

# Handover em redes heterogêneas baseado em AHP para transmissão de vídeo

Iago Medeiros<sup>1</sup>, Lucas Pacheco<sup>1</sup>,  
Denis Rosário<sup>1</sup>, Eduardo Cerqueira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Pará (UFPA)  
Belém, PA – Brasil

{iago.medeiros, lucas.pacheco}@itec.ufpa.br

{denis, cerqueira}@ufpa.br

**Abstract.** *This paper presents a handover in heterogeneous networks (HetNet) based on Analytic Hierarchy Process (AHP) for video transmission. The algorithm uses multiple-metrics as input with the help of a cost-function to determine the best cell to receive handover, thereby improving the quality of experience of the consumer users. The algorithm is evaluated against two other competitors, already in use by the LTE technology, and presented better results.*

**Resumo.** *Este trabalho apresenta um handover em redes heterogêneas (HetNet) baseado em Analytic Hierarchy Process (AHP) para transmissão de vídeo. O algoritmo usa múltiplas métricas de entrada com auxílio da função-custo para determinar a melhor célula para receber o handover, melhorando assim a qualidade de experiência dos usuários consumidores. O algoritmo é avaliado diante de dois outros concorrentes já em uso pela tecnologia LTE, e apresentou resultados melhores.*

## 1. Introdução

Redes heterogêneas (*HetNet*) se tornaram uma alternativa para expandir a capacidade das atuais redes móveis. Estas redes são caracterizadas por uma maior quantidade de áreas de cobertura e, conseqüentemente, uma maior quantidade de *handover*. Entretanto, esse *handover* necessita de algumas métricas mais modernas, dado que terá que trabalhar com células distintas, que possuem diferentes configurações. Para isso, é necessário ter um bom algoritmo que, visando esse cenário de *HetNet*, possa realizar um *handover* de forma eficiente.

As alternativas para execução de *handover* propostas para redes homogêneas consideram poucas métricas, como a potência de sinal recebido. Entretanto, para realizar *handover* em redes heterogêneas, essa abordagem não é recomendada, pois não é mais eficiente [Ahmed et al. 2014]. Há uma necessidade de selecionar cuidadosamente as métricas de entrada do *handover* para que o desempenho de entrega de vídeo seja bem recebido pelos consumidores.

Existem algumas alternativas para realizar *handover* em redes heterogêneas, como o uso de entradas baseadas em Qualidade de Serviço (QoS), porém seu uso exclusivo pode não atender um cenário específico como o de aplicações de vídeo. Uma opção para

contornar este problema é usar um algoritmo que leve em consideração múltiplas métricas para escolha da rede.

Este trabalho apresenta um algoritmo de *handover* baseado em múltiplas métricas e nivelado por uma função-custo [Xenakis et al. 2016] para redes heterogêneas. O algoritmo proposto usa métricas distintas, como potência de sinal recebido (qualidade de sinal de referência recebida), qualidade de serviço (taxa de entrega de pacotes) e qualidade de experiência (MOS preditivo). A proposta foi avaliada diante de outros algoritmos de *handover*, que usam métricas mais simples, e apresentou resultados satisfatórios.

A estrutura desse artigo é a seguinte: Seção 2 mostra os trabalhos relacionados que inspiraram esta pesquisa. Seção 3 explica as principais características do algoritmo proposto, citando os detalhes de sua arquitetura. Seção 4 é dedicada para avaliação de performance do algoritmo ao contar sobre as etapas de simulação. Seção 5 analisa os resultados obtidos e sua conclusão é debatida na Seção 6.

## 2. Trabalhos Relacionados

Algoritmos baseados em RSS (*Received Signal Strength*) foram originalmente propostos como métricas para a decisão de *handover* [Chang et al. 2009]. Estes algoritmos usam apenas algumas métricas de potência de sinal recebido, conectando-se à célula que tiver o melhor sinal naquele momento. Entretanto, como as redes se tornaram complexas e heterogêneas, e os tipos de conexões aumentaram, houve uma necessidade de usar melhores algoritmos para esta tarefa, como mostrado em [Ahmed et al. 2014].

Os algoritmos baseados em QoS [Wang and Kao 2011][Bazzi 2010] seguem um mecanismo similar ao de RSS. Sua estrutura utiliza métricas mais relacionadas aos serviços da rede, como largura de banda, taxa de entrega ou *jitter*. No entanto, seu uso não é aplicável a nós em alta velocidade, como num cenário de redes veiculares VANET (*Vehicular ad hoc network*) usado neste trabalho, devido a problemas como o aumento da latência de *handover* e efeito *ping-pong*.

Uma outra sugestão de algoritmo é baseado em QoE, que foca na percepção visual do usuário. Há várias formas de se mensurar o QoE [ITU 2007], como as formas objetiva, subjetiva e híbrida. A híbrida foi escolhida neste trabalho para que o algoritmo pudesse escolher, em tempo real, as melhores células devido a um bom MOS (*Mean Opinion Score*) preditivo, melhor explicado na Seção 3. Há poucos trabalhos que utilizam métricas de entrada QoE numa decisão de *handover*.

Algoritmos baseados em contexto são mais adequados para o *handover* em *Hetnet*. Ao aplicar técnicas do *Analytic Hierarchy Process* (AHP) [Saaty 2008] para dar valores às diferentes métricas de entrada, é possível notar uma melhor taxa de transferência neste *handover*, como sugerido em [Ahmed et al. 2014]. Por causa disso, o uso (e elaboração) de um algoritmo baseado em contexto foi empregado nesta proposta, além de tentar sempre optar pela seleção de rede ótima.

O trabalho em [Chinnappan and Balasubramanian 2016] usa os pesos de uma AHP em uma decisão de *handover*. Os autores tentam achar um *trade-off* ideal sobre o nível da complexidade em um *handover* multi-critérios em *HetNet*. A técnica AHP mostra que seu uso proporciona uma baixa complexidade de resolução e apresenta uma boa resposta. Os autores de [Drissi and Oumsis 2015] também

usam AHP para um *handover* multi-critérios. Entretanto, em geral, a maioria dos trabalhos relacionados utilizam múltiplas métricas de entradas apenas de QoS [Chandavarkar and Guddeti 2016][Elhadj et al. 2016], faltando um estudo a respeito do uso de QoE como métrica de entrada nesta decisão.

Três métricas distintas de entrada foram usadas: qualidade de sinal de referência recebida (como métrica de Rádio), taxa de entrega de pacotes (como métrica de QoS) e MOS preditivo (como métrica de QoE). Estas métricas compõem a entrada do *handover*. O AHP foi usado como algoritmo de função-custo, balanceando as diferentes entradas. As métricas de saída utilizadas, que avaliaram os resultados da proposta, foram duas formas objetivas de mensurar o QoE: VQM (*Video Quality Metric*) e SSIM (*Structural Similarity*), ambas de grande importância para avaliar a percepção humana [Zineb et al. 2015]. A Seção 3 explica todo o processo de medição, decisão e execução do algoritmo.

### 3. Handover AHP

A execução de um *handover* é, tradicionalmente feita em três etapas, como ilustra a Figura 1. Há a etapa de Coleta de Informações, onde o algoritmo recolhe alguma(s) métrica(s) importante(s). Depois essa informação é avaliada em uma etapa de Decisão, que seleciona qual é a melhor célula a se conectar disponível. E, por último, com a decisão tomada, ocorre a Execução do *handover*.

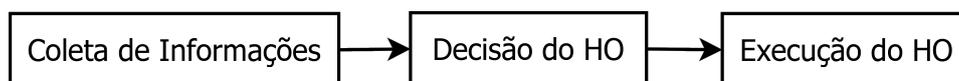


Figura 1. Etapas clássicas de um *handover*

No *handover* proposto, a simulação inicia-se com os nós (UE - *User Equipment*) conectando-se na infraestrutura. Essa infraestrutura é formada por diferentes estações rádio base eNB (Evolved Node B), responsáveis por fornecer o acesso à conexão LTE para os nós da rede. Com a requisição, a infraestrutura ativa o *Handover Manager*, que será responsável pelo processo de *handover*, como mostrado na Figura 2.

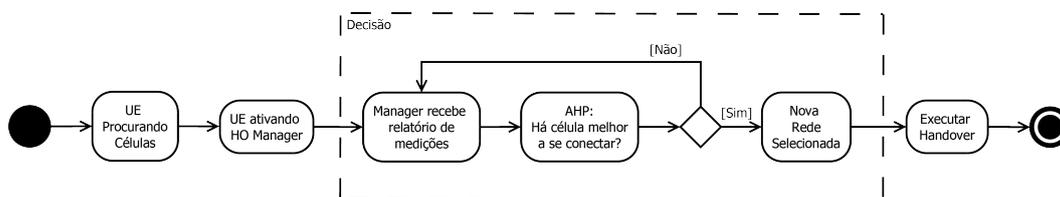


Figura 2. Fluxograma do *Handover* AHP

Quando o *HO Manager* entra em operação são coletados *beacons* das células LTE detectáveis pelo UE. Neste processo o *Manager* recebe os relatórios de medições das células servidora e vizinhas ao dispositivo. Esses relatórios são importantes para responder a dúvida do processo de HO: “Há célula melhor a se conectar?”

Dependendo da resposta binária, o *Handover Manager* há duas ações distintas: Caso haja células melhores para o UE solicitante, o *HO Manager* seleciona uma nova rede (célula alvo) disponível a se conectar, e executa o *handover*. Caso contrário, o algoritmo

volta a etapa de receber novas informações sobre o meio (Coleta de Informações) alguns momentos depois.

O *Handover Manager* coleta, então, as medições reportadas pelas células. O *Manager*, para fazer uma boa seleção, deve receber diferentes tipos de métricas que serão avaliadas. As métricas escolhidas estão classificadas no grupo de QoS, de QoE ou de Rádio e são mostradas na Figura 3, numa relação de agregação entre classes.

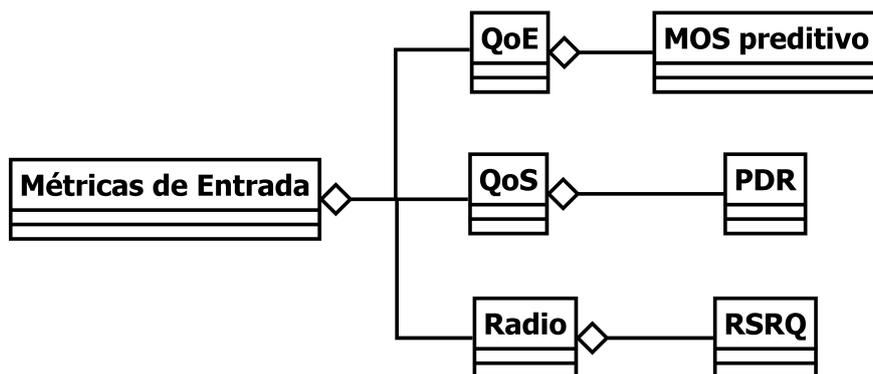


Figura 3. Associação de métricas de entrada

A métrica de Qualidade de Experiência selecionada é o MOS preditivo (MOSp). Essa métrica é gerada durante a transmissão de um servidor (eNB) para um cliente (UE), com base no valor de GOP (*Group of Pictures*) do vídeo transmitido. O vídeo tradicionalmente tem três tipos distintos de *frames*: I, P e B, e cada um destes possui tamanhos diferentes e impactam de forma diferente na qualidade final do vídeo caso haja falha na transmissão. Quanto mais *frames* I-P-B perdidos, menor será o valor do MOS preditivo resultando em uma pior qualidade de experiência percebida pelo usuário.

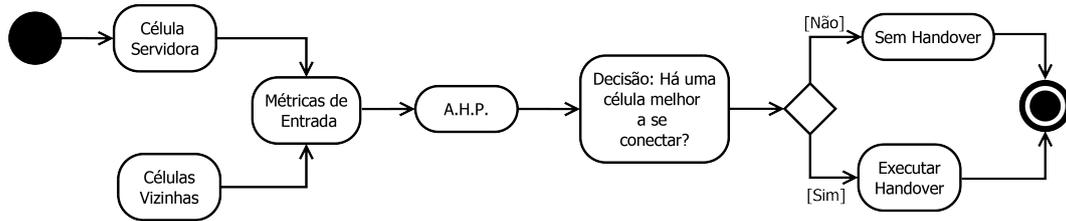
Essa métrica foi construída com a ajuda de uma técnica de classificação de aprendizado de máquina. *Random Forest* trabalha com o conceito de formar seleções menores de uma árvore, informar diferentes resultados nessas árvores menores, e juntando/contando todas as respostas, encontrar uma resposta majoritária para uma pergunta (neste caso, o valor de MOS preditivo).

A *Random Forest* foi alimentada por um processo inteiro de aprendizado (treinamento, teste e validação) com dados obtidos através de um teste de QoE subjetivo realizado com a ajuda de voluntários em um trabalho prévio, onde eram mostrados os vídeos originais e exemplos distorcidos (com perdas de *frames* I-P-B distintas) e cada participante atribuía um valor de MOS para cada vídeo. O preditor, após treinado, é capaz de correlacionar a quantidade de *frames* I-P-B perdidos com uma estimativa de MOS baseada nas avaliações feitas pelos voluntários. O algoritmo do preditor é aplicado em tempo de transmissão de modo a obter uma estimativa da qualidade em tempo real das células disponíveis.

A métrica de Qualidade de Serviço é a taxa de entrega de pacotes (PDR - *Packet Delivery Rate*) que está associada ao quão bem sucedido foi o recebimento de pacotes para um destino comparado ao número total de pacotes enviados. Por isso, o PDR pode ser usado para avaliar a qualidade da conexão entre um servidor (eNB) e um cliente (UE).

Para os aspectos de Rádio, a métrica selecionada foi a Qualidade de sinal de referência recebida (RSRQ - *Reference Signal Received Quality*) [3GPP 2015b], definido como  $Nrb \frac{RSRP}{RSSI}$ , onde  $Nrb$  é o número físico de blocos de recursos,  $RSRP$  a potência de sinal de referência recebida e  $RSSI$  é o indicador de força do sinal recebido. Em outras palavras, RSRQ é a razão que resulta no sinal de referência recebido de um eNB (levando em conta potência recebida, interferência do canal, ruído térmico, etc). E este valor é como o 3GPP (organização que cuida da padronização das tecnologias de 4G no mundo) definiu os valores de potência de sinal do LTE e para o *handover* em LTE.

O segundo fluxograma (Figura 4) explica, com maiores detalhes, a etapa de Decisão do *Handover*. O *Manager* coleta as métricas tanto da célula servidora quanto das células vizinhas. Sendo que cada entrada (PDR, MOSp, RSRQ) tem características próprias, como valores limites, comportamentos, características, etc. Portanto, o *handover manager* precisa encontrar a melhor célula dada as diferentes métricas coletadas, e isto configura um problema de análise de decisão multi-critérios [Xu 2012], onde existem múltiplas alternativas avaliadas por múltiplos (e geralmente conflitantes) critérios. Para resolver este complexo problema é usado o processo analítico hierárquico (AHP - *Analytic Hierarchy Process*) que estima a melhor resposta de acordo com a importância de uma métrica em relação à outra. Este nível de importância foi obtido empiricamente para maximizar a qualidade das transmissões.



**Figura 4. Fluxograma do processo de decisão no AHP *Handover***

O AHP é a função-custo usado para responder ao problema de análise de decisão multi-critério (“Há célula melhor a se conectar?”). Este classifica em ordem a célula servidora e as vizinhas de acordo com a qualidade de conexão da célula. O termo “qualidade” foi usado como expressão genérica para essas métricas (PDR, MOSp, RSRQ) depois de passar pelo AHP, mas pode ser chamado de *score*. Caso a resposta seja positiva, o *handover* ocorre. Entretanto, caso contrário, ele não ocorre e a UE permanece na mesma eNB servidora.

Equação 1 mostra a matriz de decisão para o AHP, que informa o valor de performance normalizado  $P_{ij}$  da  $i$ -ésima alternativa  $A_i$  (*i.e.*, servidora, vizinho A, vizinho B...) em termos do  $j$ -ésimo critério  $C_j$  (*i.e.*, MOSp, RSRQ...).  $M$  é o número total de alternativas e  $N$  é o número total de critérios.

$$P_{ij} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_N \\ A_1 & P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ A_2 & P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_M & P_{M1} & P_{M2} & \dots & P_{MN} \end{matrix} \quad (1)$$

A Tabela 1 mostra uma escala de importância genérica ( $W_j$ ) entre diferentes métricas. Quanto maior este número, maior é sua relevância para a decisão levantada pelo AHP. Então, p.ex., se o MOSp for 4 vezes mais importante que o PDR, então a relação oposta (PDR em relação a MOSp) também é contrária (1/4 mais importante).

Intensidade de Importância	Definição
1	Importância igual
2	Importância quase moderada
3	Importância moderada
4	Importância quase forte
5	Importância forte

**Tabela 1. Escala de importância relativa para o AHP**

Isso é ratificado na Tabela 2, que é a comparação par-a-par usada neste trabalho, mostrando as diferentes métricas e suas relações de importância de uma com a outra. Devido a isso e, de acordo com a experiência dos autores e de testes prévios, em uma conexão eNB-UE, MOSp é a métrica mais contundente para a seleção de rede. Ou seja, seu maior peso conduz o *Handover Manager* através do AHP a escolher células mais confiáveis e que apresentam resultados mais satisfatórios.

	<i>MOSpredictivo</i>	<i>RSRQ</i>	<i>PDR</i>
<i>MOSpredictivo</i>	1	2	4
<i>RSRQ</i>	1/2	1	2
<i>PDR</i>	1/4	1/2	1

**Tabela 2. Comparação par-a-par de importância para as métricas de entrada**

Depois de enviar as métricas de entrada para o AHP, o algoritmo calcula o valor/score  $S_i$  para todas as redes ali disponíveis, ao alcance do nó solicitante. O *manager* selecionará aquela célula com maior valor, que será a rede mais adequada disponível no momento a se conectar para aquele UE. Equação 2 explica como o *Handover Manager* responde a questão de decisão, onde  $S_i$  é o valor da  $i$ -ésima alternativa e  $W_j$  é o peso (ou importância relativa) do critério  $C_j$ . Com a decisão feita sobre a nova seleção da rede, o *Handover Manager* executará o *handover*.

$$S_i = \sum_{j=1}^N P_{ij} W_j, \text{ for } i = 1, 2, 3 \dots M \quad (2)$$

#### 4. Avaliação de Desempenho

A avaliação consiste em três passos fundamentais: a geração de mobilidade veicular, a comunicação dos dispositivos de redes pela simulação, e a avaliação objetiva das métricas de saída. As mobilidades foram geradas usando o SUMO<sup>1</sup>, que é um simulador de tráfego *open source*, que permite modelar o trânsito com carros, ônibus, ciclistas, pedestres, entre outras coisas.

SUMO foi usado no propósito de gerar o cenário em que os nós seriam avaliados. O cenário usado foi uma *grid*, com quarteirões no formato 12x12, onde cada quarteirão

<sup>1</sup> <http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/>

Parâmetro	Valor
Número de Veículos	50
Modelo de tráfego de carros	Krauss
Viagem	Aleatória
Cenário	<i>Grid</i> , 3600mX3600m
Simulador de Redes	NS-3.26
PHY / MAC	3GPP LTE
Protocolo de Transportes	UDP
Modelo de Propagação	Nakagami
Tempo de Simulação	50s
Início de Transmissão	20s
Fim de Transmissão	36s
Vídeos Enviados	1 Vídeo para cada Conexão
Vídeo Usado	<i>Container</i> (Tx. de Mov. Média)
Tamanho do Pacote	1460B
Disposição de Rede Celular	7 Células
HPN Potência de Transmissão	46dBm
LPN Potência de Transmissão	30dBm
Frequência de Intervalo de Pacote em HPN (CBR)	1ms
Frequência de Intervalo de Pacote em LPN/HS (CBR)	10ms
Repetição de Simulação	10 Vezes

**Tabela 3. Parâmetros de Simulação**

possui 300 metros de comprimento cada, totalizando 3600mX3600m. Os nós consistem de carros, cada um com uma rota distinta e aleatoriamente geradas pelo SUMO. A simulação tem 50 carros rodando neste cenário e sua finalização ocorre quando todos os carros atingem seus respectivos destinos finais.

A geração de tráfego exporta um .xml, contendo as rotas dos carros e a distribuição geográfica da *grid*, para a análise em um simulador de redes. O ns-3.26<sup>2</sup> é um simulador de redes, de eventos discretos, para sistemas de Internet. O ns-3.26 utilizou o .xml exportado pelo SUMO como uma entrada da simulação. Os carros, agora tratados como nós(ou UE), foram equipados com a pilha de protocolos de Internet em seus *On-Board Units* (OBU).

A distribuição geográfica de estações rádio base eNB são inspiradas de acordo com em um cenário estabelecido pelo 3GPP [3GPP 2013]. O cenário consiste em 4 macro células (HPN - *High Power Node*) e ainda 3 micro células (LPN - *Low Power Node*). Este cenário inspirou nosso trabalho, porém nem todas as características foram replicadas fielmente devido às limitações do simulador. Todos os parâmetros de simulação podem ser vistos na Tabela 3. Propositamente células com maior potência de transmissão tem uma carga de tráfego maior, pois as mesmas comportam um maior número de usuários.

A proposta e outros algoritmos foram avaliados 10 vezes. Depois disso, é iniciado o terceiro passo da simulação: avaliação dos resultados. E cada vídeo transmitido foi

<sup>2</sup><https://www.nsnam.org/>

observado sob dois importantes aspectos de QoE: SSIM e VQM.

SSIM (*Structural Similarity*) é uma medida que avalia a similaridade estrutural, de luminância e de contraste entre duas imagens: a entrada original (sem compressão) e a saída (comprimida e transmitida). A análise/comparação é feita para todos os *frames* do vídeo. Este método geralmente condiz com a percepção visual humana, logo se os resultados do SSIM forem bons, a imagem (ou vídeo) de saída também é considerada boa. Sua escala varia entre 0 e 1, sendo quanto maior, melhor.

VQM (*Video Quality Metric*) [Xiao 2000] usa uma métrica de Transformada Discreta do Cosseno para avaliar a percepção visual humana de uma imagem, classificando o vídeo em uma escala de quanto menor o resultado obtido, melhor. Tanto o SSIM quanto o VQM são ótimas métricas para medir resultados objetivos de QoE. Ambas as métricas são mensuradas com a ajuda do MSU *Quality Measure Tool*<sup>3</sup>. Os resultados finais foram comparados entre o algoritmo proposto (*Handover AHP*), e com dois considerados padrões pelo módulo LTE do simulador de redes ns-3: A2-A4-RSRQ<sup>4</sup> e A3-RSRP<sup>5</sup>.

A2-A4-RSRQ ocorre quando o RSRQ da célula atual é pior que um *threshold*/limite (Evento A2) e quando o valor RSRQ da célula vizinha é melhor do que este mesmo *threshold* (Evento A4). Por padrão, o *threshold* [3GPP 2015a] é um valor muito baixo para que o algoritmo possa vencer este critério, permitindo assim a execução do *handover*.

O algoritmo de *handover* A3-RSRP (*Handover* de célula mais forte) também chamado de *traditional power budget* (PBG) [Dimou et al. 2009], é ativado quando detecta um maior valor de RSRP nas células vizinhas comparado aos da célula servidora (Evento A3). Um histerese (valor em dB usado para ativar o *handover*) e tempo de ativação (tempo de espera para acontecer o *handover*) [3GPP 2016] foram acionados para limitar a frequência de *handover*.

## 5. Análise de Resultados

Cada transmissão de vídeo foi avaliada em termos de SSIM e VQM. Foram obtidas a média e desvio padrão de cada algoritmo diante das métricas avaliadas. Todas as configurações para as 3 propostas é a mesma, mudando apenas o próprio algoritmo de decisão de *handover*. Com estes resultados é possível avaliar a Qualidade de Experiência dos vídeos transmitidos.

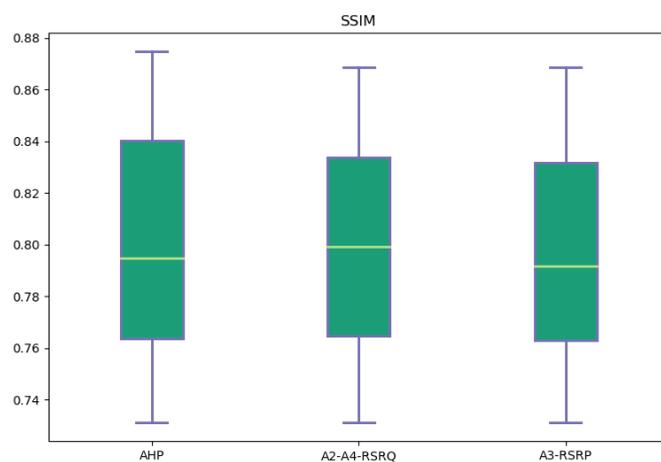
A Figura 5 mostra o desempenho em termos de SSIM de cada abordagem. É possível ver que o *Handover AHP* teve um desempenho similar ao *Handover A2A4-RSRQ* e ao *Handover A3-RSRP*, mas com seus dados dispersos acima dos resultados obtidos pelos algoritmos concorrentes.

Na Figura 6 são mostradas as medidas de VQM para a mesmas transmissões. Vemos que os valores obtidos pelo *Handover AHP* possuem uma média e alguns valores individuais bem menores que os concorrentes. Como dito anteriormente, menores valores de VQM implicam em uma maior semelhança entre o vídeo transmitido e o original, garantida pela melhor transmissão devido ao uso do algoritmo proposto.

<sup>3</sup>[http://www.compression.ru/video/quality\\_measure/perceptual\\_video\\_quality\\_tool.html](http://www.compression.ru/video/quality_measure/perceptual_video_quality_tool.html)

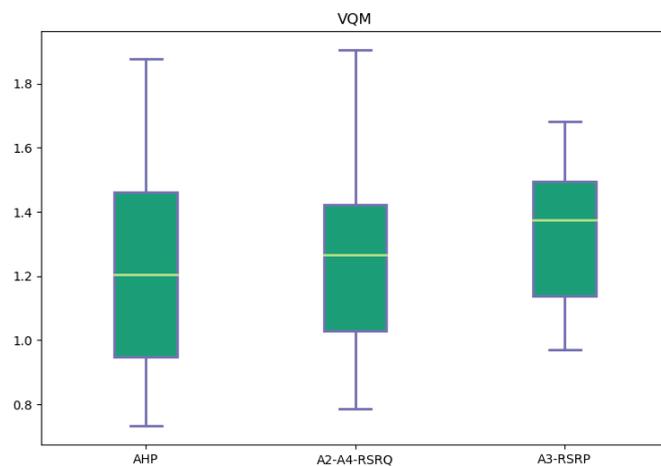
<sup>4</sup><https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html#a2-a4-rsrq-handover-algorithm>

<sup>5</sup><https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html#strongest-cell-handover-algorithm>



**Figura 5. Similaridade Estrutural (SSIM) Alcançada por Cada Algoritmo**

Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de a proposta, ao contrário dos outros algoritmos comparados, levar em conta a Qualidade de Experiência estimada na decisão do *handover* (MOSp), priorizando assim a conexão em células capazes de garantir a entrega eficiente do vídeo.



**Figura 6. Índice de VQM em Transmissões de Cada Algoritmo**

## 6. Conclusão

Com a crescente demanda por conteúdo multimídia, técnicas de *handover* baseadas apenas em potência de sinal podem não ser mais capazes de garantir boas taxas de Qualidade de Experiência aos usuários. Por isso, foi proposto um algoritmo de *handover* ciente de aplicações multimídia e niveladas por uma função-custo (AHP) que leva em consideração várias métricas importantes para tal cenário.

Foi constatado que para este cenário de redes heterogêneas, o *Handover* AHP apresenta um melhor desempenho na entrega de conteúdo multimídia. Seu funcionamento é capaz de determinar a melhor decisão para se conectar em um ambiente distinto mesmo que algumas das células vizinhas não escolhidas apresentassem maiores intensidade de sinal.

## 7. Referências Bibliográficas

### References

- (2007). Vocabulary for performance and quality of service - Amendment 1: New Appendix I – Definition of Quality of Experience (QoE). Technical report, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
- 3GPP (2013). 3GPP TR 36.872, 3rd Generation Partnership Project; Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN - Physical layer aspects (Release 12). Technical Report V12.1.0, 3GPP.
- 3GPP (2015a). 3GPP TS 36.133, 3rd Generation Partnership Project; Requirements for support of radio resource management (Release 12). Technical Report V12.6.0, 3GPP.
- 3GPP (2015b). 3GPP TS 36.214, 3rd Generation Partnership Project; E-UTRA Physical layer - Measurements (Release 12). Technical Report V12.2.0, 3GPP.
- 3GPP (2016). 3GPP TS 36.331, 3rd Generation Partnership Project; E-UTRA Radio Resource Control (RRC) protocol specification (Release 13). Technical Report V13.0.0, 3GPP.
- Ahmed, A., Boulahia, L. M., and Gaiti, D. (2014). Enabling vertical handover decisions in heterogeneous wireless networks: A state-of-the-art and a classification. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16(2):776–811.
- Bazzi, A. (2010). A softer vertical handover algorithm for heterogeneous wireless access networks. In *21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 2156–2161.
- Chandavarkar, B. and Guddeti, R. M. R. (2016). Simplified and improved multiple attributes alternate ranking method for vertical handover decision in heterogeneous wireless networks. *Computer Communications*, 83:81 – 97.
- Chang, B. J., Chen, J. F., Hsieh, C. H., and Liang, Y. H. (2009). Markov decision process-based adaptive vertical handoff with rss prediction in heterogeneous wireless networks. In *2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1–6.
- Chinnappan, A. and Balasubramanian, R. (2016). Complexity consistency trade-off in multi-attribute decision making for vertical handover in heterogeneous wireless networks. *IET Networks*, 5(1):13–21.

- Dimou, K., Wang, M., Yang, Y., Kazmi, M., Larmo, A., Pettersson, J., Muller, W., and Timner, Y. (2009). Handover within 3gpp lte: Design principles and performance. In *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, pages 1–5.
- Drissi, M. and Oumsis, M. (2015). Multi-criteria vertical handover comparison between wimax and wifi. *Information*, 6(3):399.
- Elhadj, H. B., Elias, J., Chaari, L., and Kamoun, L. (2016). Multi-attribute decision making handover algorithm for wireless body area networks. *Computer Communications*, 81:97 – 108.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. In *International Journal of Services Sciences (IJSSci)*, volume 1, pages 83–98.
- Wang, H. L. and Kao, S. J. (2011). A vertical handover scheme from wman to wlan by taking into account the maximum available resource. In *2011 6th International Conference on Computer Science Education (ICCSE)*, pages 1373–1378.
- Xenakis, D., Passas, N., Merakos, L., and Verikoukis, C. (2016). Handover decision for small cells: Algorithms, lessons learned and simulation study. *Computer Networks*, 100:64 – 74.
- Xiao, F. (2000). Dct-based video quality evaluation—final project for ee392j.
- Xu, D.-L. (2012). An introduction and survey of the evidential reasoning approach for multiple criteria decision analysis. *Annals of Operations Research*, 195(1):163–187.
- Zineb, A. B., Ayadi, M., and Tabbane, S. (2015). Who decision using a fuzzy reverse mlp with reinforcement learning. In *2015 5th International Conference on Communications and Networking (COMNET)*, pages 1–6.