

ANEXO: Determinação de custos via sistema *fuzzy* no problema de busca de menores caminhos

Ricardo Balbinot^{1,2}, Alexandre Balbinot², Ivan Müller²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)

²Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (UFRGS)

I. TABELAS DE COMPORTAMENTO ADICIONAIS

A. Serviços sensíveis à latência

No caso da latência média do enlace, foi realizada uma abordagem similar ao caso de atraso baixo, porém com alteração nas funções consequentes de forma a representar custos maiores (ou seja, uma preferência por enlaces com baixo atraso). A tabela I mostra as regras usadas para esse cenário.

Tabela I
REGRAS PARA O CASO DE LATÊNCIA MÉDIA NO ENLACE

Capacidade	Descarte Ocupação	Baixo	Médio	Alto
Baixa	Baixa	F_8	F_{11}	F_{14}
	Média	F_8	F_{11}	F_{14}
	Alta	F_{10}	F_{13}	F_{14}
Média	Baixa	F_8	F_{11}	F_{14}
	Média	F_8	F_{11}	F_{14}
	Alta	F_9	F_{12}	F_{14}
Alta	Baixa	F_1	F_{11}	F_{14}
	Média	F_8	F_{11}	F_{14}
	Alta	F_9	F_{12}	F_{14}

No caso de alta latência em uma aresta, isso é forte indicativo de um problema nas filas do comutador (dificilmente um atraso seria percebido como elevado devido somente a propagação no meio). Isso pode ser devido a algum congestionamento na porta de saída para o enlace – e esse cenário ou é devido a uma alta ocupação, ou a um número excessivo de pacotes direcionados ao enlace, ou ainda devido ao uso de alguma forma de enfileiramento com diferenciação de serviços.

Como se trata, de início, de um cenário indesejado, na situação de latência alta foi proposta uma única consequência, expressa pela equação 69.

B. Serviços sensíveis a vazão

Em razão da discussão anterior, e considerando a capacidade livre (com VB, VM e VA, representando, respectivamente, uma baixa, média e alta capacidade livre), as regras do controlador podem ser definidas como:

Tabela II
REGRAS DE COMPORTAMENTO PARA O CASO DE SERVIÇOS SENSÍVEIS A VAZÃO

Descarte Vazão _{livre}	Baixo	Médio	Alto
Baixa	F_{17}	F_{17}	F_{19}
Média	F_{16}	F_{16}	F_{18}
Alta	F_{16}	F_{16}	F_{18}

O raciocínio para estabelecimento das funções de consequência são similares ao caso de serviços sensíveis à latência: queremos estabelecer o menor custo para enlaces de maior qualidade, combinando a maior vazão livre e o menor descarte. A equação 73, mostra o efeito esperado para o caso da combinação de vazão livre alta e média, com descartes baixos e médios. As equações 70, 71 e 72 representam as contribuições dos termos individuais.

II. FUNÇÕES DE CONSEQUÊNCIA *Fuzzy*

As funções de custo são definidas em razão da ponderação de fatores de custo, estimados conforme as equações 1, 2 e 3, para o caso da função F_1 .

$$F_{1_{\text{atraso}}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) \quad (1)$$

$$F_{1_{\text{ocupação}}} = \left(1 - \frac{\mu_O}{OB}\right) + \frac{\mu_O}{OM} \quad (2)$$

$$F_{1_{\text{descarte}}} = \left(1 - \frac{\mu_D}{DB}\right) \quad (3)$$

Tomando como exemplo a equação 1, o termo $\left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right)$ vai apresentar o menor valor possível, nulo, quanto melhor for o grau de pertinência ao caso de caracterização baixo atraso. Nessa situação deve-se gerar o menor custo possível devido a esse fator. Ponderando os demais fatores, temos a equação 4.

$$F_1 = 9 \left(0.7F_{1_{\text{atraso}}} + 0.3 \left(2 \frac{F_{1_{\text{ocupação}}} + F_{1_{\text{descarte}}}}{5} \right) \right) + 1 \quad (4)$$

A expressão F_1 pode ser interpretada como: quanto mais próximo das condições ideais (latência baixa, ocupação baixa do canal e baixa taxa de descarte), mais o custo se aproxima do custo unitário (menor custo). Além disso, ponderamos os fatores de modo que nessa situação o fator predominante seja a latência.

Para o segundo caso, explicitado pela função F_2 , descrita na equação 5, temos uma situação ligeiramente diferente, onde a ocupação do canal é alta. Isso implica que, provavelmente, a adição de novo tráfego, mesmo com as características típicas de tráfegos com fortes demandas de baixa latência – baixo volume e de caráter transitório - pode levar a uma situação de congestionamento do enlace em questão. Dessa forma, marcamos o custo como maior, e mais influenciado pelo fator de ocupação do canal.

$$F_2 = 10 \left(0.5F_{2_{\text{atraso}}} + 0.5 \left(\frac{F_{2_{\text{capacidade}}} + 7F_{2_{\text{ocupação}}} + F_{2_{\text{descarte}}}}{10} \right) \right) + 10 \quad (5)$$

com os termos parciais definidos conforme as equações 7 a 10.

O terceiro caso, representado pela função F_3 (equação 6), representa uma situação de piora nas condições de uso do enlace, onde teremos, além de uma situação de alta ocupação, baixa capacidade – ou seja, é potencialmente maior a chance de termos um cenário de congestionamento.

$$F_3 = 10 \left(0.5F_{3_{\text{atraso}}} + 0.5 \left(\frac{4F_{3_{\text{capacidade}}} + 5F_{3_{\text{ocupação}}} + F_{3_{\text{descarte}}}}{10} \right) \right) + 20 \quad (6)$$

Nas situações de descarte médio, a discussão é similar aos casos anteriores, porém dando maior ênfase e, consequentemente, maior custo, a esses enlaces. O custo maior reflete o fato que um número maior de perdas implica em uma qualidade inferior do serviço. Note que a *fuzzyficação* das entradas considera como um descarte médio situações onde observa-se um descarte de até 11%, o que, para todos os efeitos, já é elevado em situações normais de operação de uma rede. As funções descritivas das consequências desse cenário podem ser vistas nas equações 18, 23 e 28.

Para o cenário de descarte alto, na realidade indicamos uma situação onde o enlace em questão apresenta problemas severos – isso indica que deve ser evitado. Dessa forma, unificamos a resposta com uma função única de consequência (vide equação 32), mas levando em consideração o efeito das demais variáveis.

As demais funções auxiliares e funções de consequência utilizadas no trabalho podem ser vistas nas subseções a seguir.

A. Equações auxiliares para a função F_2

$$F_{2_{\text{atraso}}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) \quad (7)$$

$$F_{2_{\text{capacidade}}} = \frac{\mu_C}{CM} + \left(1 - \frac{\mu_C}{CA}\right) \quad (8)$$

$$F_{2_{\text{ocupação}}} = \frac{\mu_O}{OA} \quad (9)$$

$$F_{2_{\text{descarte}}} = \left(1 - \frac{\mu_D}{DB}\right) \quad (10)$$

B. Equações auxiliares para a função F_3

$$F_{3\text{atraso}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) \quad (11)$$

$$F_{3\text{capacidade}} = \frac{\mu_C}{CB} \quad (12)$$

$$F_{3\text{ocupação}} = \frac{\mu_O}{OA} \quad (13)$$

$$F_{3\text{descarte}} = \left(1 - \frac{\mu_D}{DB}\right) \quad (14)$$

C. Equações auxiliares para a função F_4

$$F_{4\text{atraso}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) \quad (15)$$

$$F_{4\text{ocupação}} = \left(1 - \frac{\mu_O}{OB}\right) + \frac{\mu_O}{OM} \quad (16)$$

$$F_{4\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DM} \quad (17)$$

$$F_4 = 20 \left(0.5F_{4\text{atraso}} + 0.5 \left(\frac{2 * F_{4\text{ocupação}} + 8 * F_{4\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 10 \quad (18)$$

D. Equações auxiliares para a função F_5

$$F_{5\text{atraso}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) \quad (19)$$

$$F_{5\text{capacidade}} = \frac{\mu_C}{CM} + \left(1 - \frac{\mu_C}{CA}\right) \quad (20)$$

$$F_{5\text{ocupação}} = \frac{\mu_O}{OA} \quad (21)$$

$$F_{5\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DM} \quad (22)$$

$$F_5 = 20 \left(0.5F_{5\text{atraso}} + 0.5 \left(\frac{F_{5\text{capacidade}} + 4 * F_{5\text{ocupação}} + 4 * F_{5\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 20 \quad (23)$$

E. Equações auxiliares para a função F_6

$$F_{6\text{atraso}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) \quad (24)$$

$$F_{6\text{capacidade}} = \frac{\mu_C}{CB} \quad (25)$$

$$F_{6\text{ocupação}} = \frac{\mu_O}{OA} \quad (26)$$

$$F_{6\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DM} \quad (27)$$

$$F_6 = 20 \left(0.5F_{6\text{atraso}} + 0.5 \left(\frac{2 * F_{6\text{capacidade}} + 4 * F_{6\text{ocupação}} + 4 * F_{6\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 30 \quad (28)$$

F. Equações auxiliares para a função F_7

$$F_{7\text{atraso}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) \quad (29)$$

$$F_{7\text{ocupação}} = \left(1 - \frac{\mu_O}{OB}\right) + \frac{\mu_O}{OM} + \frac{\mu_O}{OA} \quad (30)$$

$$F_{7\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DA} \quad (31)$$

$$F_7 = 30 \left(0.4F_{7\text{atraso}} + 0.6 \left(\frac{4F_{7\text{ocupação}} + 8F_{7\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 60 \quad (32)$$

G. Equações auxiliares para a função F_8

$$F_{8\text{atraso}} = \frac{\mu_L}{LM} \quad (33)$$

$$F_{8\text{ocupação}} = \left(1 - \frac{\mu_O}{OB}\right) + \frac{\mu_O}{OM} \quad (34)$$

$$F_{8\text{descarte}} = \left(1 - \frac{\mu_D}{DB}\right) \quad (35)$$

$$F_8 = 10 \left(0.7 F_{8\text{atraso}} + 0.3 \left(\frac{F_{8\text{ocupação}} + F_{8\text{descarte}}}{3} \right) \right) + 10 \quad (36)$$

H. Equações auxiliares para a função F_9

$$F_{9\text{atraso}} = \frac{\mu_L}{LM} \quad (37)$$

$$F_{9\text{capacidade}} = \frac{\mu_C}{CM} + \left(1 - \frac{\mu_C}{CA}\right) \quad (38)$$

$$F_{9\text{ocupação}} = \frac{\mu_O}{OA} \quad (39)$$

$$F_{9\text{descarte}} = \left(1 - \frac{\mu_D}{DB}\right) \quad (40)$$

$$F_9 = 10 \left(0.5 F_{9\text{atraso}} + 0.5 \left(\frac{F_{9\text{capacidade}} + 7 F_{9\text{ocupação}} + F_{9\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 20 \quad (41)$$

I. Equações auxiliares para a função F_{10}

$$F_{10\text{atraso}} = \frac{\mu_L}{LM} \quad (42)$$

$$F_{10\text{capacidade}} = \frac{\mu_C}{CB} \quad (43)$$

$$F_{10\text{ocupação}} = \frac{\mu_O}{OA} \quad (44)$$

$$F_{10\text{descarte}} = \left(1 - \frac{\mu_D}{DB}\right) \quad (45)$$

$$F_{10} = 10 \left(0.5 F_{10\text{atraso}} + 0.5 \left(\frac{4 F_{10\text{capacidade}} + 5 F_{10\text{ocupação}} + F_{10\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 30 \quad (46)$$

J. Equações auxiliares para a função F_{11}

$$F_{11\text{atraso}} = \frac{\mu_L}{LM} \quad (47)$$

$$F_{11\text{ocupação}} = \left(1 - \frac{\mu_O}{OB}\right) + \frac{\mu_O}{OM} \quad (48)$$

$$F_{11\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DM} \quad (49)$$

$$F_{11} = 20 \left(0.5 F_{11\text{atraso}} + 0.5 \left(\frac{2 * F_{11\text{ocupação}} + 8 * F_{11\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 20 \quad (50)$$

K. Equações auxiliares para a função F_{12}

$$F_{12\text{atraso}} = \frac{\mu_L}{LM} \quad (51)$$

$$F_{12\text{capacidade}} = \frac{\mu_C}{CM} + \left(1 - \frac{\mu_C}{CA}\right) \quad (52)$$

$$F_{12\text{ocupação}} = \frac{\mu_O}{OA} \quad (53)$$

$$F_{12\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DM} \quad (54)$$

$$F_{12} = 20 \left(0.5 F_{12\text{atraso}} + 0.5 \left(\frac{F_{12\text{capacidade}} + 4 * F_{12\text{ocupação}} + 4 * F_{12\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 30 \quad (55)$$

L. Equações auxiliares para a função F_{13}

$$F_{13\text{atraso}} = \frac{\mu_L}{LM} \quad (56)$$

$$F_{13\text{capacidade}} = \frac{\mu_C}{CB} \quad (57)$$

$$F_{13\text{ocupação}} = \frac{\mu_O}{OA} \quad (58)$$

$$F_{13\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DM} \quad (59)$$

$$F_{13} = 20 \left(0.5 F_{13\text{atraso}} + 0.5 \left(\frac{2 * F_{13\text{capacidade}} + 4 * F_{13\text{ocupação}} + 4 * F_{13\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 40 \quad (60)$$

M. Equações auxiliares para a função F_{14}

$$F_{14\text{atraso}} = \frac{\mu_L}{LM} \quad (61)$$

$$F_{14\text{ocupação}} = \left(1 - \frac{\mu_O}{OB}\right) + \frac{\mu_O}{OM} + \frac{\mu_O}{OA} \quad (62)$$

$$F_{14\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DA} \quad (63)$$

$$F_{14} = 30 \left(0.4 F_{14\text{atraso}} + 0.6 \left(\frac{4 F_{14\text{ocupação}} + 8 F_{14\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 70 \quad (64)$$

N. Equações auxiliares para a função F_{15}

$$F_{15\text{atraso}} = \frac{\mu_L}{LA} \quad (65)$$

$$F_{15\text{capacidade}} = \frac{\mu_C}{CB} \quad (66)$$

$$F_{15\text{ocupação}} = \left(1 - \frac{\mu_O}{OB}\right) + \frac{\mu_O}{OM} + \frac{\mu_O}{OA} \quad (67)$$

$$F_{15\text{descarte}} = \left(1 - \frac{\mu_D}{DB}\right) + \frac{\mu_D}{DM} + \frac{\mu_D}{DA} \quad (68)$$

$$F_{15} = 20 \left(0.6 F_{15\text{atraso}} + 0.4 \left(\frac{2 F_{15\text{capacidade}} + 4 F_{15\text{ocupação}} + 4 F_{15\text{descarte}}}{10} \right) \right) + 80 \quad (69)$$

O. Equações auxiliares para a função F_{16}

$$F_{16\text{atraso}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) + \frac{\mu_L}{LM} + \frac{\mu_L}{LA} \quad (70)$$

$$F_{16\text{vazão}} = \frac{\mu_V}{VM} + \left(1 - \frac{\mu_V}{VA}\right) \quad (71)$$

$$F_{16\text{descarte}} = \left(1 - \frac{\mu_D}{DB}\right) + \frac{\mu_D}{DM} \quad (72)$$

$$F_{16} = 9 \left(0.7 F_{16\text{vazão}} + 0.3 \left(\frac{F_{16\text{atraso}} + 4 F_{16\text{descarte}}}{11} \right) \right) + 1 \quad (73)$$

P. Equações auxiliares para a função F_{17}

$$F_{17\text{atraso}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) + \frac{\mu_L}{LM} + \frac{\mu_L}{LA} \quad (74)$$

$$F_{17\text{vazão}} = \frac{\mu_V}{VB} \quad (75)$$

$$F_{17\text{descarte}} = \left(1 - \frac{\mu_D}{DB}\right) + \frac{\mu_D}{DM} \quad (76)$$

$$F_{17} = 20 \left(0.8 F_{17\text{vazão}} + 0.2 \left(\frac{F_{17\text{atraso}} + 4 F_{17\text{descarte}}}{11} \right) \right) + 20 \quad (77)$$

Q. Equações auxiliares para a função F_{18}

$$F_{18\text{atraso}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) + \frac{\mu_L}{LM} + \frac{\mu_L}{LA} \quad (78)$$

$$F_{18\text{vazão}} = \left(1 - \frac{\mu_V}{VA}\right) + \frac{\mu_V}{VM} \quad (79)$$

$$F_{18\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DA} \quad (80)$$

$$F_{18} = 20 \left(0.5 F_{18\text{vazão}} + 0.5 \left(\frac{F_{18\text{atraso}} + 4 F_{18\text{descarte}}}{11} \right) \right) + 20 \quad (81)$$

R. Equações auxiliares para a função F_{19}

$$F_{19\text{atraso}} = \left(1 - \frac{\mu_L}{LB}\right) + \frac{\mu_L}{LM} + \frac{\mu_L}{LA} \quad (82)$$

$$F_{19\text{vazão}} = \frac{\mu_V}{VB} \quad (83)$$

$$F_{19\text{descarte}} = \frac{\mu_D}{DA} \quad (84)$$

$$F_{19} = 30 * \left(0.6 F_{19\text{vazão}} + 0.4 \left(\frac{F_{19\text{atraso}} + 4 F_{19\text{descarte}}}{11} \right) \right) + 50 \quad (85)$$

III. FUNÇÕES DAS MÉTRICAS

- Atraso cumulativo ($A_{c,x}$) no caminho x: representa a latência acumulada observada nos diferentes caminhos da topologia. Sendo:
 - L o número de caminhos possíveis;
 - T a topologia da rede;
 - P o conjunto de caminhos possíveis determinados dentro da topologia T ;
 - p um caminho possível, ou seja $p \in P$, que é representado como $p = [V_0, V_k, \dots, V_n]$, onde V_0 representa o nó de origem do caminho e V_n o nó destino (último vértice) do caminho, com V_k representando algum dos pontos intermediários do caminho;
 - A aresta (V_k, V_{k+1}) representando algum enlace ao longo do caminho p , com a propriedade $(V_k, V_{k+1})[c]$, representando algum dos parâmetros de interesse do enlace;

- B o número de enlaces pertencentes a um certo caminho (ou seja, o número de saltos realizados no caminho).

Podemos definir a métrica como:

$$A_{c,x} = \sum_{k=0}^{n-1} (V_k, V_{k+1})[\text{atraso}], \quad \forall x = p \in P \quad (86)$$

- Taxa de descarte média ($D_{c,x}$) no caminho x : representando a média, para cada um dos caminhos considerados, da taxa de descarte observada nos enlaces pertencentes ao caminho.

Sua equação pode ser definida como:

$$D_{m,x} = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} (V_k, V_{k+1})[\text{descarte}]}{B}, \quad \forall x = p \in P \quad (87)$$

- Taxa de ocupação média ($O_{c,x}$) no caminho x : representando a média das taxas de ocupação observadas ao longo dos enlaces de cada um dos caminhos.

Sua equação pode ser definida como:

$$O_{m,x} = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} (V_k, V_{k+1})[\text{ocupação}]}{B}, \quad \forall x = p \in P \quad (88)$$

A partir desses valores são determinadas os valores médios dos mesmos, ou seja:

$$A_{cm} = \frac{A_{c,x}}{L} \quad (89)$$

$$D_{mm} = \frac{D_{m,x}}{L} \quad (90)$$

$$O_{mm} = \frac{O_{m,x}}{L} \quad (91)$$

$$(92)$$

A partir das medidas anteriores, foi proposto um índice, denominado I_P , que permite avaliar se a escolha dos caminhos permite atingir a melhor combinação entre atraso, ocupação do canal e taxa de descarte. Esse índice é definido como:

$$I_P = \sqrt[3]{A_{cm_n} \cdot D_{mm_n} \cdot O_{mm_n}} \quad (93)$$

ou seja, associado ao produto das três métricas consideradas, normalizadas. A normalização utilizada foi do tipo min-máx, sendo estritamente necessária, visto que as grandezas dos parâmetros apresentam grandes diferenças de faixas de valores. Para evitar zerar o índice, a faixa de normalização utilizada para cada valor é de 1 a 2, ao invés de 0 a 1.

O índice representa a melhor escolha em termos da combinação entre atraso, descarte e ocupação do canal, diferenciando situações onde podemos ter um ótimo atraso, mas com um caminho, por exemplo, com alta taxa de descarte de pacotes. Para o índice considerado, portanto, valores mais próximos de 1 representam situações mais próximas do caso ideal (atraso mínimo, ocupação mínima e descarte mínimo de pacotes), com o desempenho da escolha se afastando do ideal com o crescimento de I_P .

Para o caso de serviços sensíveis à vazão, devemos definir um índice adicional, que é a vazão, ou seja:

$$V_{m,x} = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} (V_k, V_{k+1})[\text{capacidade}] - \frac{(V_k, V_{k+1})[\text{ocupação}]}{100} \cdot (V_k, V_{k+1})[\text{capacidade}]}{B} \quad (94)$$

O índice de análise também deve ser modificado para:

$$I_P = \sqrt[3]{A_{cm_n} \cdot D_{mm_n} \cdot (3 - V_{mm_n})} \quad (95)$$

Essa modificação é necessária para refletir que, quanto maior a vazão, mais próximo de 1 deva ser o valor final calculado.