

OTIMIZAÇÃO DE PROVISIONAMENTO DE LARGURA DE BANDA USANDO REDES DE PETRI NA MODELAGEM DE COMPORTAMENTO DE CLIENTES E PROVEDORES

FLÁVIO HENRIQUE BATISTA DE SOUZA, CARLOS ANDREY MAIA, RODNEY R. SALDANHA

1. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

E-mails: flabasouza@yahoo.com.br, maia@cpdee.ufmg.br, rodney@cpdee.ufmg.br

Abstract— This paper shows the use of Petri nets as a way to obtain and consolidate the behavior of a internet services client. They are able to analyze the behavior of an existing demand or operating in conjunction with a simulation algorithm of behavior guided by customer profile. In addition to the simulation, this set is integrated to a genetic algorithm to propose the optimization of the structure of the network is operational or in planning.

Keywords— Petri Nets, Optimization, Bandwidth Provisioning

Resumo— Este trabalho mostra a utilização das redes de Petri como uma forma de obter e consolidar o comportamento de um cliente de serviços de internet. Elas são capazes de analisar o comportamento de uma demanda existente ou operar em conjunto com um algoritmo de simulação de comportamento orientado pelo perfil do cliente. Além da simulação, este conjunto é integrado a um algoritmo genético para propor a otimização da estrutura da rede que esteja operacional ou em planejamento.

Palavras-chave— Redes de Petri, Otimização, Provisionamento de Largura de Banda de Redes

1 Introdução

As redes de Petri podem ser utilizadas como um processo discreto de avaliação de uma demanda ou utilização de determinado recurso (Cassandras, 2008). As rP's podem interagir com o Algoritmo Genético (AG) (Pour, 2010).

Como descrito por Huang (2004) e Pour (2010), tal interação ocorre de forma que o AG pode prover a combinação ótima de disparos de uma rP.

Esta pesquisa explora esta forma de operação com outro foco, onde a rP orienta um AG em um processo de otimização de provisão de recursos. A rP fica responsável pela realização de uma coleta discreta de uma demanda, afim de gerar índices de utilização de recursos que possam orientar o processo de otimização do AG.

Foi abordado o problema de provisionamento de largura de banda de internet (Hayajneh, 2008; Wu, 2005), de forma que a ferramenta desenvolvida fosse capaz de:

1. Identificar a demanda de uma rede operacional de um ISP (Internet Services Provider).
2. Simular a possível demanda de recursos para um projeto em desenvolvimento.

O processo de simulação é auxiliado por um algoritmo chamado Profile, que é orientado pelo perfil do cliente alvo do projeto.

Conforme o problema abordado, o AG que compõe a ferramenta avalia qual a melhor estrutura de provisão de largura de banda que o ISP pode obter para atender seus clientes.

2 Redes de Petri

A representação gráfica de uma rede de Petri (rP) consiste num grafo composto por nós ligados por segmentos orientados, denominados arcos (A). Este grafo conta com dois tipos de nós, denominados lugares (P) e transições (T). Os lugares (P) são representados por círculos e as transições (T) são representadas por barras ou retângulos. Cada arco é dirigido e terminado por uma seta. Os arcos interligam um lugar a uma transição ou uma transição a um lugar. Uma rP é um grafo bipartido e direcionado. O número de lugares e transições é finito e não nulo. Tal estrutura considera a marcação x , gerando uma quíntupla (P, T, A, w, x) (Cassandras, 2008).

Foi desenvolvida uma estrutura focada em identificar, independente do meio de comunicação, a demanda de serviços de um cliente de um ISP.

Assim, rP's específicas foram desenvolvidas para capturar essas informações no cenário mostrado pela Figura 1.

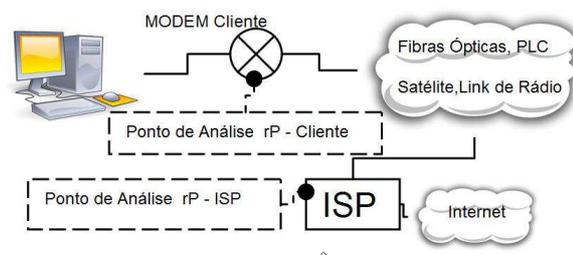


Figura 1. Cenário de análises das rP's.

As rP's tem o objetivo de consolidar as demandas do cliente. Cada cliente é analisado durante um período de 24 horas. Cada minuto deste período é

considerado um instante de análise k ($k = 1$ minuto, o que implicam em 1440 instantes k analisados em 24 horas), como mostra a Figura 2.

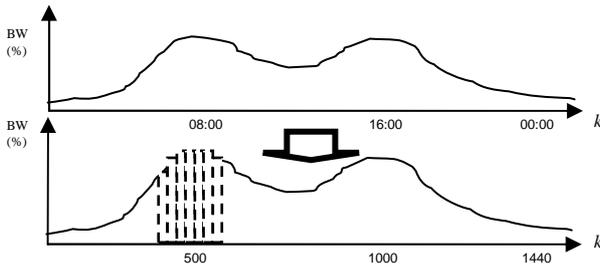


Figura 2. Instantes de Análise k .

A rP que identifica a informação do cliente, re-trata um grupo Δ de percentual de navegação que está sendo usado, onde $\Delta = \{15, 25, 50, 75, 100\}$ em % (ex. se o cliente estiver navegando entre 0.1 e 15 % de sua largura de banda total, $\Delta = \{15\}$), e os Ω protocolos que utilizados durante a navegação, onde $\Omega = \{\text{HTTP, FTP, SMTP, POP3, TELNET}\}$. Esta é a rP -Cliente, descrita na Figura 3.

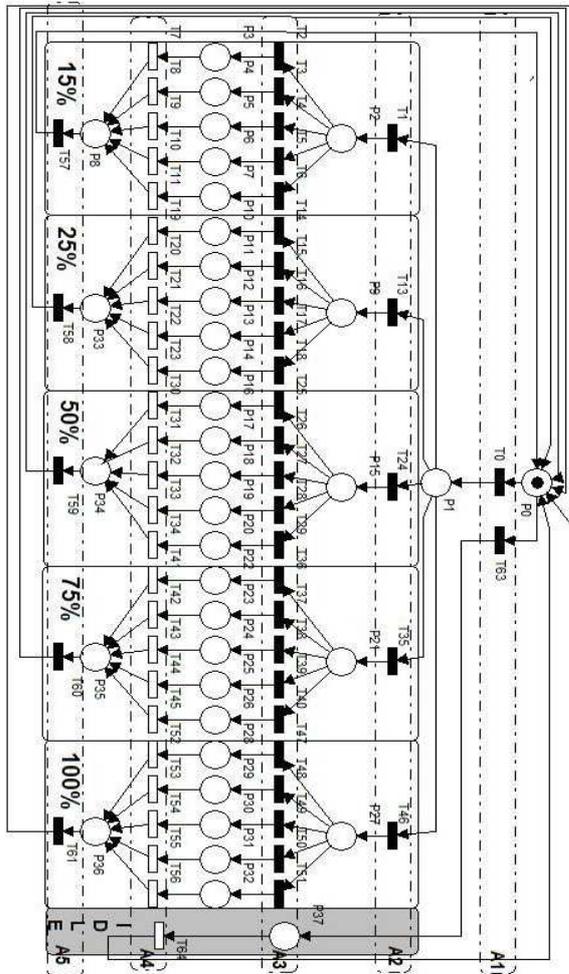


Figura 3. rP -Cliente

A outra rP é a rP -ISP (responsável pela análise no ambiente do provedor de serviços), que consolida as informações encaminhadas por cada rP -Cliente, e é mostrada na Figura 4.

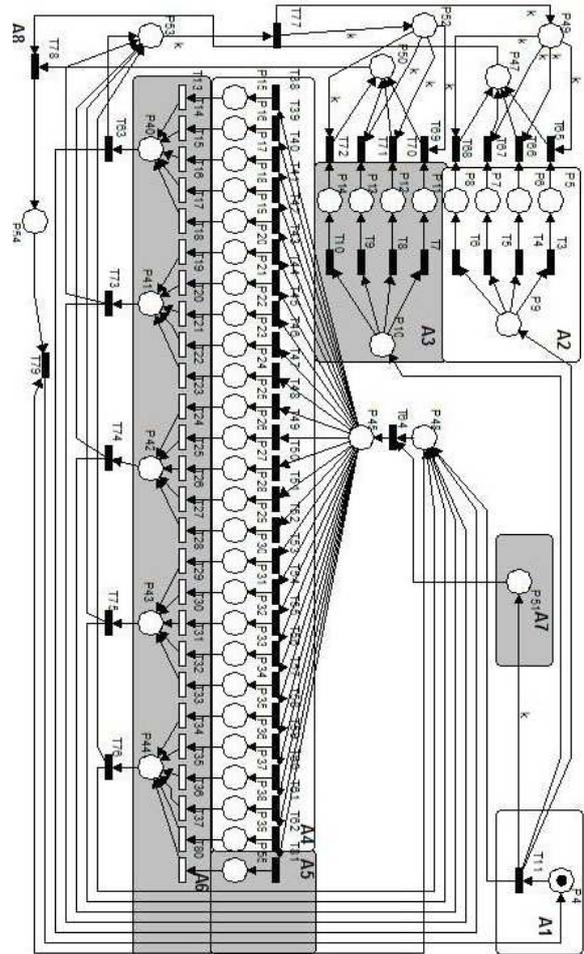


Figura 4. rP -ISP

Cada rP tem um grupo A de análise como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Análise rP -Cliente e rP -ISP

	Análise	Descrição
rP - Cliente	A1	O MODEM está ativo?
	A2	Está com qual Percentual da banda contratada?
	A3	Qual Protocolo está utilizando?
	A4	Encaminhe o Estado atual da rede e aguarde x unidades de tempo para iniciar nova análise
	A5	Reinicie a análise
rP -ISP	A1	Analisar Cliente
	A2	Qual o Tipo do Cliente?
	A3	Qual o Plano Contratado?
	A4	O Modem Informa que o cliente está navegando com qual capacidade e protocolo no instante k ?
	A5	Modem Idle no instante k ?
	A6	Transmissão de Status
	A7	Clock (Número de instantes k)
	A8	Controle: Garanta que apenas 1 cliente seja analisado nos diferentes instantes de k (cada cliente tem apenas 1 tipo e 1 plano assinado)

Em cada ciclo de análise, a ambas rP 's operam no instante de tempo k , onde $k = 1$ minuto (a medida de tempo pode ser alterada pelo projetista).

A estrutura proposta funciona da seguinte forma:

1. Em cada instante k , rP -Cliente realiza um ciclo completo de análise e encaminha o status para o ISP;
2. O ISP recebe os dados enviados pelo cliente e consolida os dados através da rP -ISP e demonstra

graficamente sob quais circunstâncias o cliente estão usando o serviço disponibilizado.

O uso de rP's provê agilidade e um certo nível de simplicidade no processo de obtenção de informações sobre o estado do modem e encaminhar a situação do cliente ao provedor de serviços em uma string de 38 bits encaminhada pela rP-Cliente onde, com apenas um bit possui o valor 1, é transmitida toda a situação do cliente no instante k .

Não são necessárias alterações nas estruturas das rP's quanto a variação número de clientes. Entretanto, deverão sofrer mudanças caso varie o número de protocolos Ω ou de percentuais Δ analisados.

A marcação final é o resultado de uma dinâmica de contadores que é detalhada no trabalho de Souza (2012). O trabalho de análise comportamental das rP's foi demonstrado por exaustiva experimentação no capítulo 3 do trabalho de Souza(2012). As rP's coloridas poderiam ser utilizadas, mas implicaria em custo computacional mais elevado na implementação e uso da metodologia para o problema analisado.

A informação que é gerada pela estrutura de rP's, que é apresentada mediante a interpretação da rP-ISP, pode ser utilizada como base de estudos da situação da rede do Provedor de Serviços (e no caso, ser a base de um processo de otimização de disponibilidade de recursos de um provedor).

3 Simulação

As redes de Petri descritas têm a habilidade de identificar as condições em que estão sendo utilizados os serviços disponibilizados por um provedor, no caso em questão, de um cliente de um ISP. Entretanto, as rP's desenvolvidas, na estrutura proposta, são incapazes de simular uma demanda.

A simulação pode ser obtida usando um algoritmo chamado Profile. O Profile foi desenvolvido com uma estrutura que possa permitir a exploração das probabilidades de demandas particulares de cada tipo de cliente que possam ter sido identificadas pelo projetista. Essa abordagem respeita as questões de largura da banda (BW) e protocolos usados no instante k em um período de 24 horas ($k_{Min} = 0$ e $k_{Max} = 1439$). A estrutura do simulador resultante é descrita na Figura 5.

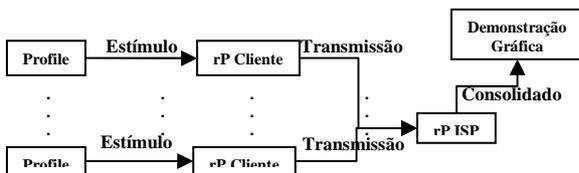


Figura 5. Instantes de Análise k .

Com a estrutura descrita, é possível simular as prováveis demandas e situações que um cliente real poderia requerer, mantendo a velocidade e a simplicidade do uso das rP's.

O Profile é composto de Estratos (quanto mais Estratos tiver um Profile, mais detalhada a análise do

Profile se torna), e cada estrato S possui um grupo k_{Min}^S e k_{Max}^S respeitando o período proposto para o Profile. O Profile é a soma dos Estratos, como mostra a Figura 6. O algoritmo é mostrado com detalhes por Souza (2012).

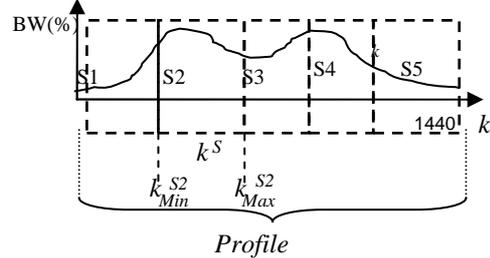


Figura 6. Composição de um Profile.

O algoritmo realiza uma simulação que considera questões como o nível mínimo de navegação tol , em que cada plano de cada cliente é analisado e há o compartilhamento de recursos de largura de banda caso haja demanda na rede. O fluxograma de um Estrato S é descrito na Figura 7.

Para experimentos e provas de consistência de cada teoria, Profiles foram desenvolvidos baseados em 18 amostras cedidas por um ISP atuante no mercado, onde foram mantidas em sigilo todas as informações confidenciais dos clientes, apenas índices foram cedidos a fim de embasar o estudo proposto. É o exemplo é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Profile – Cliente tipo Educacional

Parâmetros Comuns a todos Estratos		$m = 30; // BW_{Total} (Mbps) = 10;$					
		$Plan (kbps) = 1024 \times 30; // tol (kbps) = 256;$					
Probabilidades de cada Estrato							
S		P_{online}	P_{http}	P_{ftp}	P_{smtp}	P_{pop3}	$P_{te\ln et}$
Download	1	0	0	0	0	0	0
	2	0.66	0.60	0.15	0.10	0.10	0.05
	3	0.43	0.50	0.15	0.15	0.15	0.05
	4	0.57	0.60	0.15	0.10	0.10	0.05
	5	0.65	0.70	0.10	0.10	0.10	0
	6	0	0	0	0	0	0
UpLoad	7	0	0	0	0	0	0
	8	0.56	0.65	0.15	0.07	0.10	0.03
	9	0.31	0.65	0.05	0.05	0.20	0.05
	10	0.49	0.60	0.15	0.10	0.11	0.04
	11	0.44	0.60	0.15	0.10	0.11	0.04
	12	0	0	0	0	0	0
Divisão de cada Estrato							
S		H_{start}^S	M_{start}^S	H_{stop}^S	M_{stop}^S		
Download	1	00	00	07	00		
	2	07	01	12	00		
	3	12	01	13	30		
	4	13	31	17	30		
	5	17	31	22	15		
	6	22	16	23	59		
UpLoad	7	00	00	07	00		
	8	07	01	12	00		
	9	12	01	13	30		
	10	13	31	17	30		
	11	17	31	22	15		
	12	22	16	23	59		

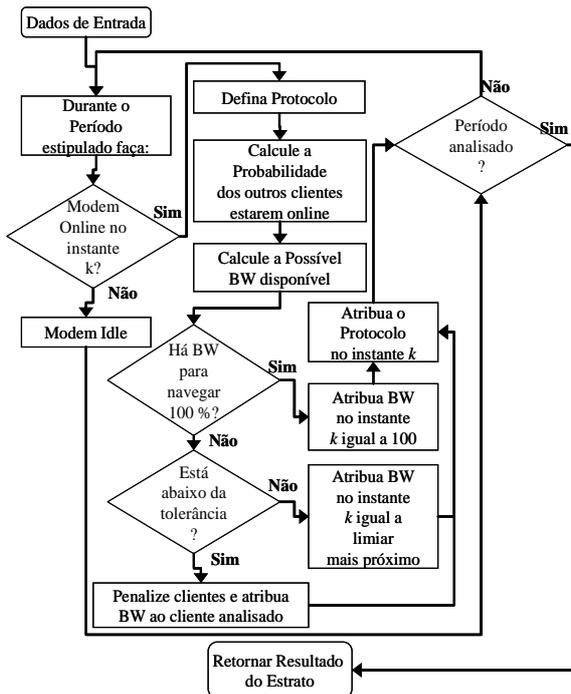


Figura 7. Fluxograma de um Estrato.

4 Otimização

Nos estudos de Pour (2010) e Huang (2004), um AG prevê a seqüência ótima de disparos de uma rP. Agora os resultados obtidos por uma estrutura de rP servirá de base para o processo de otimização.

A demanda que é simulada pelo Profile e consolidada pela estrutura de rP's será analisada pelo AG descrito por Pencheva (2009), que irá gerar soluções de otimização, considerando custos que podem estar envolvidos na prestação de serviços (no caso, um ISP com foco na análise do provisionamento sua largura de banda). O AG foi considerado adequado para a otimização, uma vez que algumas das variáveis de otimização escolhidas são discretas (problema misto).

Através da estrutura desenvolvida, das informações que são consolidadas pela estrutura de rP, são utilizados os dados sobre quais protocolos são usados pelos clientes durante o acesso ao recurso de rede, com isso cada um deles irá orientar um índice de concentração I_{Ω} , onde $\Omega = \{\text{HTTP, SMTP, FTP, TELNET, POP3}\}$. Além dos dados de protocolos, são usados os dados com relação ao percentual de largura de banda Δ que é alcançado pelo cliente.

De posse dessas informações, o AG irá gerar um cenário de possíveis processos de otimização da estrutura do provedor de serviços. Esses índices compõem a interface entre o simulador orientado por rP's e o AG.

A interface segue a seguinte lógica: após a simulação por parte do Profile e a consolidação pelas rP's,

são analisadas as taxas de incidência de ocorrência das referências descritas em Δ e Ω que são dados por CN_{Δ} e ω_{Ω} respectivamente. Essas taxas apenas representam uma média da contagem de quantas vezes cada opção Δ e cada protocolo Ω ocorreram durante os instantes k . O resultado é dividido pelo número de m clientes analisados. Não há normalização dos resultados para que o AG assimile esses índices.

Um exemplo é mostrado na Tabela 3, com índices obtidos em um Profile desenvolvido para simular um tipo de cliente Educacional, onde a rede foi testada com os dados da Tabela 2 e a BW_{Total} variada entre 5 e 10 Mbps.

Tabela 3. Taxas de incidência obtidas pelo simulador

Profile: EDUCACIONAL – Taxa de Incidência de Δ						
BW_{Total} (Mbps)		CN_{15}	CN_{25}	CN_{50}	CN_{75}	CN_{100}
Down load	10	0	0	0	0.0164	0.3723
	5	0	0	0.1812	0.1669	0.0430
Up Load	10	0	0	0	0.0014	0.2970
	5	0	0	0.0450	0.1472	0.1075
Profile: EDUCACIONAL – Taxa de Incidência de Protocolos Ω						
BW_{Total} (Mbps)		ω_{HTTP}	ω_{FTP}	ω_{SMTP}	ω_{POP3}	ω_{TeInet}
Down load	10	0.2463	0.0513	0.0401	0.0387	0.0124
	5	0.2444	0.0539	0.0403	0.0392	0.0134
Up Load	10	0.1856	0.0427	0.0240	0.0344	0.0117
	5	0.1848	0.0450	0.0262	0.0315	0.0123

A modelagem matemática proposta inclui o custo de cada Mbps c_{BW} , o custo $c_{E_{\Omega}}$ que a implementação de cada solução proposta para o tratamento de cada protocolo Ω e os custos c_{venda} em relação à resposta do mercado às mudanças no sistema.

Uma observação é que o custo c_{venda} terá o valor de custo 1, c_{BW} e $c_{E_{\Omega}}$ são uma fração de c_{venda} . Com isso, torna-se efetiva a análise de retorno de investimento ROI provenientes das vendas do produto ou prestação de serviço.

Para análise da sensibilidade da ferramenta desenvolvida, a tabela 4 mostra uma relação aproximada de custos que já levam em consideração o uso para atendimento de um projeto para clientes do tipo Educacional, assim como o Profile demonstrado. Esses valores podem mudar de acordo com o projeto que será trabalhado, cabe ao projetista realizar tal análise.

Tabela 4. Custos

Custos						
C_{BW}	$C_{E_{HTTP}}$	$C_{E_{FTP}}$	$C_{E_{SMTP}}$	$C_{E_{POP3}}$	$C_{E_{TELNET}}$	C_{venda}
0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1

Os índices de concentração I_{Ω} de cada protocolo são obtidos através do levantamento da taxa de incidência ω de cada protocolo Ω analisado, levando em consideração o número N de aplicações que deveriam ser implementadas caso o protocolo Ω

usado ocupasse 100% do serviço de provisionamento de largura de banda.

Através de I_Ω , o número de soluções a serem recomendadas são ponderadas pela incidência ω_Ω .

Os índices I_Ω devem ser inteiros, reais e positivos e determinados pela expressão (1):

$$I_\Omega = \text{round}(\omega_\Omega N_\Omega) \quad (1)$$

O índice de concentração de navegação CN_Δ , onde $\Delta = \{15, 25, 50, 75, 100\}$, representa o conjunto de margens percentuais de utilização de recursos de largura de banda. Ele torna possível mensurar a taxa de incidência da velocidade de navegação e criar um parâmetro de avaliação de necessidade de incremento ou redução de disponibilidade do recurso de largura de banda disponibilizada (em Mbps).

Outro parâmetro considerado é λ_Ω , que é vinculado ao valor percentual de recurso poupado para o provedor quando implementada uma solução para trabalhar o protocolo Ω (ex.: a cada x equipamentos implementados para assimilar o protocolo $\Omega = \{\text{HTTP}\}$, o provedor de serviços poupará 5% do uso da BW_{total} , ou seja, $\lambda_{HTTP} = 0,05$). A tabela 5 demonstra um exemplo desse parâmetro com estimativas de valores associados a um projeto para atender um projeto para clientes do tipo Educacional, que também são usados para os testes de sensibilidade da ferramenta desenvolvida.

Tabela 5. Índices de Economia

λ_{HTTP}	λ_{FTP}	λ_{SMTP}	λ_{POP3}	λ_{TELNET}
0,15	0,17	0,13	0,13	0,025

O parâmetro θ é o valor em Mbps do plano que será vendido para os x_7 clientes que o processo de otimização irá propor para ocupar o sistema otimizado. As variáveis de otimização são:

- x_1 : Valor em % de Mbps, para incremento ou retirada de recursos de largura de banda. São valores reais positivos ou negativos.
- x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 : Quantidade de equipamentos ou soluções propostas para serem implementadas na rede para assimilar respectivamente HTTP, FTP, SMTP, POP3 e TELNET. Valores inteiros e positivos.
- x_7 : Número de clientes propostos para compor a rede proposta. Valores inteiros e positivos.

$$\text{Maximize } x_7 c_{venda} - \left(x_1 c_{BW} + \sum_{i=2}^6 x_i c_{E_\Omega} \right) \quad (2)$$

Sujeito à:

$$\Delta' \in \{75, 100\} \Rightarrow x_1 - \left(1 - \sum_{i=2}^6 x_i \lambda_\Omega \right) BW_{Total} \leq 0 \quad (3)$$

$$\Delta' \in \{50\} \Rightarrow \alpha - \left(1 - \sum_{i=2}^6 x_i \lambda_\Omega \right) \leq 0 \quad \alpha \in \{0,05\} \quad (4)$$

$$\Delta' \in \{25\} \Rightarrow \alpha - \left(1 - \sum_{i=2}^6 x_i \lambda_\Omega \right) \leq 0 \quad \alpha \in \{0,10\} \quad (5)$$

$$\Delta' \in \{15\} \Rightarrow \alpha - \left(1 - \sum_{i=2}^6 x_i \lambda_\Omega \right) \leq 0 \quad \alpha \in \{0,15\} \quad (6)$$

$$0.5(x_7 \theta) - BW_{Total}(x_1 + 1) \leq 0 \quad (7)$$

$$L'_{\min,i} \leq x_i \leq L'_{\max,i} \quad (8)$$

Onde:

$$\Delta' = \arg \max(CN_\Delta) \quad (9)$$

$$\begin{cases} L'_{\max,2} = \min(I_{Http}, L_{\max,2}), \\ L'_{\max,3} = \min(I_{Ftp}, L_{\max,3}), \\ L'_{\max,4} = \min(I_{Smp}, L_{\max,4}), \\ L'_{\max,5} = \min(I_{Pop3}, L_{\max,5}), \\ L'_{\max,6} = \min(I_{Telnet}, L_{\max,6}); \end{cases} \quad (10)$$

A expressão (2) é a função objetivo. A restrição (3) denota a necessidade de diminuir a BW_{total} (o projetista assume que a concentração entre 75 e 100% significa que a largura de banda pode ser poupada). As restrições (4), (5) e (6) são designadas para os casos de necessidade de incremento em BW. Estas restrições são orientadas pela expressão (9). A restrição (7) é o controle de BW_{total} para que se respeite o foco de que não seja aceita uma BW_{total} que não possa assegurar 50% de BW_{total} para cada cliente contratante, considerando o número de clientes e seus planos assinados.

A restrição (8) mensura a disponibilidade de soluções e é orientada pelas expressões (10).

Como mencionado, foram feitos testes de sensibilidade, para avaliação da interface entre a estrutura de simulação e o AG. Foi utilizado o Profile Educacional da Tabela II, na parte de Download como referência. Esta interface é delimitada pelo processo em que o simulador entrega ao AG os índices CN_Δ e ω_Ω que foram obtidos, com as devidas considerações e processamentos em relação a λ_Ω e I_Ω .

Durante os testes, foram usados os custos da Tabela 4, os índices de economia da Tabela 5 e os limites para testes da tabela 6.

Tabela 6. Limites de variáveis – teste de sensibilidade

x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
L_{Min}	-0.2	0	0	0	0	0	10
L_{Max}	2	5	5	5	5	5	20

Através desses índices hipotéticos, testes foram realizados para examinar a interação entre o AG e a estrutura de simulação. O número de clientes m usado foi 15, e o grupo $N_\Omega = \{4,3,3,4,1\}$. O AG operou com uma população de 50 indivíduos e 100 gerações. Os resultados podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7. Limites de variáveis – teste de sensibilidade

BW_{Total}	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
15	-0.2	0	0	0	0	0	20
10	-0.2	0	0	0	0	0	20
5	-0.2	0	5	5	5	5	20
1	0.1537	0	4	2	5	4	20

Os resultados mostram que a interface entre a estrutura do simulador e o AG foram assimiladas. As simulações foram realizadas e serviram como uma referência para o processo de otimização, ou seja, o processo em que uma estrutura de redes de Petri orienta um AG provou ser possível e coerente.

Nota-se que, à medida que o recurso BW_{Total} disponível diminui, eram recomendadas as mudanças consideradas apropriadas para a estrutura de provisionamento do ISP.

Um exemplo, com base na Tabela VII, é que quando BW_{Total} era 5Mbps, o AG recomendou que fossem inseridas 5 soluções de FTP, 5 soluções de SMTP, 5 soluções de POP3 5 soluções de TELNET, que poderiam ser poupados 20% da BW_{Total} disponível e que m poderia aumentar de 15 para 20 caso tal proposta de estrutura fosse acatada.

Deve ser considerado que os resultados apresentados sofrem interferência dos índices λ_Ω e I_Ω , que podem variar de acordo com as soluções empregadas para o trabalho de cada protocolo, pois é respeitada a lógica que de quanto mais robusta a solução empregada, maior será a capacidade de trabalho sobre determinado protocolo Ω , o que irá certamente interferir em λ_Ω . Além disso, quanto maior a capacidade de uma solução unitária, menos unidades N_Ω são necessárias no projeto.

5 Conclusão

Com os resultados obtidos, podemos notar que é possível uma estrutura onde as redes de Petri conseguem orientar um processo de otimização, que é o processo oposto dos estudos que já foram realizados por Pour (2010) e Huang (2004).

Através da estrutura desenvolvida é possível uma avaliação discreta das demandas e do comportamento dos clientes de um prestador de serviços, que pode ser consolidada e servir de referência para um processo de otimização da estrutura usada para disponibilizar o serviço.

A ferramenta possui a capacidade de retratar o comportamento ou de simular a demanda de clientes, quando auxiliada pelo algoritmo de Profile, que é estruturado de acordo com o as características do público alvo do projeto. Além da possibilidade das rP's interagirem com outros algoritmos de otimização, respeitando-se a interface entre a rP e o algoritmo de otimização que será orientado pelos índices de referência CN_Δ , ω_Ω , λ_Ω e I_Ω .

Também é possível afirmar que, devido ao fato de que a teoria da ferramenta desenvolvida é: “a análise do comportamento de um cliente de um determinado tipo de serviço, de forma que esse comportamento seja retratado (ou simulado), transmitido e consolidado, além de servir de referência para um processo de otimização”, então toda a estrutura pode ser adaptada para outras situações de prestação de serviços que não seja a de um ISP.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pelo apoio à pesquisa.

Referências Bibliográficas

- CASSANDRAS CG, Lafortune S. Introduction to Discrete Event Systems. 2. ed.. Editora Springer. 2008.
- HAYAJNEH, M.; ALI, N.A.; HASSANEIN, H. Adaptive Bandwidth Provisioning in IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks. Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. New Orleans, LO.2008.
- HUANG, Zhonghua; WU, Zhiming. Deadlock-Free Scheduling Method for Automated Manufacturing Systems Using Genetic Algorithm and Petri Nets. Proceedings of the 2004 IEEE. International Conference on Robotics & Automation. New Orleans, LA. Abril, 2004.
- LIN, Ting-Yu; HSIEH, Kai-Chiuan; HUANG, Hsin-Chun. Applying Genetic Algorithms for Multi-radio Wireless Mesh Network Planning. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 61, NO. 5, p 2256 -2270. Junho, 2012
- PENCHEVA, Tania; ATANASSOV K., SHANNON A. Modelling of a Roulette Wheel Selection Operator in Genetic Algorithms Using Generalized Nets. International Journal Bioautomation. Vol. 13 (4), pp - 257-264. 2009
- POUR, Touraj Mohammad; YADOLLAHI, Mehdi; HAGHIGHAT, Abolfazl Toroghi. HGA-PN: a new algorithm for scheduling FMS using combinational genetic algorithm and Timed Petri Net. Second International Conference on Computer Modeling and Simulation. 2010
- SOUZA, Flávio Henrique Batista de. Otimização de Provisionamento de Banda para Internet utilizando redes de Petri na modelagem de comportamento de clientes e Provedores. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/885M.PDF>
- WU, J.; Yue, W.; Wang, S. Optimal Capacity Provisioning in Communication Networks with Random Demand. In: Workshop on HPSR - HIGH Performance Switching and Routing 2005. Kobe. p 322 – 326. Anais Eletrônicos Kobe, Maio, 2005