados de maneira a cobrir as 27 unidades federativas. Desses, 15 PoPs possuem conexão *peering* para troca de tráfego com outras redes, como Embratel, TIM/Intelig, Level3/Impsat e Google. Estes sítios proveêm os *gateways* da rede, ou seja, o tráfego de PoPs sem conexões externas obrigatoriamente deve passar por um desses *gateways* para chegar à Internet. Todos eles estão interconectados por uma rede óptica de transporte (OTN - *Optical Transport Network*) composta por 39 enlaces com capacidades que variam entre 1 Gbps e 20 Gbps.

Ponto de Presença

Um ponto de presença, ou PoP (*Point of Presence*), é um ponto físico de uma rede de comunicação que oferece conectividade com determinada região geográfica como, por exemplo, uma cidade. No contexto deste trabalho, considera-se que o PoP possui infraestrutura para abrigar pelo menos um bastidor e é utilizado como sinônimo para sítio ou nó. O PoP-MG, por exemplo, está localizado em Belo Horizonte, na Universidade Federal de Minas Gerais e é responsável por agregar o tráfego de todas as instituições desse estado e roteá-lo para a Internet ou para outros pontos do *backbone*. Sua infraestrutura dispõe de um sistema redundante de climatização com dois aparelhos de resfriamento de ar que operam de forma independente. O sistema de alimentação oferece redundância à concessionária de energia através de um sistema de *nobreaks* que suportam a carga por 10 minutos até a entrada de um motor-gerador com autonomia de 14 horas [37].

Enlaces

Os enlaces são os elementos responsáveis pela conexão física entre dois PoPs. Nesse *backbone*, todos os enlaces usam a fibra óptica como meio físico de transmissão. Os enlaces representam um fator crítico na operação da rede, pois estão fora dos sítios controlados pelo operador da rede, havendo uma maior exposição a falhas que podem advir de rompimentos ou atenuações no meio. Representam também um

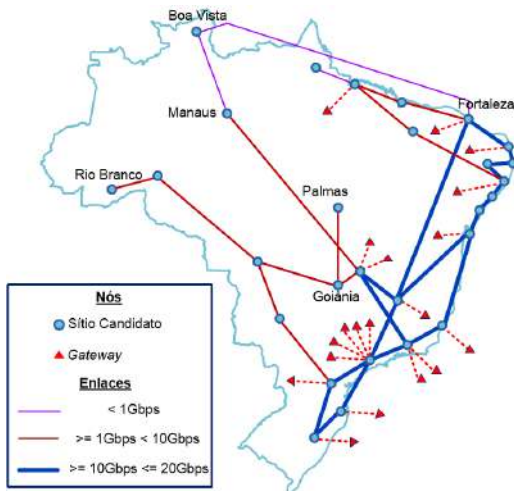
fator crítico na gestão da capacidade, pois o aumento da banda disponível depende de contratação junto a provedores e, em alguns casos, da implantação em campo de novos cabos. De forma geral, isso torna a sua reconfiguração mais complicada e menos dinâmica do que alterações na capacidade dos equipamentos ativos, que muitas vezes dependem apenas de configuração lógica ou troca de *hardware*. Por fim, é extremamente importante que os enlaces sejam bem dimensionados para o tráfego da rede. Se o consumo tender a exceder a capacidade, a rede apresentará problemas de desempenho como aumento de latência e perda de pacotes.

A Figura 5.1 apresenta os pontos de presença e enlaces, com sua capacidade de tráfego, que compõem a topologia do *backbone* da rede Ipê. Nela, estão representadas todas as documentações de topologia de domínio público que se tem conhecimento [35, 38–42], no período entre 2013 e 2016. Os *gateways* são representados como triângulos ligados aos pontos de presença e a quantidade é proporcional ao número de conexões com outras redes que dado sítio possui. Nesse período, a quantidade de enlaces passou de 33 para 39 e a capacidade agregada de tráfego no *backbone* aumentou mais de 57%, saindo de 214 Gbps para 337 Gbps.

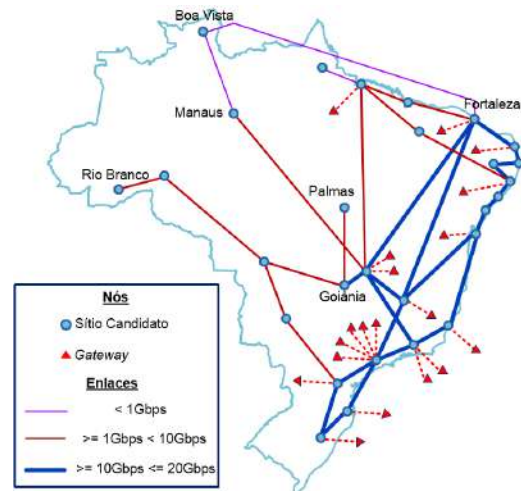
É importante ressaltar que a RNP disponibiliza os dados da topologia com o mês e ano em que a mesma foi implantada. Não há informação precisa sobre a data de ativação ou desativação de enlaces, ou a data exata da mudança de capacidade. Assim, neste trabalho convencionou-se que uma topologia seria considerada como operacional a partir do primeiro dia do mês referenciado pela RNP para a mesma. Além disso, considera-se que até o último dia do mês anterior, a topologia operacional é a topologia da última data referenciada. Exemplificando essa convenção, a topologia da Figura 5.1(f) é referenciada como “Agosto/2016” em [35]. Assim, considerou-se que a partir de 01/08/2016 essa era a topologia operacional e que até 31/07/2016 a topologia operacional era a apresentada na Figura 5.1(e), referenciada como “Fevereiro/2016” em [42]. Nas análises realizadas neste capítulo, sempre que possível, foram escolhidas datas no mesmo mês ou próximas à informada na referência da topologia, a fim de evitar erros em função de alterações não documentadas em domínio público ou advindos de modificações nos enlaces que tenham sido realizadas antes do mês de referência.

5.2 Medições

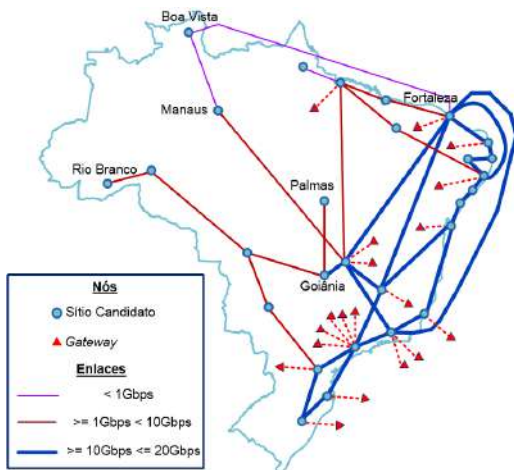
A gerência de operações da RNP realiza medições de desempenho e de disponibilidade da rede Ipê diariamente, com o objetivo de manter o bom funcionamento e gerar estudos para a gestão da capacidade. As medições são disponibilizadas publicamente, bem como relatórios gerenciais e operacionais. O repositório de arquivos



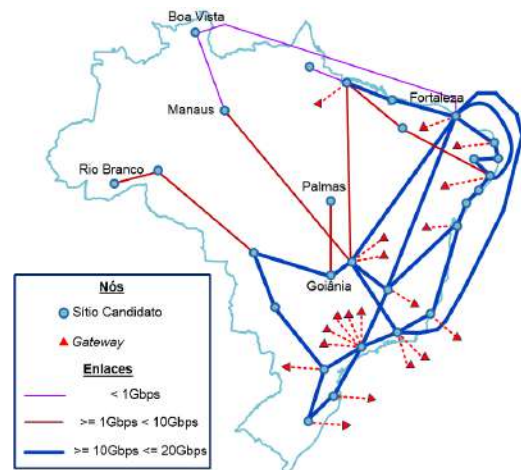
(a) Topologia da rede Ipê em Setembro de 2013 (33 enlaces).



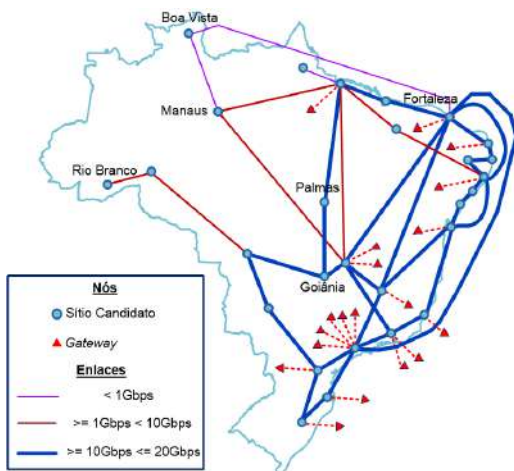
(b) Topologia da rede Ipê em Fevereiro de 2014 (35 enlaces).



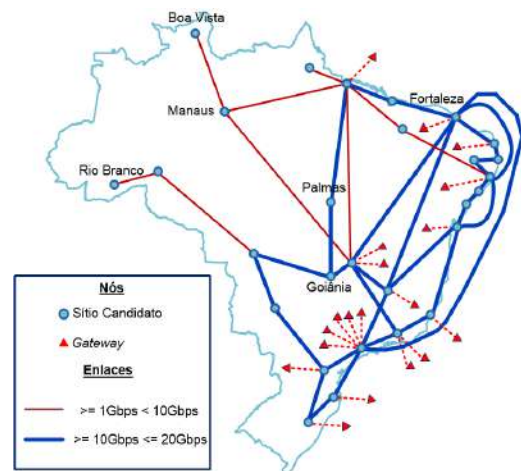
(c) Topologia da rede Ipê em Julho de 2014 (37 enlaces).



(d) Topologia da rede Ipê em Outubro de 2014 (37 enlaces).



(e) Topologia da rede Ipê em Fevereiro de 2016 (40 enlaces).



(f) Topologia da rede Ipê em Agosto de 2016 (39 enlaces), a mais atualizada.

Figura 5.1: Topologias de referência da rede Ipê.

é acessível através do sítio da RNP ¹. Essas medições são compostas por taxa de perda de pacotes e latência RTT em milissegundos entre PoPs.

A coleta dos indicadores de qualidade é feita por medição ativa dentro de cada um dos 27 PoPs através do envio de pacotes ICMP de teste a cada um dos demais. Os pacotes são enviados em intervalos aleatórios de distribuição exponencial no período entre 08:00 e 18:00 (GMT -3), em dias úteis. Um *script* centralizado é responsável por realizar a coleta de todas as medições e gerar um arquivo diário para cada PoP. Assim, a cada mês tem-se em torno de 22 diretórios, dependendo da quantidade de dias úteis, nomeados com a data dos dados. Cada diretório possui 27 arquivos, um para cada PoP. Cada um desses arquivos possui 26 linhas, as quais representam a medição consolidada dos indicadores utilizados a partir daquele PoP para cada um dos outros [43]. Cada linha de um arquivo possui os seguintes indicadores:

- POP_DEST: Nome do PoP para o qual foi feita a medição;
- PERDA_MDN: Perda mediana de pacotes entre os dois PoPs;
- LAT_MIN: Latência mínima do dia entre os dois PoPs;
- LAT_MED: Latência média do dia entre os dois PoPs;
- LAT_MAX: Latência máxima do dia entre os dois PoPs;
- STD_DVN: Desvio padrão da média diária;
- LAT_10_PERC: É o valor \mathcal{X} para o qual $Prob(Lat \leq \mathcal{X}) = 10\%$, ou seja, engloba os 10% menores valores da amostra;
- LAT_MDN: É a latência mediana, também conhecida como 50-percentil. É o valor \mathcal{X} para o qual $Prob(Lat \leq \mathcal{X}) = 50\%$;
- LAT_90_PERC: É o valor \mathcal{X} para o qual $Prob(Lat \leq \mathcal{X}) = 90\%$.

5.3 Escolha de Parâmetros e Conjuntos

Os valores Δ_{ij} , definidos na Tabela 4.2, são parametrizados pelas medições reais de latência disponibilizadas pela RNP, apresentadas na seção anterior. É importante notar que $\Delta_{ij} \neq \Delta_{ji}$, embora os valores sejam comumente muito próximos, devido à configuração simétrica utilizada em redes de longa distância. Esses valores de entrada são variados ao longo do experimento para determinar diferentes cenários como, por exemplo, análises diárias e mensais.

¹<https://www.rnp.br/servicos/conectividade/rede-ipe>

O parâmetro S assume valores entre $\frac{1}{|\mathcal{D}|}$ e $1 - \frac{1}{|\mathcal{D}|}$. Na rede utilizada, $|\mathcal{D}| = 27$, logo $\frac{1}{|\mathcal{D}|} \cong 0,037$. Fazendo uma aproximação, sem prejuízo aos resultados, utilizaram-se os valores compreendidos na faixa $0,05 \leq S \leq 0,95$, com passo de 0,05. Esses valores representam a razão entre os bastidores que continuam ativos após a ocorrência de uma falha que desconecta o SRG e o total de bastidores do DC.

Os valores R , Z_i e L representam, respectivamente, número total de bastidores a ser posicionados, a capacidade de bastidores do sítio i e a latência máxima entre dois sítios, foram escolhidos de maneira a não impor restrição prática ao problema, permitindo que seja analisado um cenário mais amplo, dando maior foco no comportamento da rede. Assim, R e Z_i foram configurados com o mesmo valor de 1.024, determinando que todos os sítios têm capacidade para abrigar todos os bastidores. O valor de L foi configurado como 50 s, que é três ordens de grandeza maior que a média das medições de latência.

Os conjuntos \mathcal{D} e \mathcal{F} são calculados de acordo com a topologia parametrizada. A topologia varia ao longo das simulações em concordância com as variações reais que ocorreram na rede Ipê entre 2013 e 2016, conforme a Figura 5.1.

5.4 Avaliação

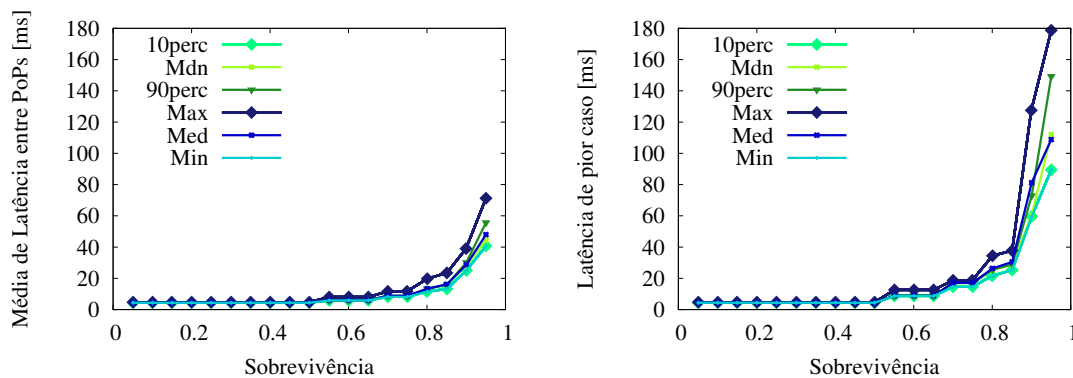
O problema MILP é resolvido, neste trabalho, utilizando a ferramenta IBM ILOG CPLEX 12.5.1 [44]. O *hardware* utilizado foi um computador com processador Intel Core i5, 4GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 16.04. A execução de cada cenário levou em torno de um minuto. São consideradas as topologias apresentadas na Seção 5.1, as medições de latência da rede Ipê, mostradas na Seção 5.2 e os parâmetros e conjuntos da Seção 5.3. Cada ponto de presença ou enlace é considerado um SRG. Conforme exposto na Seção 4.2, é utilizado o modelo de falha única, o que significa que cada elemento da rede (sítio ou enlace) falha sozinho, ou seja, não se considera a falha de dois ou mais elementos simultaneamente. É importante notar que esse modelo determina as características das falhas e não o das desconexões, dado que uma única falha de enlace ou nó pode desconectar diversos nós e enlaces da rede.

5.4.1 Comportamento com Granularidade Diária

O compromisso entre latência e sobrevivência é analisado, primeiramente, resolvendo o MILP para um dia de medições e para as 6 formas de latência conforme a Seção 5.2. Posteriormente, nesta seção, os dados serão consolidados e analisados por um período maior do que um dia. Utilizou-se a topologia mais atual documentada pela RNP, que é a de agosto de 2016, apresentada na Figura 5.1(f). Considerando

as premissas da Seção 5.1, a escolha desta topologia exige que só se considerem as medições de latência a partir de 01 de agosto e preferencialmente o mais próximo possível a este mês. Foram escolhidas duas datas com espaço de pelo menos 30 dias entre elas para evitar que um mesmo evento de curta duração influenciasse a comparação de comportamento. Arbitrariamente, optou-se pelas duas primeiras terças-feiras de agosto e setembro, dias 02 de agosto de 2016 e 06 de setembro de 2016.

Nas Figuras 5.2 e 5.3 estão os resultados obtidos para as medições de latência mínima, média, máxima, 10-percentil, mediana e 90-percentil de 02 de agosto de 2016 e de 06 de setembro de 2016, respectivamente. Cada uma dessas figuras é composta por dois gráficos, o primeiro com a média de latência por par de sítio versus a sobrevivência e o segundo mostra a maior latência entre pares de sítio versus a sobrevivência. No restante do trabalho, essa maior latência será referenciada como “latência de pior caso”, para evitar confusão com a curva de latência máxima dos gráficos, que é obtida após a otimização utilizando as medições do atraso máximo entre dois sítios quaisquer.



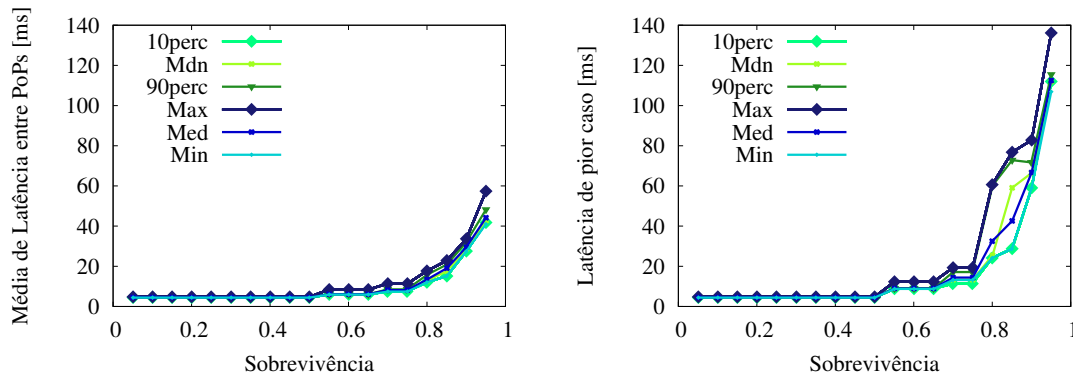
(a) Média de latência entre os pares de sítios, (b) Latência de pior caso entre os pares de sítios, considerando as 6 medições de latência para 02 considerando as 6 medições de latência para 02 de agosto de 2016.

Figura 5.2: Resultados do problema de otimização com os dados do dia 02 de agosto de 2016.

As Figuras 5.2(a) e 5.3(a) mostram o resultado da otimização da função objetivo definida na Equação 4.4 dividida pela quantidade de pares de sítios ativos, conforme apresentado no denominador da Equação 4.3. Cada curva do gráfico corresponde ao valor de um tipo de medição da latência diária, conforme exposto na Seção 5.2.

Observando o comportamento das curvas das Figuras 5.2(a) e 5.3(a), verifica-se que a variação da sobrevivência entre 0,05 e 0,5 não causa variação na média de latência entre os PoPs. Esse comportamento ocorre porque a solução que minimiza a média de latência para uma sobrevivência de até 0,5 é dada por dois sítios ativos. Assim, não há variação no caminho entre os sítios ativos, sendo contabilizado o

mesmo valor de latência entre esses dois sítios para todos os valores de sobrevivência entre 0,05 e 0,5. Nessa faixa de valores, todos os bastidores são abrigados em apenas dois sítios e a sobrevivência varia em função da quantidade de bastidores no pior SRG.



(a) Média de latência entre os pares de sítios, (b) Latência de pior caso entre os pares de sítios, considerando as 6 medições de latência para 06 considerando as 6 medições de latência para 06 de setembro de 2016.

Figura 5.3: Resultados do Problema de Otimização com os dados de 06 de setembro de 2016.

Por exemplo, considerando a curva de latência média em 06 de setembro (Figura 5.3(a)) para uma sobrevivência de 0,45, a solução ótima é posicionar 461 servidores em Maceió e 563 servidores em Recife. A latência no enlace Maceió-Recife é de 4,50 ms e a latência no enlace Recife-Maceió é 4,53 ms. Assim, considerando o caso de pior falha nesse caso, que seria a desconexão de Recife, chega-se à sobrevivência de 0,45 dos bastidores com a média da latência entre os PoPs de 4,51 ms. Considerando os resultados para a sobrevivência de 0,20 na curva de latência média na mesma curva da Figura 5.3(a), os sítios escolhidos continuam sendo Recife e Maceió, com a mesma latência média entre eles, de 4,51 ms, porém com 205 bastidores ativos em Maceió e 819 bastidores ativos em Recife. Assim, quando o pior SRG falha, no caso o sítio de Recife, apenas 205 dos 1024 bastidores continuam ativos, determinando a sobrevivência de 0,20.

Outro comportamento que pode ser observado nas curvas das Figuras 5.2(a) e 5.3(a) na faixa de valores de sobrevivência entre 0,05 e 0,5 é que, além de não haver variação de latência para uma mesma curva, não há grandes variações da média de latência entre as diferentes curvas: a diferença entre a curva de latência mínima e máxima é de 0,37 ms, o que representa uma variação de 8,4%. Esse comportamento é explicado por duas características da rede. Verificou-se que essa “estabilidade” entre as medições da latência está relacionada ao fato de nessa faixa de sobrevivência serem escolhidos sempre dois sítios conectados por um enlace direto entre eles, o que reduz a exposição que causam a variação dos fatores

Tabela 5.1: Sítios ativos e média de latência entre eles para as 6 curvas de latência, considerando a sobrevivência de bastidores entre 0,05 e 0,50.

Curva	PoP 1	PoP 2	Média de Latência entre os PoPs
Latência Mínima	Recife	Maceió	4,40 ms
Latência Média	Recife	Maceió	4,51 ms
Latência Máxima	Goiânia	Brasília	4,77 ms
Latência 10-percentil	Recife	Maceió	4,45 ms
Latência Mediana	Recife	Maceió	4,49 ms
Latência 90-percentil	Recife	Maceió	4,53 ms

que impactam a latência, expostos na Seção 4.3. Além disso, a capacidade desse enlace está bem dimensionada ao tráfego, evitando picos de latência causados por congestionamentos na rede. Por fim, a existência, na topologia, de múltiplos sítios com valores próximos de latência de interconexão garante que se um par de sítios tiver degradação da latência para uma das curvas de medição, outro par de sítios seja escolhido, garantindo a estabilidade entre as curvas.

Para exemplificar essa análise, a Tabela 5.1 mostra as saídas do problema de otimização considerando valores baixos de sobrevivência, entre 0,05 e 0,50, para cada uma das 6 curvas de latência do cenário da Figura 5.3(a), com os sítios escolhidos e a latência entre os mesmos. Para as curvas de latência mínima, média, 10-percentil, mediana e 90-percentil, foram escolhidos os sítios localizados em Recife e Maceió, que estão afastados por aproximadamente 250 km. Apenas ao considerar-se a curva de latência máxima, houve desempenho melhor da média de latência entre Brasília e Goiânia, 4,77 ms, acarretando na escolha desses dois sítios. A média da latência entre Recife e Maceió, considerando a curva de latência máxima, no dia 06 de setembro foi de 7,14 ms. Essa variação pode ter ocorrido, por exemplo, por alguma falha no enlace que liga os dois sítios, obrigando o redirecionamento do tráfego por outros sítios, ou por um aumento pontual do tráfego. Esta variação entre a medição de latência máxima e as outras latências mostra que não é recomendável realizar a otimização do projeto de posicionamento dos servidores considerando as medições de latência máxima, pois uma amostra ruim ao longo do dia já define o valor da medição.

Analisando o comportamento para os valores de $S > 0,50$, nas Figuras 5.2 e 5.3, verifica-se que, em ambos, para todas as curvas de latência, há um pequeno incremento de latência para um requisito razoável de sobrevivência. Isso ocorre porque para valores nessa faixa ainda é possível escolher sítios com menor latência de interconexão. Normalmente esse resultado é obtido com a escolha de sítios mais próximos e com conexão direta, isto é, sem passar por outros PoPs. Quando a sobrevivência passa a ser mais restritiva, é necessário escolher sítios com valores mais altos de

latência de interconexão, consequência da maior distância entre os sítios, de enlaces de menor capacidade ou ainda pelo caminho entre os sítios passar por outros pontos de presença. Assim, para exigências maiores de sobrevivência, pequenos incrementos na sobrevivência fazem com que tanto a média de latência entre os sítios quanto a pior latência entre eles cresçam mais rapidamente. Por exemplo, considerando a curva de latência média na Figura 5.2, para uma sobrevivência de 0,75, são escolhidos quatro sítios da região nordeste do Brasil com média de latência entre eles de 8,82 ms e com a pior latência de interconexão de 17,12 ms, entre os pontos de presença de Aracaju e Campina Grande. Eles estão separados por cerca de 600 km e o caminho entre eles passa pelos dois outros sítios escolhidos nessa solução, Recife e Maceió. Quando, para a mesma curva de latência média da Figura 5.2, o requisito de sobrevivência aumenta 13,3% para 0,85, são escolhidos sete sítios ainda na região nordeste, com média de latência entre eles de 16,23 ms, um aumento de 84%. A pior latência é entre os pontos de presença de Aracaju e Fortaleza, que estão distantes cerca de 1200 km e cujo caminho principal passa pelos outros cinco sítios escolhidos. Ao aumentar o requisito de sobrevivência em 11,7%, de 0,85 para 0,95 na mesma curva de latência média, são escolhidos vinte e um sítios de todas as regiões do Brasil. A média da latência entre os sítios aumenta 295%, para 41,96 ms, e a pior latência é a conexão do ponto de presença de Florianópolis para o de Teresina, com valor de 108,78 ms. Esses dois pontos estão conectados por diversos enlaces e diversas possibilidades de caminhos.

O comportamento descrito acima de que valores razoáveis de sobrevivência provocam poucas alterações no eixo da latência e que para valores mais exigentes de sobrevivência produz-se um crescimento rápido da latência também foi observado por Couto *et al.* em [11]. Couto *et al.* definiram como objetivo a minimização da latência máxima de conexão entre sítios, enquanto este trabalho otimiza a latência dos caminhos entre todos os sítios ativos, através da minimização da média da latência de interconexão. Além disso, Couto *et al.* fizeram uma aproximação do valor de latência entre os sítios considerando apenas o atraso de propagação dos enlaces. O comportamento entre latência e sobrevivência descrito neste trabalho é consistente com o que valida a utilização da aproximação da latência pelo atraso de propagação para análise de comportamento. Este trabalho estende o trabalho de Couto *et al.*, pois, além de confirmar o comportamento, apresenta valores reais de latência entre os sítios, o que permite que os dados sejam mais consistentes para utilização em um projeto de posicionamento de um sistema específico.

Outro comportamento interessante observado nas Figuras 5.2 e 5.3 para requisitos mais altos de sobrevivência é o de que pequenos ganhos de sobrevivência exigem a escolha de pontos mais suscetíveis à variação dos fatores que contribuem para o atraso, descritos na Seção 4.3, ocasionando o distanciamento entre as diferentes

curvas de latência. Inversamente, para valores mais baixos de sobrevivência, as curvas de latência mínima, média, 10-percentil, mediana e 90-percentil possuem valores quase idênticos de média de latência de interconexão e pior latência, refletindo a estabilidade da rede. Por exemplo, no dia 06 de setembro de 2016, considerando a latência média entre sítios para o requisito de sobrevivência de 0,75, o valor considerando 10% das amostras (curva 10-percentil) foi 7,47 ms, considerando 90% das amostras (curva 90-percentil) foi de 8,52 ms e considerando o valor máximo das amostras diárias (curva latência máxima) foi de 11,35 ms. O descolamento da curva de latência máxima em relação às outras é um indício de que houve uma variação pontual ao longo do dia prejudicando uma ou poucas medições. Assim, verifica-se que no projeto de avaliação deve-se definir o quanto se deseja ser restritivo para latência, condicionando o posicionamento dos sítios à escolha da curva de latência que melhor atende essa restrição. Além disso, é importante considerar uma granularidade de dados maior do que de um dia para evitar o impacto de eventos pontuais.

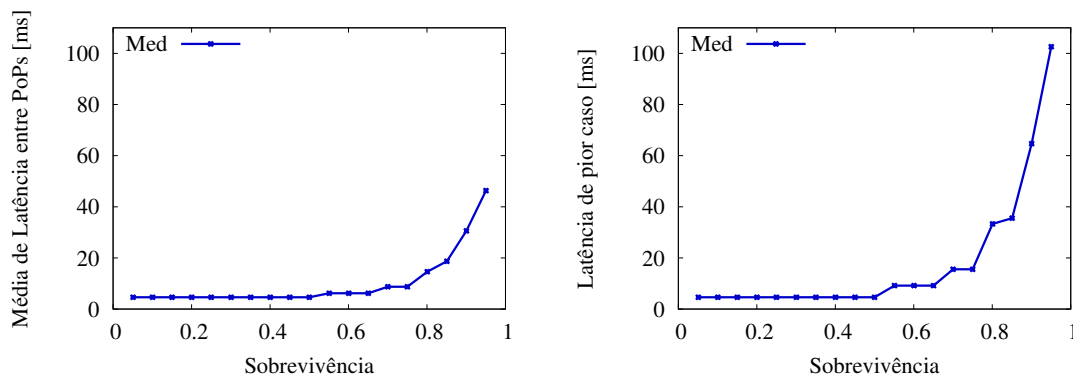
5.4.2 Comportamento com Granularidade Mensal

Na subseção anterior, concluiu-se que variações na rede ao longo do dia, como um pico de tráfego ou o rompimento de um enlace óptico, podem impactar a otimização do posicionamento dos bastidores. Em especial, na faixa de valores mais altos de sobrevivência, os quais estão mais expostos a variações devido à escolha de sítios mais distantes, de enlaces de menor capacidade e de mais SRGs sujeitos a falhas. Isso pode acarretar em uma otimização baseada em valores pontuais, fazendo com que os sítios escolhidos sejam ótimos para um cenário muito particular de curto prazo e não para a maior parte do tempo de operação. Uma vez definidos os sítios que abrigarão os bastidores do DC, há um custo alto de implantação para executar o projeto e por isso deseja-se que o posicionamento dos sítios seja otimizado sem muita influência de desvios pontuais. Assim, é importante verificar se o comportamento obtido com granularidade diária da latência continua válido observando os dados por um prazo maior. Nesta subseção, propõe-se consolidar as medições de um mês para mitigar o impacto dos desvios de latência no curto prazo.

A análise do compromisso entre latência e sobrevivência é feita com a consolidação da latência do mês de Setembro de 2016. O mês foi escolhido por ser o mês posterior à data de liberação da topologia de referência mais recente, a de Agosto de 2016. Descartou-se utilizar as medições de latência mínima e máxima, pois esses valores considerariam a melhor e a pior amostra de todo o mês. A consolidação das latências 10-percentil, mediana e 90-percentil envolve a análise estatística das medições, para as quais seria mais assertivo considerar os valores de todas as amostras de medição realizadas na rede e não apenas o valor disponibilizado pela RNP,

consolidado para um dia, e por isso estas latências também foram descartadas. O valor de latência média é um valor mais simples de se consolidar, através de média aritmética e, conforme verificado na Subseção 5.4.1, seu comportamento em relação à sobrevivência serve para descrever também o comportamento das outras curvas.

A Figura 5.4 apresenta os resultados do MILP utilizando a consolidação, por média aritmética, das medições da latência média diária entre pares de sítios. A Figura 5.4(a) apresenta os resultados em termos da média de latência entre os PoPs escolhidos versus a sobrevivência. A Figura 5.4(b) mostra o comportamento da latência de pior caso entre os pares de sítios escolhidos em relação à sobrevivência. É possível verificar que valores baixos e razoáveis de sobrevivência causam pouco impacto na média da latência de interconexão e na latência máxima. Em especial, o comportamento de $S \leq 0,50$ é o mesmo descrito para a granularidade diária, com a escolha de dois sítios para todos os valores de sobrevivência nessa faixa e variando a quantidade de bastidores no pior SRG para determinar os diferentes valores de sobrevivência. Já para requisitos altos de sobrevivência, tanto a média de latência de interconexão quanto a latência máxima sofrem grande acréscimo para pequenos ganhos na sobrevivência. Assim, confirma-se que o comportamento entre latência e sobrevivência obtido com a análise dos dados diários se mantém ao considerar períodos mais extensos de medição, neste caso, o período mensal.



(a) Latência média entre PoPs escolhidos, para (b) Latência de pior caso entre PoPs escolhidos, latência média de setembro de 2016. para latência média de setembro de 2016.

Figura 5.4: Resultados do Problema de Otimização utilizando como entrada a latência média entre PoPs de Setembro de 2016

5.4.3 Comportamento Dinâmico da Escolha da Solução

Após a implantação de um projeto de posicionamento de servidores, é desejado que a solução seja eficiente ao longo do tempo, e a longo prazo, em função do valor de investimento despendido no projeto. Nas Subseções 5.4.1 e 5.4.2, foi utilizada apenas a topologia mais recente da rede Ipê, de Agosto de 2016. Nesta subseção

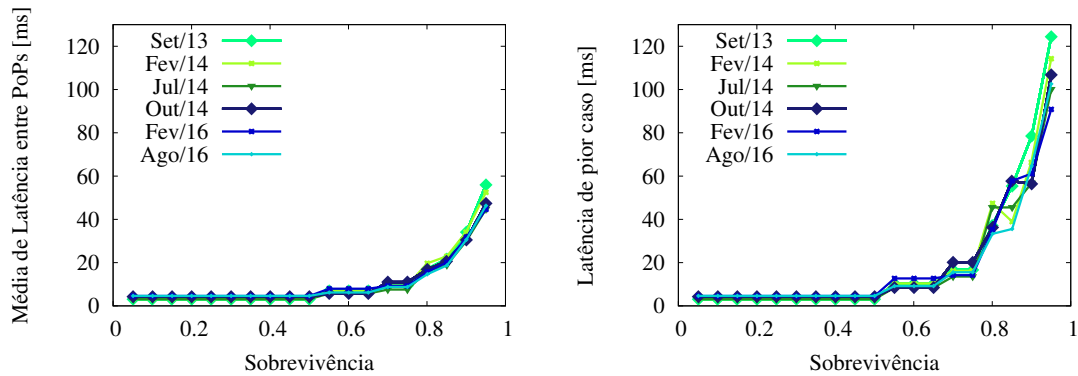
analisa-se o comportamento da latência e da sobrevivência considerando diferentes topologias da rede Ipê. Foram utilizadas 6 topologias de referência da rede Ipê entre setembro de 2013 e agosto de 2016, apresentadas na Figura 5.1, e as medições da latência média consolidadas do mês posterior à data especificada como liberação dessas topologias. Como o objetivo principal da rede Ipê é prover conectividade à Internet para as instituições de ensino e pesquisa, as alterações dos enlaces ópticos e de capacidade que ocorreram ao longo do tempo foram planejadas para atender às necessidades desse serviço primário. Assim, é possível analisar como a evolução da rede influencia os resultados de otimização de posicionamento de servidores do DC geodistribuído.

É resolvido um problema de otimização para cada uma dessas topologias de referência. A Figura 5.5 mostra os resultados da média de latência entre sítios versus sobrevivência na Figura 5.5(a) e a latência máxima dos pares de sítios versus a sobrevivência na Figura 5.5(b). O parâmetro de latência utilizado foi a média aritmética das medições diárias de latência média. Cada curva representa uma topologia de referência com os dados de latência do mês subsequente ao especificado para a topologia. A análise dos gráficos das Figuras 5.5(a) e 5.5(b) confirma que o comportamento obtido nas Subseções 5.4.1 e 5.4.2 foi mantido para todas as topologias. Para requisitos razoáveis de sobrevivência, um ganho expressivo de sobrevivência impacta pouco na média das latências de interconexão e na latência máxima. Para requisitos altos de sobrevivência, pequenos ganhos nesse parâmetro provocam grande aumento na média da latência e na latência de pior caso. Além disso, os valores da média das latências entre sítios para um mesmo valor de sobrevivência foram próximos em todas as topologias, mesmo com o aumento de 18% na quantidade de enlaces e de 57% na capacidade, entre Setembro de 2013 e Agosto de 2016. Isso mostra que a conectividade entre sítios está bem dimensionada ao longo de todo o período e que a evolução da capacidade da rede manteve próximos os valores de latência entre os PoPs.

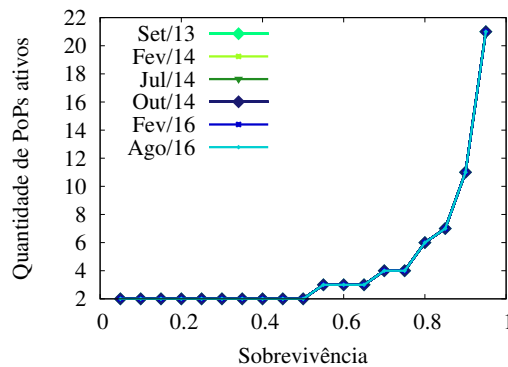
Por exemplo, considerando a sobrevivência de 0,75 para as duas curvas mais distantes. Na topologia de Julho de 2014 e dados de latência média de Agosto de 2014, os sítios escolhidos foram Maceió, Recife, Aracaju e Campina Grande com a média de latência entre sítios de 7,56 ms. Já na topologia de Outubro de 2014 e dados de latência de Novembro de 2014, os sítios escolhidos foram os mesmos com média de latência de 11 ms. Essas duas topologias possuem a mesma quantidade de enlaces e a capacidade dos enlaces desses quatro sítios não sofreu modificação, indicando que pode ter havido um aumento de tráfego ao longo dos meses que causou a diferença na média de latência entre eles.

A Figura 5.5(b) mostra que para requisitos altos de sobrevivência, as topologias apresentaram maior variação da latência máxima. Analisando os resultados da pior

latência de interconexão entre as topologias de Agosto de 2016 e Outubro de 2014 para a sobrevivência de 0,85, verifica-se que em ambas foram escolhidos os mesmos sítios, todos na região nordeste, porém a latência máxima passou de 57,66 ms entre os sítios de Aracaju e Natal em Outubro de 2014 para 35,56 ms, entre os sítios de Salvador e Teresina, em Agosto de 2016. Observando as modificações da topologia na Seção 5.1, verifica-se que houve adensamento de rotas ópticas no nordeste, com a implantação de um enlace entre Salvador e Recife. Por fim, o gráfico da Figura 5.5(c)



(a) Média de latência entre os pares de sítios, (b) Latência de pior caso entre pares de sítios, comparativo entre as topologias.



(c) Comparativo da quantidade de sítios escolhidos.

Figura 5.5: Comparação de resultados para dados de entrada da latência média para as 6 topologias de referência.

mostra uma comparação da quantidade de sítios escolhidos versus a sobrevivência em cada uma das topologias de referência. Apesar da otimização não controlar diretamente esta métrica, ela é influenciada pela distribuição de bastidores em sítios obtida do MILP. O comportamento da curva produzida mostra que quando o DC se torna amplamente distribuído, é necessário um aumento cada vez maior de sítios ativos para conseguir um pequeno aumento de sobrevivência. Isso é consoante com os resultados obtidos ao longo deste capítulo para o comportamento da média de latência e da pior latência versus a sobrevivência. Outro resultado interessante é que todas as 6 topologias tiveram o mesmo número de sítios ativos para cada valor

de sobrevivência. Isso indica que a quantidade de sítios é determinada por um fator relacionado apenas à sobrevivência dos bastidores.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Esta dissertação estudou o posicionamento de servidores de um *datacenter* geodistribuído sobre a rede *backbone* de uma provedora de serviços de banda larga acadêmica, através do posicionamento de bastidores em pontos de presença já existentes. O trabalho é motivado pelo momento atual em que vivem as operadoras de telecomunicações, que encontram-se em uma transição de provedoras de conectividade para provedoras de serviços integrados de tecnologia da informação (TI) e telecomunicações. Assim, foi realizada uma caracterização dos serviços que motivam a implantação de DCs em redes de operadoras de telecomunicações e as vantagens competitivas intrínsecas dessas empresas, como a capilaridade da rede e os enlaces de alta capacidade.

Identificou-se a necessidade de que esses serviços sejam resilientes a falhas a fim de garantir uma melhor percepção de qualidade aos usuários. Assim, considerou-se neste estudo a implantação do *datacenter* de forma geodistribuída, alocando bastidores em diferentes sítios da operadora. Ao fazer isso, a latência que as aplicações irão experimentar torna-se um compromisso e um ponto importante a ser considerado na decisão dos locais escolhidos para abrigar esses bastidores.

Nesta dissertação de mestrado, propôs-se abordar esse tema como um problema de programação linear inteira mista com objetivo de minimização da latência entre os pares de sítios. Para modelar as falhas e a sobrevivência, considerou-se a abordagem determinística de SRGs (*Shared Risk Groups*), que são grupos de elementos sujeitos a uma mesma falha. Agregando o conceito de SRG ao modelo de falha única, a sobrevivência foi quantificada como a fração dos bastidores que continuam disponíveis após a falha de um único SRG, considerando todos os possíveis SRGs do DC geodistribuído.

O problema de otimização foi aplicado sobre uma rede operacional, utilizando os parâmetros de topologia e medições reais de latência medida através do RTT (*Round Trip Time*). A rede Ipê foi escolhida por ser uma rede provedora de banda larga com uma estrutura de *backbone* inter-sítios de abrangência nacional. Por ser

operada pela RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa), os dados necessários estão disponíveis publicamente.

As simulações de otimização foram feitas para diversos cenários de topologia e latência, utilizando seis diferentes configurações de referência da topologia da rede Ipê entre 2013 e 2016 e valores de latência com granularidade diária e mensal. Esses cenários possibilitaram ter uma visão abrangente do compromisso entre a média de latência entre sítios, a latência de pior caso e a sobrevivência. Verificou-se que para requisitos razoáveis de sobrevivência, um ganho satisfatório de sobrevivência gera pouco impacto na média de latência entre os sítios e na pior latência. Já quando esses requisitos de sobrevivência são altos, pequenos acréscimos na sobrevivência fazem a latência aumentar de modo exponencial. Em um dos cenários, um incremento de 11% na sobrevivência acarretou em uma piora de 298% na média de latência entre os sítios. Isso ocorre porque para valores mais baixos de sobrevivência são escolhidos sítios mais próximos e com enlaces de maior capacidade. Quando os valores de sobrevivência crescem, é necessário escolher sítios cuja alcançabilidade possui pior desempenho de latência. Além disso, a adição de sítios promove ganhos maiores em sobrevivência quando os requisitos de sobrevivência são baixos, porém quando o DC já está distribuído por várias regiões, é necessária uma grande quantidade de novos pontos para uma melhora substancial da sobrevivência. Concluiu-se também que otimizar o posicionamento considerando as medições de latência de um dia não é ideal, pois eventos pontuais podem impactar no resultado. Apresentou-se como proposta a consolidação das medições por mês, buscando um resultado mais perene. Por fim, fez-se a comparação entre as 6 topologias da rede Ipê, mostrando que apesar dos valores esperados de latência entre sítios terem variado pouco ao longo do tempo, a ativação de novos enlaces contribuiu para a redução dos atrasos.

Esta dissertação contribui com a literatura ao associar o problema de posicionamento de servidores ao contexto das operadoras de telecomunicações, e ao analisar o compromisso entre latência e sobrevivência utilizando medições de uma rede real e acrescentando a dimensão de tempo às análises. A seguir, relaciona-se algumas sugestões de trabalhos futuros que poderão se beneficiar das análises realizadas.

É interessante escolher um serviço específico que utilizará esse *datacenter* geodistribuído, permitindo definir os valores máximos de sobrevivência e latência do problema e a sobrecarga de tráfego nos enlaces. Alguns serviços sugeridos, que foram utilizados como motivadores dessa dissertação, são a distribuição de conteúdo via uma CDN (*Content Delivery Network*) ou o posicionamento físico dos sítios levando em consideração cadeias de serviços de NFV (*Network Functions Virtualization*).

Esta dissertação explorou as latências envolvidas na rede de *backbone* da operadora de telecomunicações. Uma extensão que poderia se mostrar interessante é considerar a latência fim-a-fim, desde o acesso do usuário até o servidor da aplicação

para otimizar o posicionamento considerando as duas vertentes.

Por fim, a análise da faixa de sobrevivência entre 0,05 e 0,50 mostrou que sempre são escolhidos dois sítios e assim consideram-se apenas os valores de latência do caminho entre esses dois sítios. A variação da sobrevivência ocorre pela quantidade de bastidores no pior SRG. Assim, a sobrevivência de 0,05 é alcançada com 5% dos bastidores em um sítio e 95% dos bastidores no outro. Já a sobrevivência de 0,50 é alcançada com 50% dos bastidores disponíveis em cada sítio. No problema de otimização apresentando neste trabalho, a média de latência entre os sítios e a latência máxima não se alteram entre esses dois cenários. Entretanto, a diferença de bastidores em cada sítio pode acarretar maior ou menor número de conexões entre servidores nos dois sítios, aumentando ou diminuindo a percepção de latência para o usuário do serviço. Cada uma dessas conexões estará sujeita à latência de interconexão descrita neste trabalho, assim disposições de servidores que gerem maior número de conexões entre inter-DC acarretarão em uma latência maior para o serviço que esteja sendo utilizado nos servidores. Uma linha de pesquisa seria mensurar e considerar essas conexões em um novo problema de otimização, obtendo um resultado mais próximo da experiência real do usuário.

Referências Bibliográficas

- [1] *Operadoras dão os primeiros passos para a virtualização de olho em fluxos de receita.* Inova.jor, out. 2016. <http://www.inova.jor.br/2016/10/17/operadoras-telecom-video-big-data-drones/>- Acessado em Maio de 2017.
- [2] *Operadoras dão os primeiros passos para a virtualização de olho em fluxos de receita.* Teletime, abr. 2017. <http://convergecom.com.br/teletime/26/04/2017/operadoras-dao-os-primeiros-passos-para-virtualizacao-de-olho-em-fluxos-de-receita/>- Acessado em Maio de 2017.
- [3] *Telecommunications Industry Outlook 2017.* Deloitte, jan. 2017. <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/telecommunications-industry-outlook.html>- Acessado em Maio de 2017.
- [4] *Serviços ajudam a ampliar receitas das operadoras.* Valor Econômico, fev. 2015. <http://www.valor.com.br/empresas/3927608/servicos-ajudam-ampliar-receitas-das-operadoras-> Acessado em Junho de 2017.
- [5] *Cloud Server.* Embratel, jun. 2017. <http://portal.embratel.com.br/cloud/cloud-server> - Acessado em Junho de 2017.
- [6] *Open Cloud.* Vivo, jun. 2017. <https://assine.vivo.com.br/empresas/pequenas-e-medias/solucoes-ti/data-center/open-cloud> - Acessado em Junho de 2017.
- [7] *Ação da Telecom Italia cai em Milão, com suspensão de vendas no Brasil.* Valor Econômico, jul. 2012. <http://www2.valor.com.br/empresas/2757646/acao-da-telecom-italia-cai-em-milao-com-suspensao-de-vendas-no-brasil> - Acessado em Maio de 2017.
- [8] R.STANKIEWICZ. “QoX: what is it really?” *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 4, pp. 148–158, abr. 2011.

- [9] COUTO, R. S., SECCI, S., CAMPISTA, M. E. M., et al. “Network Design Requirements for Disaster Resilience in IaaS Clouds”, *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 10, pp. 52–58, out. 2014.
- [10] KOKKINOS, P., KALOGERAS, D., LEVIN, A., et al. “Survey: Live Migration and Disaster Recovery over Long-Distance Networks”, *ACM Computing Surveys*, v. 49, n. 2, pp. 1–36, nov. 2016.
- [11] COUTO, R. S., SECCI, S., CAMPISTA, M. E. M., et al. “Latency Versus Survivability in Geo-Distributed Data Center Design”. pp. 1107–1112, dez. 2014.
- [12] XIAO, J., WEN, H., WU, B., et al. “Joint Design on DCN Placement and Survivable Cloud Service Provision over All-Optical Mesh Networks”, *IEEE Transactions Magazine*, v. 62, n. 1, pp. 235–245, jan. 2014.
- [13] HABIB, M. F., TORNATORE, M., DIKBIYIK, F., et al. “Disaster survivability in optical communication networks”, *Computer Communications*, v. 36, n. 1, pp. 630–644, jan. 2013.
- [14] HABIB, M. F., TORNATORE, M., LEENHEER, M. D., et al. “Disaster-resilient Optical Datacenter Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, v. 30, n. 16, pp. 2563–2573, ago. 2012.
- [15] SAVAS, S. S., DIKBIYIK, F., HABIB, M. F., et al. “Disaster-aware service provisioning with multicasting in cloud networks”, *Photonic Network Communications*, v. 28, n. 2, pp. 123–134, set. 2014.
- [16] LI, Y., XIAO, J., WU, B., et al. “Cloud service provisioning in two types of DCN with awareness of delay and link failure probability”, *Photonic Network Communications*, v. 31, n. 2, pp. 217–227, fev. 2016.
- [17] GUO, J., XIAO, J., WU, B., et al. “Network Planning for Distributed Datacenters Under Probabilistic Link Failures”. In: *14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, dez. 2015.
- [18] COUTO, R. D. S. *Estratégias e Análise de Resiliência em Redes de Centros de Dados*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- [19] MANDAL, U., CHOWDHURY, P., LANGE, C., et al. “Energy-efficient content distribution over telecom network infrastructure”, *Optical Switching and Networking*, v. 10, n. 4, pp. 393–405, jun. 2013.

- [20] MEHRAGHDAM, S., KELLER, M., KARL, H. “Specifying and Placing Chains of Virtual Network Functions”. In: *Sigcomm*, Luxembourg, Luxembourg, out. 2014.
- [21] TALEB, T. “Toward carrier cloud: Potential, challenges, and solutions”, *IEEE Communications Magazine*, v. 21, n. 3, pp. 80–91, jun. 2014.
- [22] MIJUMBI, R. “Management and Orchestration Challenges in Network Functions Virtualization”, *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 1, pp. 98–105, jan. 2016.
- [23] KANTARCI, B., MOUFTAH, H. T. M. “Resilient Design of a Cloud System over an Optical Backbone”, *IEEE Network*, v. 29, n. 4, pp. 80–87, jul. 2015.
- [24] KAMIYAMA, N., MORI, T., KAWAHARA, R., et al. “Analyzing influence of network topology on designing ISP-operated CDN”. In: *14th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium*, Warsaw, Poland, set. 2010.
- [25] VERAS, M. *Computação em Nuvem - Nova Arquitetura de TI*. 1 ed. Rio de Janeiro, Brassport, 2015.
- [26] AHDI, F., SUBRAMANIAM, S. “Optimal Placement of FSO Relays for Network Disaster Recovery”. In: *IEEE International Conference on Communications*, pp. 3921–3926, Washington, D.C., jun. 2013.
- [27] MORRISON, K. T. “Rapidly recovering from the catastrophic loss of a major telecommunications office”, *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 1, pp. 28–35, jan. 2011.
- [28] RAN, Y. “Considerations and Suggestions on Improvement of Communication Network Disaster Countermeasures after the Wenchuan Earthquake”, *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 1, pp. 44–47, jan. 2011.
- [29] *Blecaute afetou 18 Estados do Brasil, mostra relatório*. Folha de São Paulo, nov. 2011. <http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2009/11/650831-blecaute-afetou-18-estados-do-brasil-mostra-relatorio.shtml>- Acessado em Maio de 2017.
- [30] *Servidores do Google sofrem ataque de hacker*. UOL, jan. 2017. <http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/tecnologia/noticia/2017/01/03/servidores-do-google-sofrem-ataque-de-hacker-265636.php> - Acessado em Junho de 2017.

- [31] MUKHERJEE, B. *Optical WDM Networks*. 1 ed. New York, Springer-Verlag, 2006.
- [32] LIU, Y., TRIVEDI, K. “A general framework for network survivability quantification”. In: *12th Conference on Measuring, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems*, pp. 369–378, 2004.
- [33] BODÍK, P., MENACHE, I., CHOWDHURY, M., et al. “Surviving Failures in Bandwidth-constrained Datacenters”. In: *IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking*, pp. 431–442, Helsínquia, Finlândia, ago. 2012.
- [34] KUROSE, J., ROSS. *Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top down*. 5 ed. São Paulo, Pearson, 2010.
- [35] *Rede Ipe*. RNP, abr. 2017. <https://www.rnp.br/servicos/conectividade/rede-ipe> - Acessado em Maio de 2017.
- [36] *Quem Somos*. RNP, abr. 2017. <https://www.rnp.br/institucional/quem-somos> - Acessado em Junho de 2017.
- [37] *Infraestrutura*. RNP, jul. 2015. <http://www.pop-mg.rnp.br/infra/conectividade.php> - Acessado em Maio de 2017.
- [38] *Rede IPÊ da RNP: você pode estar navegando nela!* RNP, out. 2013. <https://implanteneural.wordpress.com/2013/10/01/rede-ipe-da-rnp-voce-pode-estar-navegando-nela/> - Acessado em Maio de 2017.
- [39] *Mapa do Backbone*. RNP, fev. 2016. <https://memoria.rnp.br/images/bkbipe-site-fevereiro-2014-site.jpg> - Acessado em Maio de 2017.
- [40] *Conexão em 2014*. RNP, jul. 2014. https://www.rnp.br/sites/default/files/media/bkb_ipe-site-julho-2014.jpg - Acessado em Maio de 2017.
- [41] *PJI-2016-1*. RNP, mar. 2016. <http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/thumb/d/df/Rede-ipe-2014.jpg/600px-Rede-ipe-2014.jpg> - Acessado em Maio de 2017.
- [42] *Universidades do interior não ficarão sem conexão Internet, informa RNP*. RNP, out. 2016. <http://idgnow.com.br/internet/2016/08/16/universidades-do-interior-nao-ficaro-sem-conexao-internet-informa-rnp/> - Acessado em Maio de 2017.

- [43] *Medições da rede Ipê*. RNP, dez. 2014. <https://memoria.rnp.br/ceo/medicoes-rede-ipe.html>- Acessado em Maio de 2017.
- [44] *CPLEX Optimizer*. IBM, jul. 2010. <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/index.html>- Acessado em Junho de 2017.