

# Fatiamento de Rede no Contexto de Demanda Elástica usando Lógica Fuzzy

Matheus M. Silveira<sup>1</sup>, Silvio E. Ribeiro<sup>1</sup>, Danielle S. Silva<sup>1</sup>,  
Maria C. Mesquita<sup>1</sup>, Rafael L. Gomes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual do Ceará (UECE)

{matheus.monteiro,silvio.ribeiro,danielle.santos,  
maria.mesquita,rafaellgom}@larces.uece.br

**Abstract.** *Currently, the Internet is the main medium of communication, acting as the basis for several existing services. However, it still suffers from limitations that directly affect the Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) of users. Thus, Internet Service Providers (ISPs) have been applying new technologies and network management strategies, such as Network Slicing, in order to slice the network resources among the clients and the services provided, where an algorithm to define the allocation of these network slices becomes crucial, mainly in scenarios with demand resource elasticity throughout the day. Within this context, this work presents the FUMU (FUZZY MULTICRITERIA) algorithm to define network slicing based on multiple network metrics, as well as adaptable to the settings provided by the network administrator. The results of the experiments carried out suggest that FUMU achieves a better balance between use of provider resources and fulfillment of QoS requirements for customers when compared to existing approaches.*

**Resumo.** *A Internet é o principal meio de comunicação nos dias atuais, servindo como base para diversos serviços existentes. Todavia, esta ainda sofre com limitações que afetam diretamente a Qualidade de Serviço (QoS) e de Experiência (QoE) dos usuários. Assim, os Provedores de Serviços de Internet (ISPs) vêm aplicando novas tecnologias e estratégias de gerência de redes, dentre elas o Fatiamento de Rede, a fim de fatiar os recursos de rede dentre os clientes e os serviços prestados, onde torna-se crucial um algoritmo para definir a alocação destas fatias de rede, principalmente em cenários com demanda elástica de recursos ao decorrer do dia. Dentro deste contexto, este trabalho apresenta o algoritmo FUMU (FUZZY MULTICRITERIA) para definir o fatiamento da rede baseado em múltiplas métricas de rede, bem como adaptável as configurações fornecidas pelo administrador de rede. Os resultados dos experimentos realizados, usando topologia de redes reais, sugerem que o FUMU alcança um melhor balanceamento entre uso dos recursos do provedor e cumprimento dos requisitos de QoS para os clientes quando comparado com abordagens existente.*

## 1. Introdução

Na última década, os Provedores de Internet (*Internet Service Providers* - ISPs) vêm diversificando a sua prestação de serviço [Liang and Yu 2015], fornecendo diferentes

alternativas de acesso à Internet, onde a especificação do serviço é feita em um Acordo de Nível de Serviço (*Service Level Agreement* - SLA). Essas redes de acesso são interconectadas por uma rede de borda em comum antes de alcançar o núcleo da Internet [Doverspike et al. 2010].

Apesar das particularidades dos diferentes tipos de rede de acesso, todas elas precisam lidar com requisitos como baixo atraso, largura de banda (*Bandwidth* - Bw) compatível com a demanda das aplicações, resiliência e os gastos necessários pelo ISP, como por exemplo *Capital Expenditure* (CAPEX) e *Operational Expenditure* (OPEX). Todos esses fatores afetam a Qualidade de Serviço (*Quality of Service* - QoS) e a Qualidade de Experiência (*Quality of Experience* - QoE) dos usuários, os quais ficam frustrados quando o seu acesso a Internet sofre com problemas como lentidão, desconexões constantes, etc.

Atualmente, outra característica vital no acesso à Internet pelos usuários é a demanda elástica por recursos de rede ao decorrer do dia. Este fato ocorre devido a mobilidade urbana dentro das cidades, onde os ISPs necessitam aplicar uma alocação de recursos de rede elástica a fim de prover uma qualidade adequada aos serviços de Internet prestados.

A partir deste cenário, as tecnologias de Virtualização de Redes (*Network Virtualization* - NV), Redes Definidas por Software (*Software Defined Network* - SDN) e Virtualização de Funções de Rede (*Network Function Virtualization* - NFV), tornaram-se tecnologias base para fazer parte dos Provedores de Internet do Futuro (*Future Internet Service Providers* - FISPs) [Bi et al. 2016, Liang and Yu 2015, Han et al. 2015, Bradai et al. 2015, Sama et al. 2015, Nguyen et al. 2015]. A junção das tecnologias de NV, SDN e NFV permitem a divisão dos recursos presentes na infraestrutura de rede em fatias de rede (ou *slices*), onde cada fatia possui uma parte dos recursos de rede, bem como um comportamento particular moldado de acordo com os requisitos exigidos na fatia [Foukas et al. 2017, Vassilaras et al. 2017]. A fim de fornecer serviços elásticos, um dos aspectos essenciais é a alocação das fatias de rede, sendo necessário um algoritmo capaz de definir quais componentes da infraestrutura de rede (enlaces e nós) farão parte da fatia para atender os requisitos exigidos pelo cliente.

Portanto, os FISPs tendem a aplicar essa abordagem de fatias para melhorar a prestação de serviços, enquanto reduzem o investimento financeiro (CAPEX e OPEX). Em paralelo a este fato, os FISPs visam maximizar seus lucros, e duas métricas são diretamente relacionadas a este aspecto: (i) Número de clientes, que são os SLAs ativos com requisitos atendidos; e, (ii) Eficiência Energética (EE), que se dá pelo montante de Bw alocada pela quantidade de energia consumida pelo infraestrutura de rede.

Sendo assim, faz-se necessário englobar aspectos como planejamento, eficiência energética, disponibilidade de Bw, dentre outros, durante a tarefa de definição de fatias de rede. Uma abordagem multicritério é capaz de aprimorar a tarefa de definição de fatias de rede, onde uma abordagem é a utilização de sistemas *Fuzzy*, que são comumente usados como base para tomada de decisão com múltiplos critérios.

Dentro deste contexto, este artigo apresenta um algoritmo para definição de fatias de rede aplicando uma abordagem *Fuzzy* para considerar múltiplos critérios de impacto na infraestrutura da rede, mais especificamente foram usadas as métricas de consumo de energia e disponibilidade de largura de banda. Estas métricas foram escolhidas pois

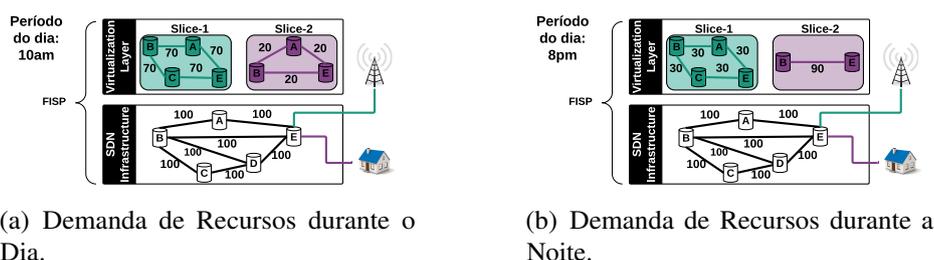
afetam diretamente a capacidade de aquisição de novos clientes e custos de OPEX dos FISPs. Adicionalmente, a utilização de uma abordagem baseada em sistemas *Fuzzy* habilita o administrador da rede a ajustar as funções de adesão (seja manualmente ou através de modelos de aprendizado por reforço) e, conseqüentemente, ajustar o sistema as particularidades do FISP e/ou atender alguma ocorrência eventual (falha inesperada de enlace ou roteador/comutador, manutenção preventiva, detecção de ataque cibernético, etc). Os experimentos realizados usando topologias de rede reais, sugerem que o FUMU alcança um melhor balanceamento entre uso dos recursos do provedor e cumprimento dos requisitos de QoS para os clientes quando comparado com abordagens existente, atendendo um maior número de clientes e obtendo uma maior eficiência energética.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: Os trabalhos relacionados são apresentados na Seção 3; a Seção 4 introduz o algoritmo proposto; a Seção 5 apresenta o resultado dos experimentos realizados; por fim, a Seção 6 conclui o trabalho.

## 2. Fatiamento de Rede com Demanda Elástica

A integração das abordagens SDN, NV e NFV visa trazer maior flexibilidade e isolamento para os FISPs. Um *network hypervisor* é utilizado para habilitar essa integração, criando fatias de rede customizáveis para atender clientes e prover serviços específicos. Cada fatia de rede é personalizável a partir da configuração do controlador ligado à ela, onde um controlador é responsável por uma fatia de rede. Este controlador pode instanciar as funções de rede presentes no NFV e aplicar essas funções dinamicamente.

A flexibilidade oriunda dessa abordagem permite aos provedores adaptarem as características das fatias de rede em tempo real, moldando-se para atender a demanda atual requisitada. As Figuras 1(a) e 1(b) ilustram tal cenário, onde duas fatias de rede são implantadas para diferentes clientes. Assim, inicialmente cada fatia de rede é moldada de acordo com as características do cliente (Figura 1(a)), e posteriormente são adaptadas para as novas características (Figura 1(b)).



**Figura 1. Ilustração do Contexto**

Os parâmetros da fatia de rede englobam algumas métricas, entre elas a largura de banda, que é o foco deste artigo. Nos exemplos ilustrados nas Figuras 1(a) e 1(b), um cliente negocia um SLA com o FISP, e este implanta o *Slice-1* verde, que possui largura de banda de 70 Mbps em um certo período do dia (Figura 1(a)) e 30 Mbps em outro (Figura 1(b)), atendendo assim a demanda de largura de banda elástica que ocorre no decorrer do dia.

Um algoritmo de alocação é aplicado pelo FISP para definir quais componentes da infraestrutura de rede SDN serão associados a cada fatia de rede a ser implantada a fim

de atender um cliente. Portanto, este trabalho apresenta um algoritmo para realizar essa tarefa de alocação considerando a demanda elástica de largura de banda ao decorrer do dia especificada no SLA negociado entre cliente e ISP, a utilização da largura de banda disponível nos ISPs e o consumo de energia da infraestrutura de rede.

### 3. Trabalhos Relacionados

Nesta seção serão descritos os trabalhos chave relacionados a definição de topologias virtuais e fatias de rede. A Tabela 1 resume os trabalhos descritos, enfatizando a diferença entre eles e a proposta deste artigo. Cada coluna da Tabela 1 especifica uma característica do trabalho: *Contexto* apresenta o ambiente de rede usado, enquanto *Critério* é o conjunto de informações usadas para implantar as redes virtuais ou as fatias de rede.

Nguyen et al. [Nguyen et al. 2015] mostram o *framework* ReServNet, o qual é projetado para a definição multinível de redes virtuais em infraestruturas de redes SDN. O ReServNet foca em um compartilhamento hierárquico de enlaces de rede e a reserva de largura de banda para redes virtuais. Apesar de ser baseado nas abordagens SDN e NV, o *framework* ReServNet não realiza o ajuste dinâmico de recursos alocados para redes virtuais. Este fato faz com que o *framework* não atenda uma das principais necessidades dos FISPs: lidar com a demanda elásticas de recursos para os diversos serviços.

Bradai et al. [Bradai et al. 2015] propõem uma arquitetura para redes celulares móveis baseada em SDN, chamada *Cellular SDN* (CSDN). Esta arquitetura, que tem como base as abordagens SDN e NFV, aplica uma análise de dados da rede em tempo real para otimizar o uso dos recursos de rede e o desempenho das aplicações. O CSDN modifica o plano de controle do SDN a fim de criar um *Knowledge Plane* que realiza essa análise de dados. Portanto, o CSDN não interopera com as abordagens existentes de SDN e NFV, bem como não lida com as questões de largura de banda elástica.

Cheng et al. [Cheng et al. 2012] apresentam um método para gerar um *ranking* de nós mais adequados e um algoritmo guloso para combinar nós de uma rede virtual para nós na infraestrutura de rede. Da mesma forma, Mano et al. [Mano et al. 2014] descrevem um método para otimizar a implantação de redes virtuais sob múltiplos domínios, sem revelar informações privadas de cada domínio. Apesar de ambas as propostas focarem em implantação de redes virtuais, elas são baseadas em contextos específicos (capacidade de gerar *ranking* e múltiplos domínios) e não consideram o aspecto chave deste artigo: a variação na demanda ao decorrer do dia.

Bektas et al. [Bektas et al. 2018] apresenta uma estratégia de fatiamento de rede de ponta a ponta que inclui acesso de rádio e *Core Network* (CN), combinando assim SDN e NFV no CN como uma abordagem baseada em LTE. A estratégia foi projetada para levar em conta os novos princípios do 5G para lidar com casos de uso relacionados a Sistemas de Transporte Inteligentes (ITSs) ou serviços multimídia, atribuindo uma fatia de rede adaptada aos seus requisitos específicos. Contudo, esta proposta não considera a demanda elástica de recursos de rede ao longo do dia.

Kurtz et al. [Kurtz et al. 2018] apresenta uma abordagem baseada em NFV e SDN para fatiamento de rede para comunicações de infraestruturas críticas (*Critical Infrastructure* - CIs) em infraestruturas 5G compartilhadas para atender a seus requisitos específicos. A proposta discute a abordagem em cenários como *Smart Grids* (SG) e fluxos

de tráfego de Sistemas de Transporte Inteligentes (*Intelligent Transportation System - ITS*) abrangendo serviços 5G. No entanto, esta proposta não foca na demanda elástica de recursos de rede ao longo do dia.

Em propostas anteriores, os autores desenvolveram um algoritmo para geração de topologias virtuais de acordo com a confiabilidade de rede desejada: o *Bandwidth and Reliability According to Redundancy* (BRAR) [Gomes et al. 2016]. O algoritmo BRAR define caminhos alternativos com a melhor relação entre a confiabilidade de rede e a Bw alocada. Contudo, este trabalho, assim como os demais citados, não consideram a variação na demanda de largura de banda ao decorrer do dia. Portanto, a proposta deste artigo evolui as abordagens de alocação de fatias de rede existentes para tratar o comportamento elástico da largura de banda que ocorrem nos FISPs.

**Tabela 1. Trabalhos Relacionados**

Referência	Contexto	Foco
Nguyen et al. [Nguyen et al. 2015]	SDN	Reserva de Bw
Bradai et al. [Bradai et al. 2015]	SDN	Otimizar os recursos de rede
Cheng et al. [Cheng et al. 2012]	Virtualização	Ranking de adequação
Mano et al. [Mano et al. 2014]	Virtualização	Múltiplos domínios
Bektas et al. [Bektas et al. 2018]	SDN	Múltiplos domínios
Kurtz et al. [Kurtz et al. 2018]	SDN	Múltiplos domínios
Gomes et al. [Gomes et al. 2016]	V-SDN	Confiabilidade e Bw
Algoritmo <i>FUMU</i> (este trabalho)	FISP	Bw Elástica

A partir da revisão literária realizada, não foram encontrados trabalhos que focam no desenvolvimento de um algoritmo que permite aos FISPs lidarem com a largura de banda elástica que ocorre ao decorrer do dia, enquanto tentam melhorar a utilização dos seus recursos de rede, que é o foco da proposta deste trabalho.

## 4. Proposta

Esta seção descreve o algoritmo FUMU (*FU*zzy *MU*lticriteria) proposto para tratar o problema de definição de fatias de rede em cenários com demanda elástica considerando múltiplos critérios. Adicionalmente, é apresentada a métrica para mensurar o impacto da alocação das fatias na infraestrutura de rede, a qual é utilizada como critério para a definição das fatias de rede. A fim de facilitar a compreensão da proposta, um sumário da notação aplicada ao decorrer do trabalho é apresentado na Tabela 2.

### 4.1. Descrição do Problema

A demanda elástica por recursos que ocorre ao decorrer do dia influencia diretamente a eficiência dos FISPs em sua prestação de serviços para os mais diversos clientes. Desta forma, os FISPs devem adaptar as características do serviço prestado a fim de gastar menos recursos de rede ao atender os seus clientes (cumprindo os SLAs ativos). Uma característica deste novo cenário é a variação da largura de banda exigida pelos clientes ao decorrer do dia, ou seja, a cada hora (ou faixa de minutos) uma reserva de largura de banda é necessária.

**Tabela 2. Notação Utilizada**

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
$G$	grafo representando a infraestrutura de rede
$c$	nó cliente
$D$	conjunto de destinos o qual deseja-se conectar
$L$	conjunto de enlaces da infraestrutura de rede
$N$	conjunto de nós da infraestrutura de rede
$l$	enlace entre dois nós
$l_{w,t}$	custo/peso do enlace $l$ no período $t$
$C$	conjunto de clientes do FISP
$l_{Bw,t}$	largura de banda disponível no enlace $l$ no período $t$
$l_{En,t}$	energia consumida no enlace $l$ no período $t$
$E_C(x)$	consumo de energia do enlace quando $x$ Mbps são alocados nele
$T$	conjunto de períodos do dia (ou <i>slots</i> de tempo) definido no SLA
$Bw_{c,t}$	largura de banda requisitada pelo cliente $c$ para o slot de tempo $t$
$S$	controle de nós analisados
$W$	controle do melhor custo para alcançar os nós durante o processo de busca
$F$	conjunto de fatias de rede para todos os períodos definidos
$\varepsilon$	quantidade próxima a zero

Uma das formas existentes de lidar com esta nova realidade é prover serviços baseados na alocação de fatias de rede sobre uma infraestrutura SDN. Portanto, é necessário um algoritmo para alocar as fatias de rede durante cada período do dia determinado, a partir da demanda de largura de banda de cada cliente do FISP. Pode-se definir esse problema da forma a seguir:

- $G$  é um grafo representando a infraestrutura SDN onde as fatias de rede serão alocadas, ou seja,  $G = (N, L)$ , onde  $N = \{n_1, \dots, n_k\}$  é o conjunto dos  $k$  nós e  $L = \{l_1, \dots, l_m\}$  é o conjunto dos  $m$  enlaces.
- $C$  é o conjunto de  $c$  clientes do FISP com SLAs ativos, sendo assim,  $C = \{c_1, \dots, c_c\}$ .
- $T$  são os  $s$  períodos de alocação definidos no SLA com os clientes, a fim de habilitar o ISP a planejar a alocação de recursos. Então, tem-se que  $T = \{t_1, \dots, t_s\}$ .
- $B_{i,j}$  é a largura de banda requisitada por um cliente  $i$  para o período  $j$  do dia.
- $F$  é o conjunto de fatias de rede que precisam ser alocadas para atender os clientes do FISP (uma fatia de rede por cliente).
- $F_{i,j}$  representa uma fatia de rede que atende o cliente  $i$  no período  $j$  (contendo as Bw requisitadas por período).

Sendo assim, o processo de alocação das fatias de rede necessárias para atender os clientes e as especificações dos SLAs (um por cliente) deve gerar o conjunto de fatias de rede de acordo com a Equação 1.

$$F = \sum_{i=1}^{|C|} \sum_{j=1}^{|T|} F_{i,j} \quad (1)$$

Com  $F_{i,j} = (\overline{N_{i,j}}, \overline{L_{i,j}})$ , onde  $\overline{N_{i,j}}$  é um subconjunto dos nós  $N$  e  $\overline{L_{i,j}}$  é um subconjunto dos enlaces  $L$  presentes na infra-estrutura SDN. Portanto, cada enlace da fatia de rede deve possuir uma reserva de largura de banda  $B_{i,j}$  a fim de atender o SLA firmado com o cliente  $i$  para o período do dia  $j$  em questão.

A formalização trata do contexto de planejamento de fatias de rede a partir dos períodos do dia e da BW requisitada pelo cliente, focando no cumprimento do SLA (Bw requisitada precisa ser atendida para os períodos do dia). Desta forma, a formalização atual pode ser estendida, como por exemplo agregando um contexto de predição e alocação dinâmica.

## 4.2. Métrica de Adequabilidade

No conceito tradicional de conjuntos, um elemento pertence totalmente ou não a um certo conjunto. Por outro lado, os conjuntos *Fuzzy* definem funções de adesão limitadas ao intervalo  $[0, 1]$ , para expressar o grau de adesão de um elemento em relação ao conjunto em questão, representado por  $\mu(x)$  [Abedin et al. 2011]. Além disso, os conjuntos *Fuzzy* são uma ferramenta para lidar com problemas de tomada de decisão, devido a duas razões: (i) lidam com o conceito de “grau de satisfação”; e (ii) têm uma estrutura matemática para manipular informações vagas.

Inicialmente, os valores de consumo de energia ( $En$ ) e largura de banda ( $Bw$ ) são calculados de acordo com as Equações 2 e 4, respectivamente. A partir disso, os valores de consumo de energia ( $En$ ) e largura de banda ( $Bw$ ) são convertidos em variáveis linguísticas, a partir das funções de adesão respectivas, ilustradas nas Figuras 2(a) e 2(b).

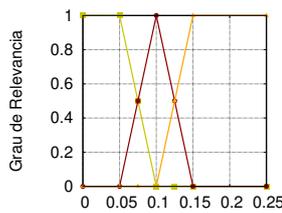
$$En = \frac{E_C(l_{Bw,t})}{E_C(l_{Bw,t} + Bw_{c,t})} \quad (2)$$

$$E_C(x) = \begin{cases} 0.48, & \text{se } 0Mbps < x \leq 100Mbps; \\ 0.9, & \text{se } 100Mbps < x \leq 600Mbps; \\ 1.7 & \text{se } 600Mbps < x \leq 1Gbps; \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases} \quad (3)$$

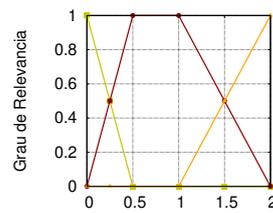
$$Bw = \exp\left(\frac{l_{Bw,t}}{Bw_{c,t}}\right), \text{ se } Bw_{c,t} \leq l_{Bw,t}; \quad (4)$$

Posteriormente, as variáveis linguísticas geradas são aplicadas no conjunto de regras (apresentado na Tabela 3) e produzem um conjunto de variáveis linguísticas relacionadas a função de adesão *Score*, a qual é usada como saída e é mostrada na Figura 2(c). A configuração definida do conjunto de regras visa favorecer o uso de caminhos com pequeno impacto na Bw disponível (valores *Low* e *Medium*) e que consigam, ao menos, manter o consumo de energia atual do FISP (valor *Low*).

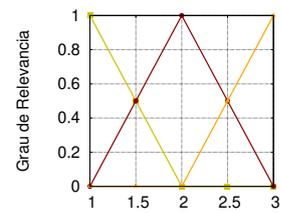
Por fim, as variáveis linguísticas vindas do sistema de inferência são convertidas em um valor real de acordo com o método Weight Average Maximum (Equação 5), pois é um método eficaz e de baixo processamento, encaixando-se no escopo do trabalho que visa realizar as alocações de fatias de rede em tempo real. Este método produz um valor numérico considerando o peso médio dos maiores valores (pico das variáveis linguísticas mostradas na Figura 2(c)).



(a) Função para *Bw*.



(b) Função para *Energia*.



(c) Função para *Score*.

**Figura 2. Funções de Adesão**

**Tabela 3. Conjunto de Regras**

Energia	Operação	Largura de Banda	Score
High	E	High	Low
High	E	Medium	Low
High	E	Low	Low
Medium	E	High	Low
Medium	E	Medium	Medium
Medium	E	Low	Medium
Low	E	High	Medium
Low	E	Medium	High
Low	E	Low	High

$$Score = \frac{(1 * \mu_H(x)) + (2 * \mu_M(x)) + (3 * \mu_L(x))}{(\mu_H(x) + \mu_M(x) + \mu_L(x))} \quad (5)$$

Portanto, o resultado oriundo da Equação 5 representa o *Score* associado ao link da infraestrutura de rede para a alocação da fatia processada no momento (o *Score* é calculado pelo método *Fuzzy(Bw, En)* no algoritmo *FUMU*). Na Equação 5,  $\mu_H(x)$  é o grau de adesão da variável *High*,  $\mu_M(x)$  é o grau de adesão da variável *Medium*, e  $\mu_L(x)$  é o grau de adesão da variável *Low*. Os valores 1, 2, e 3 são os máximos das variáveis *High*, *Medium*, e *Low*, respectivamente, como mostrado na Figura 2(c).

### 4.3. Algoritmo FUMU

Esta seção apresenta o algoritmo *FUMU* para a alocação de fatias de rede de acordo com a demanda de largura de banda exigida para os períodos do dia. O algoritmo *FUMU* é um algoritmo guloso determinístico, que tem como base a ideia de busca por fatias de rede mais adequadas, enquanto usa a fatia de rede alocada no período anterior como base para a busca do próximo período. Adicionalmente, utiliza-se a métrica descrita na Seção 4.2 para determinar o peso/custo dos enlaces. Uma visão geral do *FUMU* é apresentada no Algoritmo 1.

O Algoritmo 1 apresenta o funcionamento do *FUMU* para a análise de uma requisição de um cliente, representado por *c*. Assim, percorre-se todos os períodos de tempo definidos (*T*) a fim de analisar a forma mais adequada de alocação das fatias para atender o cliente.

Inicialmente, entre as linhas 3 e 10, atribui-se os pesos/custos dos enlaces para a análise corrente. Se a fatia de rede alocada anteriormente, caso exista (ou seja, não é o primeiro período analisado), pode ser usada como base, incentiva-se a reutilização dos enlaces ao dar um custo muito próximo de zero (representado por  $\epsilon$ ). Considera-se uma opção para base as fatias de rede que necessitam de largura de banda menor ou igual a anterior, visto que proporcionam um menor número de modificações na infraestrutura alocada ao decorrer do dia.

---

**Algorithm 1: FUMU**


---

```

1  foreach Período  $t \in T$  do
2      foreach Enlace  $l \in L$  do
3          if  $B_{w_c,t-1} \geq B_{w_c,t}$  e  $l \in F_{c,t-1}$  then
4               $l_{w,t} = \epsilon$ 
5          end
6          else
7               $l_{w,t} = Fuzzy(B_{w_c,t}, En(B_{w_c,t}));$ 
8          end
9      end
10      $S = N - \{c\};$ 
11     foreach Nó  $j \in S$  do
12          $W_j = \infty;$ 
13          $l = getLinkInfo(c, j);$ 
14         if  $((l_{w,t} < \infty)$  e  $(l_{Bw,t} \geq B_{w_c,t}))$  then
15              $W_j = l_{w,t};$ 
16         end
17     end
18     while  $S \neq \emptyset$  do
19         Nó  $Min = lower(W);$ 
20          $l = getLinkInfo(c, Min);$ 
21         if  $(l_{Bw,t} < B_{w_c,t})$  then
22             Termina o algoritmo, retornando falha (não é possível atender o
23             cliente);
24         end
25          $S' = S' - \{Min\};$ 
26         foreach Nó  $j \in S$  do
27              $l = getLinkInfo(Min, j);$ 
28             if  $((l_{w,t} < \infty)$  e  $(W_j > W_{Min} + l_{w,t})$  e  $(l_{Bw,t} > B_{w_c,t}))$  then
29                  $W_j = W_{Min} + l_{w,t};$ 
30             end
31         end
32     end
33     forall Nó  $d \in D$  do
34         Incluir em  $F_{c,t}$  os enlaces que fazem parte de  $W_d;$ 
35     end

```

---

Posteriormente, as linhas de 12 a 18 iniciam o processo de busca pelo conjunto de enlaces que melhor se adequam para a alocação da fatia de rede. Sendo assim, a variável  $W$  controle do custo para alcançar cada um dos  $k$  nós da infraestrutura de rede, onde os nós vizinhos diretos do cliente  $c$  recebem o custo  $l_{w,t}$  (obtido pela função *getLinkInfo*), enquanto que para os demais nós é atribuído um valor  $\infty$  (infinito).

Da linha 19 à 33, o algoritmo percorre os nós existentes ainda não processados (representado por  $S'$ ) verificando se o nó com melhor custo para o nó  $Min$  (definido pela função *lower*) pode ser usado para alcançar outros nós com menor custo. Caso o nó considerado mais adequado ( $Min$ ) possua um custo que não atende a largura de banda requisitada para o período ( $Bw_{c,t}$ ), o algoritmo identifica que não pode atender o cliente em questão, então o processo de busca é interrompido (linha 22). Após a identificação do nó mais adequado, o algoritmo percorre os nós existentes verificando se a partir do nó  $Min$  pode-se alcançar os demais nós com um custo menor ( $W_j > W_{Min} + l_{w,t}$ ), contanto que estes possuam pelo menos a largura de banda requisitada ( $l_{Bw,t} > Bw_{c,t}$ ).

Finalmente, entre as linhas 33 e 35, forma-se a fatia de rede tempo  $F_{c,t}$ , incluindo os enlaces considerados mais adequados para os nós do conjunto de destinos  $D$ . Portanto, a partir desse ponto a fatia de rede para o período de tempo  $t$  requisitada pelo cliente  $c$  é considerada definida.

## 5. Resultados

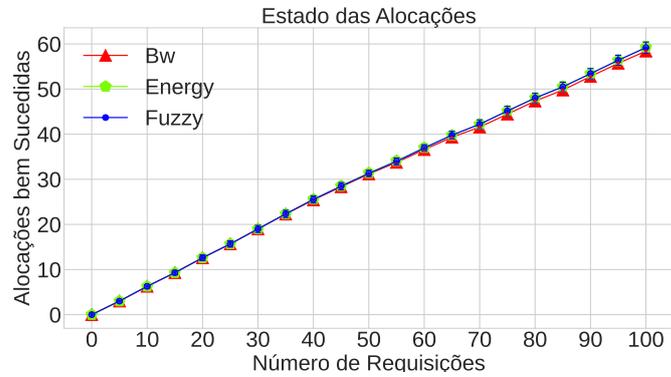
Nesta seção apresenta-se os resultados dos experimentos realizados, comparando o desempenho do algoritmo *FUMU* com uma abordagem existente atualmente de alocação de recursos pelo máximo de requisição, visando atender integralmente a demanda dos clientes. Para isso, foi implementado o algoritmo *Maximum-Request*, baseado no algoritmo de busca por caminhos largos [Medhi and Ramasamy 2007]. O algoritmo *Maximum-Request* visa encontrar o caminho com maior largura de banda disponível independente do número de enlaces utilizados, apenas focando em atender a largura de banda requisitada pelo cliente. Sendo assim, o *Maximum-Request* não aplica pesos aos enlaces, ele apenas usa o montante de largura de banda disponível como critério no processo de busca. Este algoritmo foi escolhido como base para comparação pois não foram encontradas na literatura propostas no mesmo contexto do FUMU (alocação por períodos do dia, considerando especificações de SLA).

O resultado dos experimentos são ilustrados na Figura 3 e na Figura 4, onde foram avaliadas três métricas:

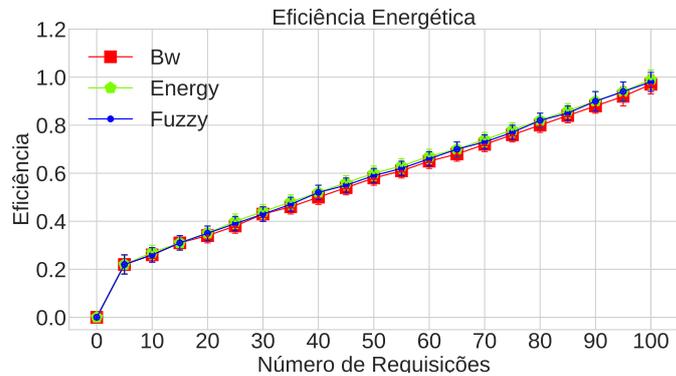
- Alocações bem sucedidas (Figura 3(a) e Figura 4(a)): o número de requisições solucionadas, ou seja, quantas requisições de fatias de rede o algoritmo foi capaz de alocar com a confiabilidade e a largura de banda desejadas;
- Eficiência energética (Figura 3(b) e Figura 4(b)): avalia se o consumo de energia do ISP está sendo eficaz (quanto maior melhor). A eficiência energética é modelada seguindo a Equação (6), onde  $A$  é o conjunto de fatias de rede alocadas que estão ativas,  $a_{Bw}$  é a largura de banda alocada para atender a requisição  $a$  e  $En_C$  é o consumo de energia atual do FISP (mensurado de acordo com a referência [Mahadevan et al. 2009]).

$$En_{Eff} = \sum_{a \in A} \frac{a_{Bw}}{En_C} \quad (6)$$

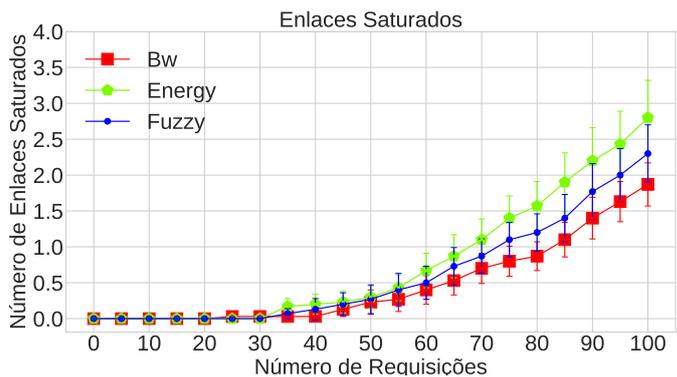
- Enlaces saturados (Figura 3(c) e Figura 4(c)): o número de enlaces que ficaram com menos de 10% de largura de banda disponível.



(a) Alocações bem sucedidas.



(b) Eficiência energética.

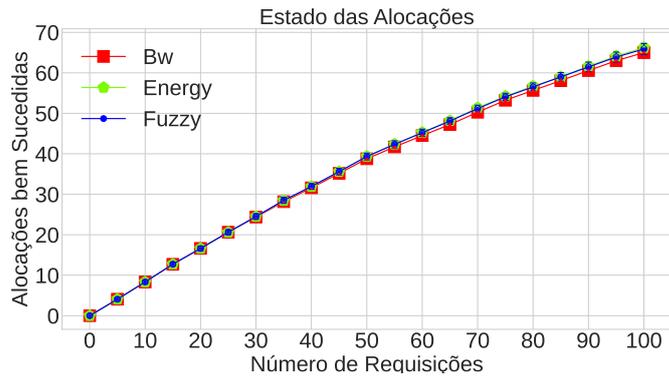


(c) Enlaces saturados.

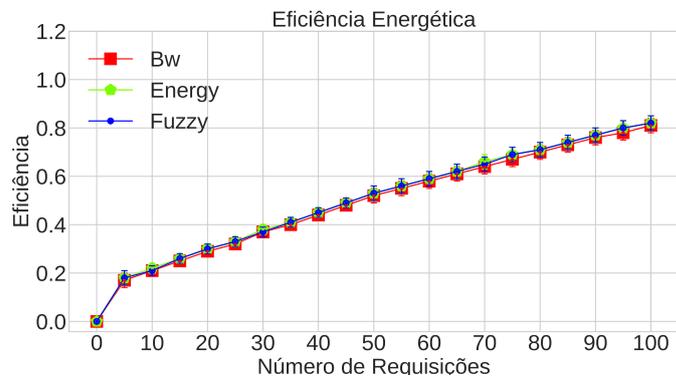
**Figura 3. Desempenho dos algoritmos avaliados com a topologia ATT**

As Figuras 3(a) e 4(a) ilustram o número de requisições alocadas com sucesso (isto é, que cumprem o SLA). Em geral, o algoritmo *FUMU* solucionou em média, cerca de 2% mais requisições que o algoritmo *Maximum-Request* nas topologias ATT e GEANT.

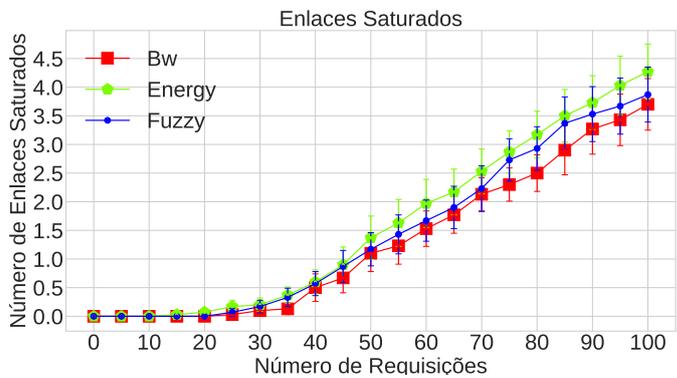
Este melhor desempenho ocorre devido a característica do algoritmo *FUMU* em considerar a largura de banda disponível em cada enlace para alocar as fatias de rede de



(a) Alocações bem sucedidas.



(b) Eficiência energética.



(c) Enlaces saturados.

**Figura 4. Desempenho dos algoritmos avaliados com a topologia GEANT**

acordo com os períodos do dia, resultando em um melhor balanceamento de alocações por toda a infraestrutura de rede. Como consequência das alocações realizadas, a eficiência energética do FISP é maior (em torno de 3%) quando o algoritmo *FUMU* é aplicado, como pode ser visualizado nas Figuras 3(b) e 4(b).

De acordo com as Figuras 3(c) e 4(c), o algoritmo *FUMU* apresenta uma disponibilidade de largura de banda maior que a abordagem considerando o critério de energia, visto que o número de enlaces saturados é menor. A aplicação do algoritmo *FUMU* resulta em

um número maior de alocações de fatias de rede. Entretanto, algoritmo *Maximum-Request* ainda apresenta uma disponibilidade de largura de banda maior que a do FUMU.

Baseado nos experimentos realizados, os resultados indicam que o algoritmo *FUMU* pode evoluir o processo de alocação de fatias de rede para os FISPs. O algoritmo *FUMU*, além de ter uma disponibilidade de Bw maior do que a abordagem existente, consegue alocar mais requisições (em torno de 2% maior) e eleva a eficiência energética do ISP (em torno de 3%).

Além dos resultados de QoS apresentados acima, o algoritmo *FUMU* traz duas vantagens extras aos FISPs: (I) Flexibilidade, é possível adaptar a métrica de adequação definida de acordo com a determinação do administrador da rede, pois novas situações podem ocorrer durante o tempo, bem como o modelo fuzzy (conjunto de regras, funções de pertinência e formulação de pontuação); e, (II) Expansibilidade, a abordagem fuzzy modelada permite que o administrador da rede inclua novas métricas de rede e melhore o modelo projetado quando for necessário, possibilitando a inclusão de informações sobre confiabilidade, atraso, jitter e outras medidas de rede. Desta forma, o *FUMU* pode melhorar a capacidade de gerenciamento de rede dos FISPs, enquanto aumenta a entrega de QoS dos IAS dos FISPs.

## 6. Conclusão

A aplicação das abordagens NV, SDN e NFV traz flexibilidade e gerenciabilidade para os FISPs, permitindo melhorar o uso da infraestrutura de rede e a prestação de serviço aos seus clientes a partir da definição de fatias de rede. Contudo, a alocação de fatias de rede ainda é um desafio em aberto. Portanto, este trabalho propõe um algoritmo de alocação de fatias de rede.

O algoritmo proposto, chamado *FUMU*, foca em alocar as fatias de rede de acordo com a demanda de tráfego requisitada pelos clientes ao decorrer do dia, enquanto reduz a utilização da largura de banda e melhora. O algoritmo *FUMU* supera a abordagem existente de alocação superior, atendendo um maior número de clientes e obtendo uma maior eficiência energética. Estes fatos habilitam a maximização dos lucros dos FISPs, bem como o fornecimento de serviços de qualidade com preços reduzidos.

Como trabalhos futuros, pretende-se estender o algoritmo proposto para aplicar mais critérios durante a alocação das fatias de rede, bem como integrar um modelo de aprendizado por reforço a fim de ajustar dinamicamente os parâmetros das funções de adesão do sistema *Fuzzy* desenvolvido.

## Referências

- Abedin, F., Chao, K.-M., and Godwin, N. (2011). A fuzzy group decision making process in a multi-agent negotiation environment. In *15th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, pages 311–318.
- Bektas, C., Monhof, S., Kurtz, F., and Wietfeld, C. (2018). Towards 5g: An empirical evaluation of software-defined end-to-end network slicing. In *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 1–6. IEEE.
- Bi, J., Zhu, S., Sun, C., Yao, G., and Hu, H. (2016). Supporting virtualized network functions with stateful data plane abstraction. *IEEE Network*, 30(3):40–45.

- Bradai, A., Singh, K., Ahmed, T., and Rasheed, T. (2015). Cellular software defined networking: a framework. *IEEE Communications Magazine*, 53(6):36–43.
- Cheng, X., Su, S., Zhang, Z., Shuang, K., Yang, F., Luo, Y., and Wang, J. (2012). Virtual network embedding through topology awareness and optimization. *Computer Networks*, 56(6):1797 – 1813.
- Doverspike, R. D., Ramakrishnan, K. K., and Chase, C. (2010). *Guide to Reliable Internet Services and Applications*, chapter Structural Overview of ISP Networks, pages 19–93. Springer London, London.
- Foukas, X., Patounas, G., Elmokashfi, A., and Marina, M. K. (2017). Network slicing in 5g: Survey and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(5):94–100.
- Gomes, R. L., Bittencourt, L. F., Madeira, E. R. M., Cerqueira, E. C., and Gerla, M. (2016). A combined energy-bandwidth approach to allocate resilient virtual software defined networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 1(1):1–1.
- Han, B., Gopalakrishnan, V., Ji, L., and Lee, S. (2015). Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations. *IEEE Communications Magazine*, 53(2):90–97.
- Kurtz, F., Bektas, C., Dorsch, N., and Wietfeld, C. (2018). Network slicing for critical communications in shared 5g infrastructures-an empirical evaluation. In *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*, pages 393–399. IEEE.
- Liang, C. and Yu, F. R. (2015). Wireless virtualization for next generation mobile cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 22(1):61–69.
- Mahadevan, P., Sharma, P., Banerjee, S., and Ranganathan, P. (2009). Energy Aware Network Operations. In *IEEE INFOCOM Workshops 2009*, pages 1–6.
- Mano, T., Inoue, T., Ikarashi, D., Hamada, K., Mizutani, K., and Akashi, O. (2014). Efficient virtual network optimization across multiple domains without revealing private information. In *2014 23rd International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, pages 1–8.
- Medhi, D. and Ramasamy, K. (2007). *Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- Nguyen, H. T., Vu, A. V., Nguyen, D. L., Nguyen, V. H., Tran, M. N., Ngo, Q. T., Truong, T.-H., Nguyen, T. H., and Magedanz, T. (2015). A generalized resource allocation framework in support of multi-layer virtual network embedding based on {SDN}. *Computer Networks*, 92, Part 2:251 – 269. Software Defined Networks and Virtualization.
- Sama, M. R., Contreras, L. M., Kaippallimalil, J., Akiyoshi, I., Qian, H., and Ni, H. (2015). Software-defined control of the virtualized mobile packet core. *IEEE Communications Magazine*, 53(2):107–115.
- Vassilaras, S., Gkatzikis, L., Liakopoulos, N., Stiakogiannakis, I. N., Qi, M., Shi, L., Liu, L., Debbah, M., and Paschos, G. S. (2017). The algorithmic aspects of network slicing. *IEEE Communications Magazine*, 55(8):112–119.