SIMULAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO DE UMA REDE DE TELECOMUNICAÇÕES DE ACESSO A INTERNET BANDA LARGA

Swellen Barradas
Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET-RJ
Av. Maracanã, 229 – Maracanã - RJ
swellenbarradas@yahoo.com.br

Thiago Pessoa
Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET-RJ
Av. Maracanã, 229 – Maracanã - RJ
thiagobcpessoa@gmail.com

Leonardo Lima
Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET-RJ
Av. Maracanã, 229 – Maracanã - RJ
llima@cefet-rj.br

Bernardo Tabet
Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET-RJ
Av. Maracanã, 229 – Maracanã - RJ
bernardotabet@gmail.com

Lino Marujo
Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET-RJ
Av. Maracanã, 229 – Maracanã - RJ
linomarujo@cefet-rj.br

RESUMO

A integração entre os modelos de simulação e otimização tem se mostrado bastante útil para a resolução de problemas reais, fornecendo soluções de boa qualidade em tempo computacional razoável. Nesse trabalho, uma breve revisão bibliográfica com as principais áreas de aplicações do tema é apresentada, um estudo de caso em uma rede real de telecomunicações de serviço de acesso a internet banda larga é desenvolvido e os resultados computacionais discutidos.

PALAVRAS CHAVE. Simulação com otimização. Redes de telecomunicações. Optquest para Arena. Simulação.

ABSTRACT

The integration of simulation and optimization models is useful to solve real problems and provide good quality solutions in a reasonable computational time. In this paper, a short revision of the literature on main applications in this subject is presented, a case study of a real telecommunication network of broadband service access is developed and the computational results are discussed.

KEYWORDS. Simulation optimization. Telecommunications networks. Optquest for Arena. Simulation.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho de um sistema, geralmente, está diretamente relacionado com os valores dos parâmetros de entrada do sistema ou com as soluções iniciais. Sendo assim, o desafio é escolher valores adequados para esses parâmetros através do uso de uma técnica de otimização que seja robusta o suficiente a ponto de convergir para uma solução de boa qualidade ou até mesmo a solução ótima. Em alguns casos, no entanto, o comportamento do sistema é tão complexo que torna-se necessário o uso da otimização em conjunto com a simulação para avaliar o desempenho obtido com cada conjunto de valores para os parâmetros de entrada (ANDRADÓTTIR, 1998a,b). A simulação por si só apenas responde a questões do tipo "o quê acontece se?" (*what-if*). Isso é o mesmo que dizer que a simulação não determina valores de entrada ótimos para os parâmetros, mas apenas avalia os impactos acarretados uma vez que tais valores foram previamente definidos. Dessa forma podemos compreender mais facilmente a importância do uso de técnicas de otimização na simulação computacional de sistemas complexos, uma vez que a primeira é uma geradora de soluções e a segunda é uma avaliadora de soluções (CHWIF, MEDINA, 2006). O sucesso da simulação computacional em responder questões do tipo "o que acontece se?" (*what-if*) foi estendido a responder questões do tipo "como fazer para?" (*how-to*). Se por um lado questões do tipo "o que acontece se?" (*what-if*) fornecem como resposta medidas de desempenho para um determinado conjunto de valores das variáveis de decisão, por outro lado questões do tipo "como fazer para?" (*how-to*) procuram valores ótimos para as variáveis de decisão de forma que as medidas de desempenho sejam maximizadas ou minimizadas, conforme a necessidade (AZADIVAR, 1992, 1999).

A combinação da otimização e simulação originou o termo *Simulation Optimization* (CHWIF, MEDINA, 2006), aqui definido como **Simulação com Otimização**. Uma definição resumida é dada por Azadivar (1992) *apud* Chwif e Medina (2006, p. 159) ao afirmar que um problema de Simulação com Otimização é um problema de otimização em que a função objetivo, as restrições ou ambas são respostas que somente podem ser avaliadas pela simulação computacional. Já Oláfsson e Kim (2002, p. 79) afirmam que Simulação com Otimização é uma otimização onde o desempenho é a saída do modelo de simulação.

A simulação atualmente é aplicada em uma vasta gama de problemas do cotidiano. Exemplos de aplicações para simulação podem ser encontrados em Banks (1998). No entanto, as aplicações da Simulação com Otimização ainda estão muito focadas em problemas de controle de estoque, distribuição física de materiais (logística), gestão de risco de investimentos, planejamento e controle da produção (PCP), atendimento em hospitais e dimensionamento de *call center*.

O objetivo principal desse artigo é apresentar um estudo de caso advindo de um problema real de serviço de *internet* banda larga. A principal questão é o planejamento de inclusão de novos recursos em uma rede de telecomunicações com serviço de *internet* banda larga através das técnicas de simulação com otimização.

O presente artigo organiza-se da seguinte forma. Na seção 2 é abordada a forma geral de um problema de Simulação com Otimização. Posteriormente, na seção 3, são apresentados trabalhos com exemplos e estudos de caso com aplicações da Simulação com Otimização. Na seção 4 é desenvolvido um estudo de caso de Simulação com Otimização para um problema de dimensionamento de capacidade de rede de telecomunicação através da combinação do *software* de simulação Arena® com o *software* de otimização OptQuest®. Finalmente, na seção 5, são apresentadas as conclusões resultantes do presente trabalho.

2. PROBLEMA GERAL DE SIMULAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO

Um problema de Simulação com Otimização pode ser representado por (CHEN, FU, SHI, 2008; CHEN *et al*., 2007; CHEN *et al*., 2010; FRAZIER, 2010):

$$\min_{\boldsymbol{\theta} \in \boldsymbol{\Theta}} J(\boldsymbol{\theta}),$$

onde $\boldsymbol{\theta}$ é um vetor de dimensão $\boldsymbol{p}$ que representa todas as variáveis de decisão do sistema e $\boldsymbol{\Theta}$ é a região de soluções viáveis. Se $\boldsymbol{J(\theta)}$ for uma função escalar, estamos diante de um problema de

objetivo único. Por outro lado, se $\boldsymbol{J(\theta)}$ for um vetor, trata-se de um problema multi-objetivo. $\boldsymbol{J(\theta)}$ é linear em $\boldsymbol{\theta}$ e $\boldsymbol{\Theta}$ pode ser definido com um conjunto de equações lineares em $\boldsymbol{\theta}$ que representam as restrições do problema conforme os conceitos de programação linear. Em alguns casos, devido a existência de uma ou mais restrições inteiras (o binário {0;1}, por exemplo) em parte da região viável $\boldsymbol{\Theta}$, utilizamos os conceitos de programação mista inteira e linear.

Por se tratar de um problema de Simulação com Otimização, é fundamental contemplar a incerteza ou aleatoriedade do sistema. Sendo assim, a configuração acima pressupõe que temos pouco conhecimento sobre a estrutura de $\boldsymbol{J}$ e, principalmente, que $\boldsymbol{J}$ não pode ser obtido diretamente, mas sim como uma expectativa de outra quantidade $\boldsymbol{L(\theta, \omega)}$. Dessa forma,

$$\boldsymbol{J(\theta) = E\,[L(\theta, \omega)],}$$

onde $\boldsymbol{\omega}$ representa a incerteza ou aleatoriedade do sistema. Senso assim, o $\boldsymbol{\omega}$ é uma variável aleatória que é criada pelo gerador de números aleatórios presente na simulação. O $\boldsymbol{L(\theta, \omega)}$ é uma amostra da medida de desempenho obtida através da saída de uma replicação no modelo de simulação. Exemplos de medidas de desempenho são as seguintes: (a) o tempo de atendimento de um paciente em um hospital, (b) a quantidade de clientes que esperaram mais que um tempo determinado na fila, (c) os custos médios em um sistema de controle de inventário, (d) a distribuição de lucro e prejuízo em um portfólio de investimentos.

A Simulação com Otimização não possui uma expressão analítica para $\boldsymbol{E\,[L(\theta, \omega)]}$, como é comum em problemas de otimização. A única maneira de estimar $\boldsymbol{E\,[L(\theta, \omega)]}$ é executar diversas replicações na simulação, ou seja, executar a simulação diversas vezes com o mesmo valor de entrada $\boldsymbol{\theta}$, mas diferentes valores gerados aleatoriamente para $\boldsymbol{\omega}$ ($\boldsymbol{\omega_1}$, $\boldsymbol{\omega_2}$,..., $\boldsymbol{\omega_n}$) e obter a média para as saídas $\boldsymbol{L(\theta, \omega_1)}$, $\boldsymbol{L(\theta, \omega_2)}$,..., $\boldsymbol{L(\theta, \omega_n)}$. Por essa razão, podemos supor que para obter uma estimativa precisa de $\boldsymbol{E\,[L(\theta, \omega)]}$, para um único valor de $\boldsymbol{\theta}$, podem ser necessárias muitas replicações e, conseqüentemente, um longo tempo computacional. Apesar de ser impossível ter um número infinito de replicações, a medida que o número de replicações aumenta, melhor é a estimativa para $\boldsymbol{E\,[L(\theta, \omega)]}$.

3. APLICAÇÕES

Nessa seção são apresentados alguns trabalhos envolvendo aplicações que integram a Simulação e Otimização.

Keskin, Melouk e Meyer (2009) utilizaram uma abordagem de Simulação com Otimização que combina um modelo de simulação com um método de otimização meta-heurístico baseado na busca *scatter* para estudar um problema de seleção de fornecedores e controle de estoque. O objetivo é diminuir o custo total do sistema e aumentar os níveis de serviço e confiabilidade. Decisões envolvendo restrições de custos de transporte (localização geográfica) dos fornecedores, quantidade a ser pedida de cada fornecedor, políticas de estoque, dentre outras, são consideradas no problema em questão. Chen *et al.* (2007) aplicaram um *framework* que integra simulação, algoritmo evolucionário multi-objetivo e a abordagem *computing budget allocation* multi-objetivo (MOCBA) para resolver um problema de alocação de peças sobressalentes para aeronaves caracterizado por enorme espaço de busca, múltiplos objetivos e alta variabilidade. O estoqueo consiste de peças descartáveis e recuperáveis que precisam ser estocadas nos aeroportos associados, para evitar atrasos causados por falhas não-previstas e em um depósito central de reparo. Quando uma peça falha, a mesma é substituída através do estoque do aeroporto no qual a aeronave se encontra, dos aeroportos vizinhos ou do depósito central de reparo.

Dellino, Kleijnen e Meloni (2009) apresentaram um método robusto para resolver problemas de Simulação com Otimização contemplando a incerteza ambiental presente em algumas entradas de um modelo de simulação e aplicaram o método em modelos de estoque de lote econômico (*economic order quantity* - EOQ). Chen, Fu e Shi (2008) abordaram três áreas específicas da Simulação com Otimização – abordagem *optimal computing budget allocation* (OCBA), técnicas estocásticas de estimativa do gradiente e o método *nested partitions* (NP) – através da aplicação em um exemplo de problema de controle de estoque de item único do tipo (*s*, *S*). Jones e Willis (2008) definiram um *framework* que combina um modelo de simulação, um

algoritmo heurístico de busca não-exaustiva, uma técnica de otimização multi-objetivo e tecnologias de banco de dados. A metodologia foi posteriormente testada em um modelo de controle de estoque multi-objetivo. Kleijnen e Wan (2007) compararam diferentes métodos conhecidos de Simulação com Otimização, dentre eles o utilizado na ferramenta de otimização Optquest®, através de um modelo de controle de estoque. Outras pesquisas com aplicações em problemas de controle de estoque e de distribuição física podem ser encontradas em April, Fu e Glover (2005), April *et al.* (2004), Fábregas-Ariza, Montoya-Torres e Paternina-Arboleda (2008), Hong, Nelson e Xu (2010) e Kleijnen, Van Beers e Van Nieuwenhuyse (2009).

Azadivar, Jiao e Truong (2009) definiram um *framework* para a criação de um sistema de apoio a tomada de decisão (*decision support system* – DSS) para a gestão da pesca. Dentre os componentes desse sistema, o principal é o responsável pela tarefa de Simulação com Otimização, cuja função objetivo é maximizar o valor total de cada desembarque de peixes sujeito a restrições regulatórias (quantidade limitada de espécies ameaçadas, por exemplo) e de capacidade. Aliando-se o componente de Simulação com Otimização com outros parâmetros do sistema, dentre eles dados biológicos, econômicos e tecnológicos sobre o mercado de pesca, é possível definir a quantidade a ser pescada de cada espécie de peixe em cada local definido e em cada espaço de tempo determinado. Bianchi *et al*. (2008) aplicaram técnicas de Simulação com Otimização em um problema de definição do plano mensal de mineração para uma área de exploração de uma mineradora. O problema básico consiste na alocação de caminhões para cada mina e definição do número de viagens para cada caminhão, sendo em sua essência um problema de otimização. No entanto, outras variáveis presentes no sistema real, inclusive algumas estocásticas, influenciam o plano de mineração mensal, como a manutenção dos caminhões e o esgotamento do minério de ferro nas minas, sendo a simulação aplicada para contemplar a aleatoriedade em função do estado transiente do sistema. Outro estudo na indústria de mineração foi o de Kleijnen (1995) *apud* Kleijnen (1998), no qual o mesmo desenvolveu um método que integrou a simulação e uma heurística inspirada na metodologia de superfície de resposta (RSM) para um problema de transporte de carvão mineral em uma área de exploração de uma mineradora britânica. Amodeo *et al*. (2008) desenvolveu uma metodologia que integra o *software* de simulação Arena® a um método de otimização baseado em algoritmos genéticos para aplicar em um problema de programação de manutenção dos vagões de trem em uma ferrovia. O modelo de Simulação com Otimização consiste nos seguintes objetivos: maximizar a quantidade de vagões prontos ao ano, minimizar o tempo de espera dos vagões em fila e minimizar a taxa de ocupação dos postos de trabalho. Kleijnen (1993) *apud* Kleijnen (1998) utilizou um modelo de simulação associado a metodologia de superfície de resposta (RSM) para estudar um sistema de apoio a tomada de decisão (*decision support system* – DSS) para o planejamento da produção de tubos de aço em uma fábrica alemã. O sistema possuía 14 variáveis de decisão e duas variáveis de resposta. Outras pesquisas com aplicações em problemas de planejamento e controle da produção (PCP) e logística podem ser encontradas em Mejtsky (2008) e Mejtsky (2007).

Ahmed e Alkhamis (2008) desenvolveram uma ferramenta de suporte a decisão que integra simulação e otimização para um problema real de atendimento de emergência em um hospital no Kuwait. O objetivo é diminuir o tempo de atendimento e aumentar a taxa de saída de pacientes do sistema, através do dimensionamento de recursos humanos e sujeito a restrições de orçamento. Outras pesquisas com aplicações em problemas de atendimento em hospital podem ser encontradas em April *et al*. (2006), Better et al. (2008) e April, Fu e Glover (2005).

Kleijnen, Van Beers e Van Nieuwenhuyse (2009) apresentaram uma heurística nova para resolver problemas de Simulação com Otimização que combina métodos de diferentes campos de estudo, a saber: Desenho de Experimentos, Metamodelos Kriging e Programação Matemática. A abordagem proposta é aplicada em um problema de dimensionamento de recursos humanos em um *call center*. Outra pesquisa com aplicação em problema de dimensionamento de *call center* pode ser encontrada em April, Fu e Glover (2005).

Better *et al*. (2008) utilizaram o software de Simulação com Otimização Optfolio® para ilustrar diferentes casos de problema de seleção de portfólio de projetos de investimento com nível de risco tolerável. O objetivo é maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) do portfólio,

sujeito a restrições de orçamento e recursos humanos, dentre outros. Outras pesquisas com aplicações em problemas de gestão de risco de investimentos podem ser encontradas em April *et al*. (2003), April, Glover e Fu (2005), April *et al*. (2004) e Juneja (2008).

Better, Glover e Laguna (2007) propõem uma abordagem que integra Simulação com Otimização e mineração de dados. O módulo de mineração de dados possui um procedimento inovador que consiste em periodicamente analisar os dados gerados durante o processo de otimização com o objetivo de identificar quais são as variáveis, regras e atributos relevantes. Dessa forma, nas iterações futuras apenas soluções promissoras serão avaliadas. Os autores apresentaram um problema de pesquisa de mercado que consiste em definir a melhor alocação de recursos financeiros nos departamentos da empresa com o objetivo de maximizar o *market share* sujeito a restrições de lucratividade, liquidez, volume de vendas e orçamento, dentre outros.

Mais referências para aplicações da Simulação com Otimização são citadas por Carson e Maria (1997). Dentre as aplicações contidas nesse trabalho, podem ser enumeradas as seguintes: problemas de estoque (nível, localização e sistema kanban, por exemplo), *layout*, transporte, operações de montagem e expedição.

4. ESTUDO DE CASO: REDE DE TELECOMUNICAÇÃO COM SERVIÇO DE INTERNET BANDA LARGA

4.1. Definição do problema

O problema de Planejamento de Novos Equipamentos DSLAM (PNED) surgiu com a necessidade de projetar e construir uma topologia de rede adequada, tanto em relação ao *backbone*, quanto à qualidade de entrega do serviço oferecido. Dessa forma, dada uma rede de telecomunicações que provê o serviço de Internet banda larga, representada na Figura 1, o PNED consiste em determinar como a inclusão de novos equipamentos na rede e o aumento do número de clientes pode impactar o processamento do tráfego de dados na rede atual. Uma questão gerencial interessante é o tempo em que os recursos existentes na rede atual irão suportar a quantidade de tráfego da rede, levando em consideração o crescente aumento de demanda dos clientes. Como as medidas de número de usuários trafegando na rede, as bandas ocupadas por cada um deles e o tempo total de sistema são aleatórios, o uso de modelos de simulação para representar o tráfego de clientes é de grande interesse para avaliar os gargalos existentes na atual topologia da rede.

O estudo aqui apresentado para o problema em questão envolve basicamente duas etapas: (i) desenvolvimento de um modelo de simulação considerando o aumento da demanda de clientes nos próximos 5 anos, e conseqüentemente o aumento do fluxo de dados na rede. Vale ressaltar que as taxas de crescimento de demanda do período foram obtidas junto a operadora; (ii) otimização do modelo de simulação desenvolvido no item (i) utilizando a ferramenta Optquest® para Arena®. O principal objetivo dessa etapa é minimizar o custo de implantação de novos recursos e/ou inclusão de novos links na rede de modo a atender as especificações de qualidade do serviço da operadora de telecomunicações.

Assim, esse estudo envolve o desenvolvimento de um modelo de simulação discreta, utilizando o software Arena®, e a otimização do modelo, utilizando o OptQuest® para Arena®.

A Figura 1 ilustra a rede estudada e a apresenta como um grafo não-direcionado $G = [V, L]$ sendo $V = \{v_1, v_2,..., v_{69}\}$ o conjunto de recursos compostos por DSLAMs e *switches* e um conjunto $L = \{l_{1, 62}, l_{2, 62},..., l_{61, 69}\}$ de arestas $li,j = (v_i, v_j) \in L$. O tráfego de dados numa aresta $l_{i,j}$ é denotado por $f(v_i, v_j)$.

Os nós v_1 a v_{13}, que representam os DSLAMs da rede, recebem o fluxo de dados dos assinantes de uma determinada região do estado. A função do DSLAM é conectar os assinantes que se comunicam através da malha de par trançado ao *backbone* de rede. O *backbone* da rede é formado pela rede *Metroethernet*, pelo BRAS e por roteadores de grande porte, que para efeito de estudo estão representados pela nuvem RMS da Figura 1 já que não são o foco do estudo.

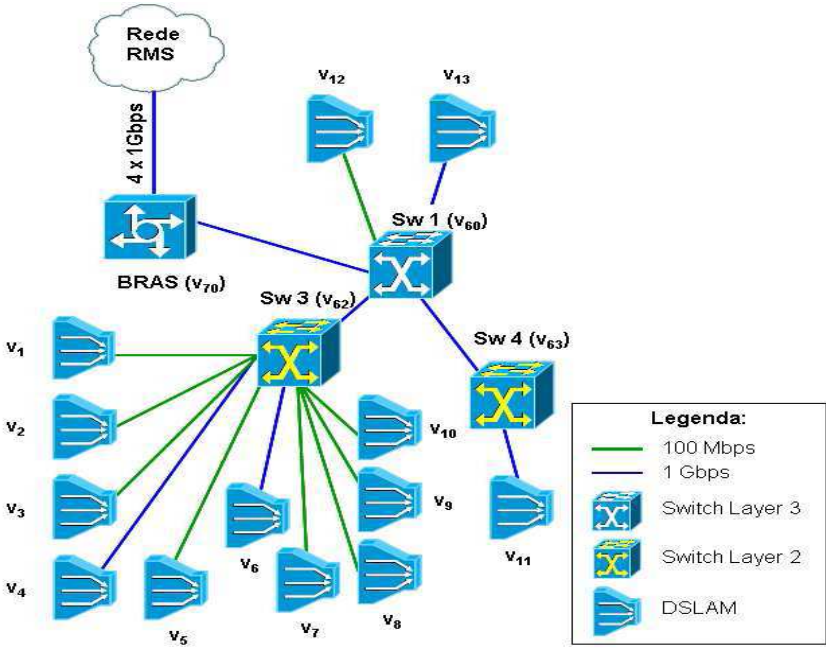

Figura 1: Topologia da rede *Metroethernet*

A rede *Metroethernet* é composta por *switches* e é baseada em um modelo hierárquico de duas camadas: acesso nível 2 (*Ethernet*-VLAN) e núcleo/*backbone* de nível 3 (IP/MPLS). Os *switches*, nessa topologia de rede, são responsáveis por interligar os DSLAMs ao BRAS. O BRAS é responsável pela autenticação dos usuários e fornecimento de IP dinâmico válido quando um cliente deseja navegar na Internet.

4.2. Modelagem do Problema

No artigo Barradas *et al.* (2010) um cenário para validação do modelo de simulação foi desenvolvido e os resultados computacionais apresentados. Os dados obtidos a partir do modelo foram comparados com o problema real e validados com a operadora. A rede simulada nesse cenário foi composta por 13 DSLAM's, D = $\{v_1,...,v_{13}\}$, 2 *switches layer* 2 (v_{62} e v_{63}), 1 *switches layer* 3 (v_{60}), 1 BRAS (v_{70}) e 19 *links*, distribuídos conforme a Figura 1. Cada *link* foi representado na Figura 1 como uma aresta entre dois vértices e deve-se levar em consideração que entre o equipamento BRAS (v70) e a Rede RMS existem 4 *links* paralelos, formando assim os 19 *links* da rede. Para maiores detalhes veja Barradas *et al.* (2010).

A seguir, os recursos, as entidades e a estrutura lógica do modelo de simulação e otimização desenvolvidos nesse artigo são descritos.

4.2.1. Recursos

Os recursos que compõem o modelo do estudo são 59 DSLAM's, 8 *Switches Layer* 2 e 2 *Switch layer* 3, 1 BRAS e 73 conexões de *links* que são representados pelas linhas azuis da Figura 1. A Tabela 1 informa, com exceção do DSLAM, as capacidades dos recursos. Na coluna 3 da Tabela 1, tem-se a informação do tempo de resposta do equipamento cada vez que uma requisição é solicitada.

Tabela 1: Atributos da velocidade de conexão

Recurso	Capacidade	Atraso
Switch 1	600 Mbps	0.1 s
Switch 2	1 Gbps	0.1 s
Switch 3	100 Mbps	0.1 s
BRAS	1 Gbps	0.1 s
Conexão dos links	100 Mbps – 1 Gbps	0.1 s

4.2.2. Dados de entrada

Os dados de entrada do modelo de simulação são relativos à distribuição dos tempos entre chegadas dos clientes em cada DSLAM de acordo com velocidades de conexão de cada assinante. Assumiu-se que essas distribuições são exponenciais e os tempos médios foram obtidos junto à operadora.

O número de replicações utilizado no modelo de simulação foi de 70 iterações. Inicialmente, o modelo foi executado com 10 iterações para que o *half width* fosse obtido. A partir daí, determinou-se o número mínimo de iterações que eram necessárias para se ter um *half width* de 0,5%, o que correspondeu à execução de 70 iterações.

4.2.3. Entidades

Cada assinante de banda larga é uma entidade do sistema e cada um possui um conjunto de três atributos: tempo máximo de espera até a autenticação, caminho a percorrer entre o DSLAM e o BRAS e a velocidade de conexão. O processo de autenticação de um cliente na rede é realizado pelo nó BRAS. O tempo de autenticação de um usuário é uma variável aleatória importante no modelo. Nesse estudo, adota-se um tempo máximo de 5 segundos para que a autenticação seja realizada. Caso a autenticação não ocorra nesse intervalo de tempo, o cliente é removido do sistema e todos os recursos ocupados por ele são disponibilizados.

Tabela 2: Velocidade média da conexão dos assinantes

Atributo velocidade de conexão	Velocidade Média (Kbps)
Assinante 150 Kbps	23,5
Assinante 300 Kbps	50,2
Assinante 600 Kbps	72,2
Assinante 1000 Kbps	90

4.2.4. Estrutura lógica do modelo de simulação

O modelo de simulação foi construído de acordo com a Figura 1 e a sua lógica de funcionamento é a seguinte: quando uma entidade acessa um DSLAM ela recebe uma seqüência de nós que descreve seu caminho até o BRAS e também o caminho reverso. O *link* que conecta o usuário a Rede RMS é escolhido de acordo com a menor fila e a maior capacidade disponível. A entidade assim que entra no sistema ela ocupa um recurso (DSLAM, Switches, BRAS) de acordo com a sua velocidade, isto acontece em ambas as direções (*download* e *upload*). O cliente permanece no sistema, em média, 43,9 minutos e somente após ter deixado o modelo a entidade libera todos os recursos que estava ocupando.

4.3. Resultados computacionais

O Cenário 1 e a Simulação com Otimização do Cenário 1 estão descritos a seguir. Os modelos foram executados no Arena® 12 e OptQuest®, em notebook HP, sistema operacional Windows Vista, 32 bits, 2GB de memória RAM, Processador AMD Turion 64 X2 TL-58 1,90 GHz.

4.3.1. Cenário 1

O modelo de simulação desenvolvido no cenário 1 leva em consideração a previsão de demanda por tráfego de dados na rede nos próximos 5 anos. Este percentual de aumento de demanda foi obtido junto à operadora de telecomunicações e deve-se ao fato de existirem nichos de mercado atualmente que a operadora pretende atacar a médio prazo. A topologia da rede nesse cenário é descrita na Figura 2. Desta forma, o principal objetivo desse cenário é a partir do modelo básico desenvolvido em Barradas *et al.* (2010) aumentar a demanda por tráfego de dados e verificar se há degradação na qualidade do serviço. A degradação no serviço prestado pela operadora está relacionada a taxa de assinantes descartados no sistema, o que na prática geraria reclamações no órgão regulador do serviço, a ANATEL, e o tempo médio de fila de um pacote de dado num

determinado recurso. O tempo de execução do modelo de simulação para esse cenário foi de 12 horas.

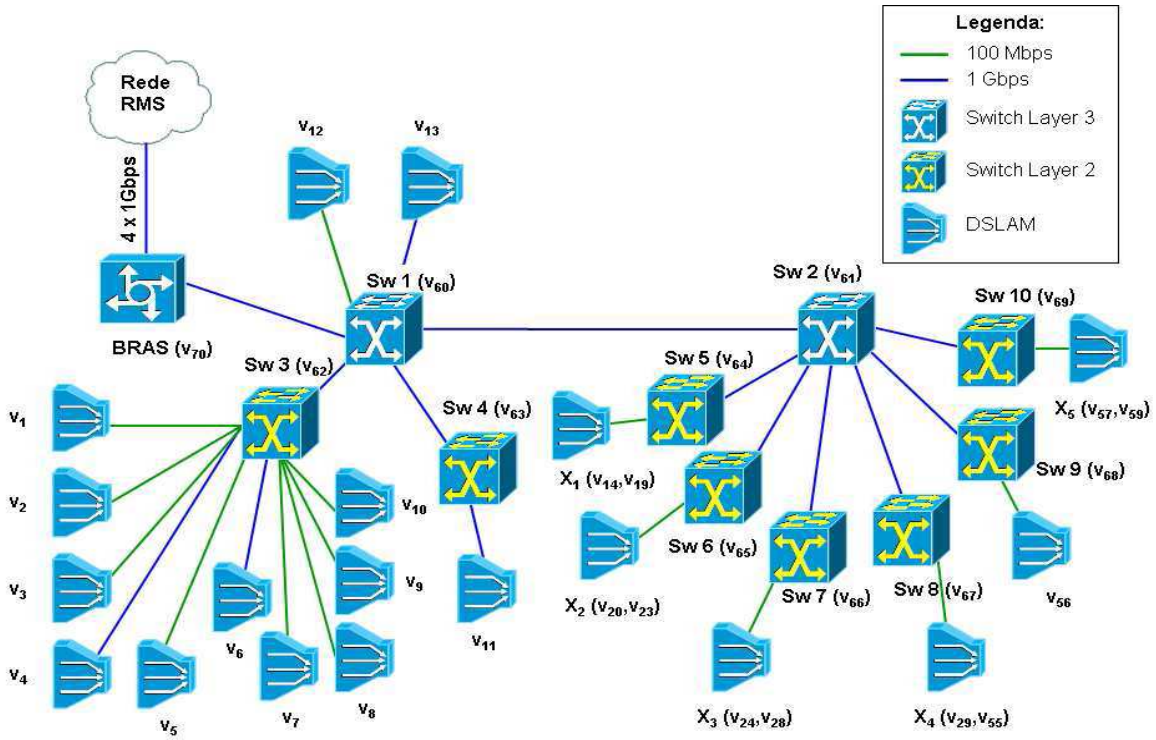

Figura 2 – Topologia da rede *Metroethernet*

Os resultados da simulação estão descritos na Tabela 3, onde se pode observar que a ocupação média dos recursos de *backbone* (nós v_{60} e v_{70}) chega a 95,67%. Foram verificados os tempos nas filas de processamento dos recursos e o total de clientes descartados do sistema por tempo de espera excedido dos equipamentos. O resultado do tempo nas filas está apresentado na Tabela 4. Observe que os tempos máximos são bastante altos, chegando até a 10,8 segundos. Por Sabe-se que tempos de espera maiores que 1 segundo já são perceptíveis aos usuários, afetando assim a qualidade do serviço. A quantidade total de pacotes de dados dos usuários descartados foi de 8,52 Mbps em um tráfego total de 882,57 Mbps, portanto 1,03% de perda. Essa quantidade de pacotes descartados também já é o bastante para que os clientes afetados pelo descarte solicitem verificação dos seus acessos e abram possíveis ocorrências na ANATEL.

Tabela 3: Resultados do Cenário 1 – Demanda futura 5 anos.

Recurso	Capacida	Tráfego	%
v_1	100 Mbps	1270,58	1,27%
v_2	100 Mbps	1190,52	1,19%
v_3	100 Mbps	2554,57	2,55%
v_4	1 Gbps	69402,92	6,94%
v_5	100 Mbps	234,23	0,23%
v_6	1 Gbps	150413,79	15,04%
v_7	100 Mbps	3003,4	3,00%
v_8	100 Mbps	1479,78	1,48%
v_9	100 Mbps	710,58	0,71%
v_{10}	100 Mbps	763,35	0,76%
v_{11}	1 Gbps	7176,2	0,72%
v_{12}	1 Gbps	84191,54	8,42%
v_{13}	100 Mbps	37004,3	37,00%
BRAS v_{70}	1 Gbps	956692,22	95,67%
LINK RMS 1	1 Gbps	238775,79	23,88%
LINK RMS 2	1 Gbps	238775,76	23,88%
LINK RMS 3	1 Gbps	238775,61	23,88%
LINK RMS 4	1 Gbps	238775,59	23,88%
Switch 1 (L3) v_{60}	1 Gbps	956691,03	95,67%
Switch 2 (L3) v_{61}	1 Gbps	597466,5	59,75%
Switch 3 (L2) v_{62}	600 Mbps	231020,89	38,50%
Switch 4 (L2) v_{63}	1 Gbps	7176,2	0,72%
Switch 5 (L2) v_{64}	1 Gbps	44188,85	4,42%
Switch 6 (L2) v_{65}	1 Gbps	94336,74	9,43%
Switch 7 (L2) v_{66}	1 Gbps	49966,23	5,00%
Switch 8 (L2) v_{67}	1 Gbps	131420,35	13,14%
Switch 9 (L2) v_{68}	1 Gbps	133138,69	13,31%
Switch 10 (L2) v_{69}	1 Gbps	144416	14,44%

Tabela 4 Tempo nas filas de processamento dos recursos de *backbone*

Recurso /	Média (s)	Média	Média	Valor
v_{60}	0,64	0,59	0,71	10,8
v_{61}	0	0	0	0
v_{70}	0,49	0,46	0,54	8,88
l (v_{60},v_{70})	0,45	0,42	0,5	8,24

4.3.2. Otimização com Simulação do Cenário 1

Os resultados obtidos no Cenário 1 indicam um alto percentual de perda de pacote de dados nos recursos da rede, ou seja, um total de 1,03% de todo fluxo da rede. É razoável supor que um redimensionamento da capacidade dos vértices e/ou arestas da rede possam diminuir a taxa de perda dos pacotes de dados. O desenvolvimento do modelo de integração da Simulação com Otimização deve-se principalmente pela busca da resposta à seguinte questão: *Qual a menor capacidade que deve ser atribuída a um recurso de forma a manter a qualidade do serviço prestado?* Dessa forma, um problema de otimização visando dimensionar a capacidade dos recursos da rede de forma a minimizar os custos relativos a eventuais aumentos de capacidade foi

definido e restrições de garantia para um nível aceitável de qualidade do serviço prestado aos seus clientes foram impostas:

1. A quantidade máxima de pacotes de dados de usuários descartados ($Q_{máx}$) deve ser no máximo 0,8% de todo o fluxo de dados da rede;
2. O tempo médio de fila no BRAS (v_{70}) e no *Switch* 1 (v_{60}) deve ser no máximo 1 segundo ($TMF_{máx}$).

A seguir são definidas as variáveis de decisão e os principais parâmetros utilizados no modelo de otimização.

Variáveis de decisão:
Q = quantidade de pacotes de dados descartados pelo sistema;
$Y(v_i)$ = capacidade de fluxo de dados do recurso v_i em Kbps;
$Y(l_{i,j})$ = capacidade de fluxo de dados do *link* $l_{i,j}$ em Kbps.

Parâmetros:
$C(v_i) = 0{,}1 \rightarrow$ Custo em Reais (R$) de ampliação do recurso v_i em Kbps;
$C(l_{i;j}) = 0{,}05 \rightarrow$ Custo em Reais (R$) de ampliação do *link* $l_{i,j}$ em Kbps;
$lb(v_i)$ é a capacidade mínima de fluxo de dados do recurso v_i em Kbps;
$ub(v_i)$ é a capacidade máxima de fluxo de dados do recurso v_i em Kbps;
Q_{max} é quantidade máxima de pacotes de dados descartados;
$TMF_{max}(v_i)$ é o tempo médio de fila máximo no recurso v_i.

Dessa forma, o modelo de otimização linear abaixo foi implementado na ferramenta OptQuest® para Arena®.

Minimizar $$Z = \sum_i C(v_i)Y(v_i) + \sum_{(i,j)\in L} C(l_{i,j})Y(l_{i,j}) + Q$$

sujeito a:

$$lb(v_i) \leq Y(v_i) \leq ub(v_i),\ i = 1,...,70$$

$$0 \leq Q \leq Q_{máx}$$

$$0 \leq TMF(v_i) \leq TMF_{máx};\ i = 60;\ 70$$

Os parâmetros de entrada do OptQuest® correspondem ao número de otimizações que serão realizadas do modelo e em cada otimização quantas simulações serão executadas. Foi definido que o seriam executadas 100 otimizações do modelo e para cada uma delas 7 simulações com 70 replicações. A solução encontrada é apresentada na Tabela 5. Com essas informações pode-se observar que para a rede dessa operadora atender com a qualidade esperada a demanda prevista para os próximos 5 anos, será necessário um investimento de R$ 45.981,50 em ampliação nos recursos de *backbone* (v_{60}, v_{70} e $l_{60,70}$) e como ainda existem perdas de pacotes (0,22%) haverá um custo médio mensal de R$ 1.931,00 em multas para os clientes que forem afetados. O resultado apresentado é razoável, pois analisando a topologia da rede estudada pode-se observar que, quanto maior o aumento do número de usuários nos vértices DSLAMs, maior será o fluxo de dados que converge para os recursos de *backbone*, nós v_{70} e v_{60}, e como consequência estes serão os primeiros a terem necessidade de ampliação.

Tabela 5 – Resultado Otimização

Recurso	Capacidade Mínima (Kbps)	Capacidade Sugerida	Capacidade Máxima (Kbps)
v_1	100000	156184	1000000
v_2	100000	410403	1000000
v_3	100000	402753	1000000
v_4	1000000	1501042	3000000
v_5	100000	137011	1000000
v_6	1000000	1577404	3000000
v_7	100000	120416	1000000
v_8	100000	205410	1000000
v_9	100000	239683	1000000
v_{10}	100000	175309	1000000
v_{11}	1000000	1382781	3000000
v_{12}	1000000	1410954	3000000
v_{13}	100000	211395	1000000
v_{60}	1000000	1079147	3000000
v_{61}	1000000	1197797	3000000
v_{62}	600000	659861	2000000
v_{63}	1000000	1037945	3000000
v_{64}	1000000	1392854	3000000
v_{65}	1000000	1277669	3000000
v_{66}	1000000	1131988	3000000
v_{67}	1000000	1610906	3000000
v_{68}	1000000	1065382	3000000
v_{69}	1000000	1135034	3000000
v_{70}	1000000	1504346	3000000
$l_{60,70}$	1000000	1160939	3000000
LINK RMS 1	1000000	1455306	3000000
LINK RMS 2	1000000	1097887	3000000
LINK RMS 3	1000000	1591643	3000000
LINK RMS 4	1000000	1241676	3000000

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho permite compreender as vantagens de integrar a simulação computacional e a otimização na solução dos mais diversos problemas do cotidiano. Um modelo de Simulação com Otimização bem elaborado representa adequadamente o sistema analisado e apresenta soluções boas em tempo computacional aceitável.

Apesar dos inúmeros trabalhos demonstrando a aplicação da simulação em situações reais, dentre eles os apresentados em Banks (1998), as pesquisas em Simulação com Otimização ainda estão muito concentrados em problemas de controle de estoque, distribuição física de materiais (logística), gestão de risco de investimentos, planejamento e controle da produção (PCP), atendimento em hospitais e dimensionamento de *call center*.

O estudo de caso apresentado nesse trabalho ressaltou a utilidade das ferramentas de simulação e otimização no dimensionamento e planejamento de redes de telecomunicação, permitiu reafirmar a relevância das pesquisas em Simulação com Otimização e contribuiu para ampliar o acervo de pesquisas com aplicação na indústria de telecomunicação. Além disso, o modelo desenvolvido apresentou aderência com o problema real e os resultados obtidos foram validados pelos gerentes da área, indicando que novos investimentos em aumento de capacidade dos recursos devem ser realizados nos próximos 5 anos para que a demanda seja atendida de modo a satisfazer as restrições de qualidade do serviço.

A pesquisa bibliográfica de aplicações da Simulação com Otimização permitiu identificar a necessidade de expandir as pesquisas para problemas já bastante estudados pela simulação e otimização isoladamente, mas pouco estudados sob um enfoque integrado de simulação com otimização.

Os autores agradecem o apoio da FAPERJ através do projeto de pesquisa processo n° E-26/112.206/2008.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, M.A. & ALKHAMIS, T.M. *Simulation Optimization for an Emergency Department Healthcare Unit in Kuwait*. European Journal of Operational Research. N. 198, p. 936-942, 2008.

AMODEO, L.; CHEN, H.; HANI, Y. & YALAOUI, F. *Simulation Based Optimization of a Train Maintenance Facility*. Journal of Intelligent Manufacturing. N. 19, p. 293-300, 2008.

ANDRADÓTTIR, S. *A Review of Simulation Optimization Techniques.* Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, ed. D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson & M.S. Manivannan, 1998.

ANDRADÓTTIR, S. *Simulation Optimization*. Handbook of Simulation, New York: John Wiley & Sons, ed. Jerry Banks, 1998.

APRIL, J.; BETTER, M.; GLOVER, F. & KELLY, J. *New Advances and Applications for Marrying Simulation and Optimization*. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, ed. R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, 2004.

APRIL, J.; BETTER, M.; GLOVER, F.; KELLY, J. & LAGUNA, M. *Enhancing Business Process Management With Simulation Optimization*. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, ed. L.F. Perrone, F.P. Wieland, J. Liu, B.G. Lawson, D.M. Nicol & R.M. Fujimoto, 2006.

APRIL, J.; FU, M.C. & GLOVER, F.W. *Simulation Optimization: A Review, New Developments, and Applications.* Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, ed. M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, 2005.

APRIL, J.; GLOVER, F.; KELLY, J. & LAGUNA, M. *Practical Introduction to Simulation Optimization*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, ed. S. Chick, P.J. Sánchez, D. Ferrin & D.J. Morrice, 2003.

AZADIVAR, F. *A Tutorial on Simulation Optimization*. Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ed. J.J. Swain, D. Goldsman, R.C. Crain & J.R. Wilson, 1992.

AZADIVAR, F. *Simulation Optimization Methodologies.* Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, ed. P.A. Farrington, H.B. Nembhard, D.T. Sturrock & G.W. Evans, 1999.

AZADIVAR, F.; JIAO, T. & TRUONG, Y. *A Decision Support System for Fisheries Management Using Operations Research and Systems Science Approach*. Expert Systems with Applications. N. 36, p. 2971–2978, 2009.

BANKS, J. *Handbook of Simulation.* New York: John Wiley & Sons, 1998.

BARRADAS, S.; LIMA, L. ; TABET, B. & ALENCAR, G. *Simulation on Residential Internet Service of a Brazilian State Network.* Búzios: The International Workshop on Applied Modelling & Simulation, 2010.

BETTER, M.; GLOVER, F. & LAGUNA, M. *Advances in Analytics: Integrating Dynamic Data Mining with Simulation Optimization.* IBM Journal of Research and Development. Vol. 51, n. 3 e 4, 2007.

BETTER, M.; GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. & WANG, H. *Simulation Optimization: Applications in Risk Management.* International Journal of Information Technology & Decision Making. Vol. 7, n. 4, p. 571–587, 2008.

BIANCHI, T.J.; EZAWA, L.; FIORONI, M.M.; FRANZESE, L.A.G.; MIRANDA JR, G. & PINTO, L.R. *Concurrent Simulation and Optimization Models for Mining Planning.* Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, ed. S.J. Mason, R.R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson & J.W. Fowler, 2008.

CARSON, Y. & MARIA, A. *Simulation Optimization: Methods and Applications.* Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, ed. S. Andradóttir, K.J. Healy, D.H. Withers & B.L. Nelson, 1997.

CHEN, C.H.; FU, M.C. & SHI, L. *Some Topics for Simulation Optimization.* Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, ed. S.J. Mason, R.R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson & J.W. Fowler, 2008.

CHEN, C.H.; FU, M.C.; HE, D.; LEE, L.H. & WASSERKRUG, S. *Simulation Optimization Using the Cross-Entropy Method with Optimal Computing Budget Allocation.* ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. Vol. 20, n. 1, artigo 4, 2010.

CHEN, Y.; CHEW, E.P.; LEE, L.H. & TENG, S. *Multi-objective Simulation-based Evolutionary Algorithm for an Aircraft Spare Parts Allocation Problem.* European Journal of Operational Research. N. 189, p. 476-491, 2007.

CHWIF, L. & MEDINA, A.C. *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria & Aplicações.* São Paulo: Bravarte, 2006.

DELLINO, G.; KLEIJNEN, J.P.C. & MELONI, C. *Robust Optimization in Simulation: Taguchi and Response Surface Methodology.* International Journal of Production Economics. N. 125, p. 52–59, 2009.

FÁBREGAS-ARIZA, A.; MONTOYA-TORRES, J.R. & PATERNINA-ARBOLEDA, C.D. *Simulation-Optimization Using a Reinforcement Learning Approach.* Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, ed. S.J. Mason, R.R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson & J.W. Fowler, 2008.

FRAZIER, P.I. *Decision-theoretic Foundations of Simulation Optimization.* Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, 2010, aguarda impressão.

HONG, L.J.; NELSON, B.L. & XU, J. *Industrial Strength COMPASS: A Comprehensive Algorithm and Software for Optimization via Simulation.* ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. Vol. 20, n. 1, artigo 3, 2010.

JONES, D.F. & WILLIS, K.O. *Multi-objective Simulation Optimization through Search Heuristics and Relational Database Analysis.* Decision Support Systems. N. 46, p. 277–286, 2008.

JUNEJA, S. *Optimizing Portfolio Tail Measures: Asymptotics and Efficient Simulation Optimization.* Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, ed. S.J. Mason, R.R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson & J.W. Fowler, 2008.

KESKIN, B.; MELOUK, S.H. & MEYER, I.L. *A Simulation-Optimization Approach for Integrated Sourcing and Inventory Decisions.* Computers & Operations Research. N. 37, p. 1648–1661, 2009.

KLEIJNEN, J.P.C. & WAN, J. *Optimization of Simulated Systems: OptQuest and Alternatives.* Simulation Modelling Practice and Theory. N. 15, p. 354–362, 2007.

KLEIJNEN, J.P.C. *Experimental Design for Sensitivity Analysis, Optimization, and Validation of Simulation Models*. Handbook of Simulation, New York: John Wiley & Sons, ed. Jerry Banks, 1998.

KLEIJNEN, J.P.C.; VAN BEERS, W. & VAN NIEUWENHUYSE, I. *Constrained Optimization in Expensive Simulation: Novel Approach.* European Journal of Operational Research. N. 202, p. 164-174, 2009.

MEJTSKY, G.J. *A Metaheuristic Algorithm for Simultaneous Simulation Optimization and Applications to Traveling Salesman and Job Shop Scheduling with Due Dates.* Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, ed. S.G. Henderson, B. Biller, M.-H. Hsieh, J. Shortle, J.D. Tew & R.R. Barton, 2007.

MEJTSKY, G.J. *The Improved Sweep Metaheuristic for Simulation Optimization and Application to Job Shop Scheduling.* Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, ed. S.J. Mason, R.R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson & J.W. Fowler, 2008.

OLÁFSSON, S. & KIM, J. *Simulation Optimization.* Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, ed. E. Yucesan, C.H. Chen, J.L. Snowdon & J.M. Charnes, 2002.