



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Seleção de codificadores de voz (codecs) através do  
balanceamento entre QoS e QoE auxiliado por algoritmo  
baseado em Análise Hierárquica de Processos (AHP)**

Carlos José dos Santos

Itajubá, Agosto de 2019.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Carlos José dos Santos

**Seleção de codificadores de voz (codecs) através do  
balanceamento entre QoS e QoE auxiliado por algoritmo  
baseado em Análise Hierárquica de Processos (AHP)**

Qualificação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

**Área de concentração:** Automação e Sistemas Elétricos Industriais

**Orientador:** Dr. Luiz Edival de Souza

Agosto de 2019

Itajubá - MG

## Dedicatória

*Dedico esta dissertação aos meus amigos e familiares, em especial ao meu filho Rafael e minha esposa Cristiane.*

## Agradecimentos

A DEUS por providenciar esta oportunidade, sempre me protegendo e iluminando.

Ao Prof. Dr. Edival, meus agradecimentos pela competência, paciência e confiança realizadas neste trabalho. Pelo seu conhecimento transmitido, dedicação e entusiasmo demonstrado.

Ao IFSULDEMINAS – Campus Avançado Três Corações que através do PIQ (Programa de Incentivo a Qualificação) deu apoio e fomentou a minha caminhada desde o início até a conclusão deste programa.

A minha família por compreender e partilhar minhas angústias e aflições, em especial ao minha esposa pelo companheirismo e por acreditar nos meus sonhos respeitando-os com constante incentivo e admiração, principalmente por tudo que temos compartilhado juntos.

Muitos foram os que contribuíram de forma decisiva para a conclusão deste trabalho, agradeço, sinceramente, a todos.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para que este projeto fosse concluído, de um modo geral a todos os amigos que me acompanham e aqueles que conquistei, cada um do seu modo, me estimulando necessariamente.

Finalmente, agradeço ao IESTI – Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação.

## Resumo

Em processos de tomada de decisão, muitas variáveis necessitam ser consideradas. Essas variáveis podem ser descobertas através da investigação dos fatos ou amparadas por dados advindos de análises numéricas. Geralmente, as descobertas dos fatos relevantes são propiciadas devido às experiências anteriores do tomador de decisão e possuem estruturas não numéricas, isto é, são expressas por valores linguísticos. Assim, os decisores enfrentam em seu trabalho diário, dificuldades para agrupar estes valores linguísticos àqueles de origem numérica.

Normalmente, no trato de redes computacionais, inúmeros dados são gerados a cada segundo. Apesar de haver especialistas capacitados para analisar esses dados, o processo pode ser extenuante devido ao altíssimo volume. O uso de ferramentas que auxiliem na análise e decisão das ações a serem tomadas cada vez mais se torna necessária. Assim, análises heurísticas devem ser somadas a análises minuciosas de modelos matemáticos dos sistemas utilizados para apoio a decisões.

O objetivo principal deste trabalho é propor um novo algoritmo para seleção de codificadores de voz (codecs) baseado na metodologia de multicritérios – AHP (Análise Hierárquica de Processos) denominado AHP Codec Selection. O AHP Codec Selection constitui-se então de uma ferramenta utilizada para otimização de QoS em redes convergentes.

O principal benefício alcançado com o algoritmo AHP Codec Selection foi selecionar os codecs, dados os estados da rede distintos. Entretanto, o estudo também demonstra a influência destes codecs dentro de redes convergentes de dados. Dado o crescimento desse tipo de rede, métodos de ajustes e melhora da qualidade dos serviços oferecidos tornam-se imprescindíveis.

Um exemplo de aplicação do algoritmo proposto foi utilizado para o gerenciamento da rede do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - Campus Avançado Três Corações.

**Palavras Chave:** Modelos matemáticos, QoS, QoE, redes convergentes, codecs, VoIP.

## Abstract

In decision-making processes, many variables need to be considered. These variables can be discovered by investigating the facts or supported by numerical analysis data. In general, the findings of the relevant facts are provided because of the previous experiences of the decision-maker and have non-numerical structures, i.e., are expressed by linguistic values. Thus, the decision-makers have in their daily work, difficulties in grouping these linguistic values into those of numerical origin.

Typically, in the computational network tract, countless data is generated every second. Although there are specialists trained to analyze these data, the process can be exhausting due to the very high volume. The use of tools that assist in the analysis and decision of actions to be taken more and more is necessary. Thus, heuristic analyses should be added to a thorough analysis of mathematical models of the systems used for decision support.

The main objective of this work is to propose a new algorithm for the selection of Voice encoders (codecs) based on the methodology of Multicriteria – AHP (hierarchical process analysis) called AHP Codec Selection. AHP Codec Selection is then a tool used to optimize QoS in convergent networks.

The main benefit achieved with the AHP Codec Selection algorithm was to select the different codecs, data network states. However, the study also demonstrates the influence of these codecs on the inside of converged data networks. Given the growth of this type of network, methods of adjustments and improvement of the quality of services offered become indispensable.

An example of application of the proposed algorithm was used to manage the network of the Federal Institute of Education, Science and Technology of the south of Minas Gerais-Campus Avançado Três Corações.

**Keywords:** Mathematical models, QoS, QoE, Converged networks, codecs, VoIP.

*“A dúvida é o princípio da sabedoria”*

*Aristóteles*

## Sumário

Dedicatória	III
Agradecimentos	IV
Resumo	V
Abstract	VI
Sumário	VIII
Lista de Figuras	XI
Lista de Tabelas	XII
Lista de Quadros	XIII
Lista de siglas de abreviações	14
1. Introdução	15
1.1 Considerações iniciais	15
1.2 Objetivo	16
1.3 Motivação	17
1.4 Organização do Trabalho	17
2. Referencial Teórico	18
2.1 Comparação entre a qualidade de serviço e a qualidade de experiência	18
2.1.1 Qualidade de Experiência (QoE)	18
2.1.2 Fatores que influenciam a QoE e as suas áreas de aplicação	19
2.1.3 Diferença entre qualidade de serviço e acordo de nível de serviço	20
2.1.4 Dificuldades na implementação de QoS	21
2.1.5 QoS em VoIP	22
2.2 Voz sobre Protocolo de Internet (VoIP)	24
2.2.1 Definição	26
2.2.2 Codificação e Decodificação	27
2.2.3 Arquitetura e Protocolos	28
2.2.3.1 Protocolos de sinalização	28



	IX
2.2.3.2 Protocolos de transporte	30
2.2.4 Recomendações ITU-T	31
2.2.4.1 Recomendação ITU-TP.800	32
2.2.5 Algoritmos MOS	32
2.3 AHP	33
2.3.1 Introdução	33
2.3.2 Processo de Análise Hierárquica (AHP)	34
2.3.3 Elementos fundamentais	35
2.3.3.1 Modelagem hierárquica	35
2.3.3.2 Julgamento dos elementos.	36
2.3.3.3 Cálculo dos pesos de todos os elementos	36
2.3.3.4 Análise dos resultados	37
2.3.4 Análise de Inconsistência	38
3. Metodologia	40
3.1 Base para modelagem	41
3.2 Cenários implementados	42
3.3 Dados registrados para análise	43
3.4 Algoritmo AHP Codec Selection	44
3.5 Aplicação da metodologia AHP ao problema	48
4. Resultados e discussões	53
5. Conclusão	65
5.1 Recomendações para trabalhos futuros	65
Referências Bibliográficas	66
ANEXO I	69
Algoritmo AHP Codec Selection	69



## Lista de Figuras

Figura 1 - Arquitetura típica de rede com VoIP. ....	25
Figura 2 - Pulse Code Modulation (PCM). ....	27
Figura 3 - A arquitetura básica de VoIP. ....	28
Figura 4 - Segmento UDP encapsulado. ....	30
Figura 5 - Exemplo de estrutura hierárquica de problemas de decisão. ....	35
Figura 6 - Redes Convergentes. ....	40
Figura 7 - Modelagem do ambiente. ....	42
Figura 8 - Processo de obtenção do codec pelo emissor. ....	45
Figura 9 - Processo de Comunicação. ....	45
Figura 10 - Saída do algoritmo AHP Codec Selection. ....	46
Figura 11 - Captura de processo de requisição de conexão VoiP. ....	47
Figura 12 - Saída do algoritmo AHP Codec Selection. ....	47
Figura 13 - Tendência dos pesos indicados pelo especialista. ....	51
Figura 14 - Resultado da seleção através do método clássico. ....	52
Figura 15 – Cenário 0: Tempo de Resposta E-mail. ....	53
Figura 16 - Cenário 1: Tempo de Resposta E-mail. ....	54
Figura 17 - Cenário 0: Ethernet Delay (atraso). ....	55
Figura 18 - Cenário 1: Ethernet Delay (atraso). ....	56
Figura 19 - Cenário 0: Tempo de Resposta HTTP. ....	56
Figura 20 - Cenário 1: Tempo de Resposta HTTP. ....	57
Figura 21 - Cenário 0: MOS. ....	58
Figura 22 - Cenário 1: MOS. ....	59
Figura 23 - Vetor de prioridades do especialista: Experimento 1 ....	60
Figura 24 - Vetor de prioridades do especialista: Experimento 2 ....	61
Figura 25 - Vetor de prioridades do especialista: Experimento 3. ....	62
Figura 26 - Vetor de prioridades do especialista: Experimento 4. ....	63

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Cabeçalho RTP.....	31
Tabela 2 - Exemplo de comparação par a par dos critérios.....	36
Tabela 3 - Índice de Consistência Aleatório.....	39
Tabela 4 - Características dos codecs utilizados no modelo. ....	42
Tabela 5 - Cenário 0 - Carga baixa de rede. ....	43
Tabela 6 - Cenário 1 - Carga baixa de rede. ....	43
Tabela 7 - Características dos codecs utilizados no modelo. ....	48
Tabela 8 - Matriz de decisão segundo o critério Taxa de Bits .....	49
Tabela 9 - Matriz de decisão segundo o critério MOS .....	49
Tabela 10 - Matriz de decisão segundo o critério Atraso .....	49
Tabela 11 - Normalização da matriz do Critério Taxa de Bits.....	50
Tabela 12 - Normalização da matriz do Critério MOS .....	50
Tabela 13 - Normalização da matriz do Critério Atraso .....	50
Tabela 14 - Matriz de avaliação das alternativas.....	50
Tabela 15 - Matriz de decisão critério x critério .....	51
Tabela 16 - Normalização da matriz de decisão dos critérios .....	51
Tabela 17 - Cálculo do resultado final.....	52
Tabela 18 - MOS em valores discretos.....	59
Tabela 19 - Codecs por ordem de prioridade. ....	59
Tabela 20 - Experimento 1. Cenário 0: Notas do Especialista. ....	60
Tabela 21 - Experimento 2. Cenário 1: Notas do Especialista. ....	61
Tabela 22 - Experimento 3. Cenário 0: Notas do Especialista. ....	62
Tabela 23 - Experimento 4. Cenário 1: Notas do Especialista. ....	63
Tabela 24 - Taxa de operação dos codecs .....	64

## Lista de Quadros

Quadro 1 - Pontuação MOS ( <i>Mean Opinion Score</i> ).....	32
Quadro 2 - Escala Fundamental de Saaty .....	36

## **Lista de siglas de abreviações**

ADPCM - Adaptive Differential Pulse-Code Modulation

AHP - Análise Hierarquia de Processos

CELP - Code Exited Linear Prediction

CODEC – Codificador/Decodificador

DNS - Domain Name System

DPCM - Differential Pulse Code Modulation

DSL - Digital Subscriber Line

FTP – File Transfer Protocol

HTTP - HyperText Transfer Protocol

IETF – Internet Engineering Task Force

IP – Internet Protocol

ITU – International Telecommunication Union

ITU-T – Telecommunication Standardization Sector of ITU

iVoIP – Intelligent Voice over Internet Protocol

LAN – Local Area Network

LPC – Linear Predictive Coding

MOS – Mean Opinion Score

PABX – Private Automatic Branch Exchange

PCM - Pulse Code Modulation

QoE – Qualidade de Experiência

QoS – Qualidade de Serviço

RTP - Real-time Transport Protocol

RTCP - Real-Time Transport Control Protocol

SIP – Session Initiation Protocol

SLA – Service Level Agreement

STFC – Sistema de Telefonia Fixa Comutada

TCP - Transmission Control Protocol

UDP - User Datagram Protocol

URI - Uniform Resource Identifier

VoIP – Voice over Internet Protocol

WLAN – Wireless Local Area Network

# 1. Introdução

## 1.1 Considerações iniciais

As decisões que envolvem muitas variáveis e que ditam novos caminhos para as empresas necessitam de apoio de uma metodologia sólida. Isto porque as decisões baseadas em uma metodologia tendem a ser melhores que as baseadas apenas em intuição, experiência ou outros fatores subjetivos que podem conter vícios.

Desta forma, foram desenvolvidos métodos para auxiliar tomadores de decisão a entender e gerenciar no processo decisório. Como estes métodos atuam e como aplicá-los é sem dúvida um contexto muito importante para sua correta utilização.

Um dos primeiros métodos multicritérios desenvolvidos e talvez o mais utilizado no mundo é o *Analytic Hierarchy Process* – AHP (GOMES et al, 2004). O AHP simula uma modelagem da mente humana. Quando o ser humano pensa, ele identifica objetos, ideias e também suas interrelações. Quando algo é identificado, sua complexidade é decomposta. Quando as relações são desvendadas, elas são sintetizadas. Este é o processo fundamental da percepção: decomposição e síntese; que servem de suporte aos fundamentos do AHP (SAATY, 1991).

No dia a dia, quanto o ser humano confronta-se com um grande número de elementos em uma situação complexa, sua mente agrupa-os utilizando propriedades comuns. Segundo Saaty (1991) a repetição dessa função de agrupamento em diferentes níveis hierárquicos converge para o objetivo do processo de decisão. A convergência para o objetivo decisório se processa através de comparações par a par, ou seja, comparações compostas por pares de elementos. Através dessas comparações é possível estabelecer uma relação de ordem entre esses elementos. Determina-se assim, uma síntese dos pesos ou valores dos agentes de decisão e consequentemente uma medida global para cada alternativa.

Diante disto, o método AHP consiste em particionar um problema, hierarquizar os critérios através de comparações e obter uma conclusão a partir dos resultados. O AHP baseia-se no princípio que, para se tomar uma decisão, a experiência e o conhecimento dos decisores são tão valiosos quanto os dados utilizados (GOMES, ARAYA, CARIGNANO, 2004).

Entretanto, durante um processo decisório é comum surgir situações incompatíveis, que podem apresentar conhecimentos parciais, falta de informação pertinente, situações indefinidas ou ainda contraditórias. Situações como essas são frequentemente descritas no mundo real.

Conseqüentemente, a aplicação de um método de tomada de decisão traz suporte, através de uma lógica, capaz de tratar todos estes comportamentos. Tendo em vista este panorama, o trabalho apresenta uma nova metodologia para análise e seleção de codificadores de voz utilizados em serviços de telefonia de voz sobre IP (VoIP, *voice over Internet protocol*), chamada AHP Codec Selection. O método aborda o problema em quatro etapas: coleta de dados, avaliação, priorização e decisão.

Na coleta de dados será utilizado a modelagem de uma rede de dados real em software específico. Nesta etapa serão obtidos os critérios, que são as características a serem consideradas ao comparar as alternativas. Serão definidas então as alternativas possíveis para alcançar o escopo escolhido.

O processo usado na avaliação e na priorização é o modelo da comparação das matrizes e o vetor de ordenação obtido pelo vetor dominante. De acordo com Capistrano (2009), usando a matriz recíproco-simétrica, serão realizadas comparações de todos os pares de alternativas, de acordo com cada um dos critérios escolhidos, atribuindo um grau de domínio de uma alternativa sobre a outra. O vetor dominante é usado igualmente na obtenção da prioridade ou do peso atribuído a cada critério. A análise dos critérios da rede será realizada através de algoritmo de forma dinâmica, enquanto a priorização dos fatores será realizada por um especialista na área de redes.

Finalmente, na fase da decisão, a melhor alternativa para alcançar o objetivo considerado é identificada. Será então apresentada a lista dos codecs em ordem de prioridade para que o serviço seja ofertado de acordo com os parâmetros selecionados.

## 1.2 Objetivo

O objetivo desta dissertação é propor um novo método de tomada de decisão para escolha de codecs utilizando a metodologia multicriterial – AHP Codec Selection. O AHP Codec Selection altera os processos de avaliação do método AHP clássico indicando notas através da análise da qualidade do serviço (QoS, *quality of service*) junto a qualidade de experiência do usuário (QoE, *quality of experience*). Para validar o método, o AHP Codec Selection será aplicado no ambiente modelado a fim de verificar a eficiência.

É proposto a elaboração de um modelo (aplicado a sistemas embarcados e/ou servidores de aplicação) que faça a gestão inteligente dos codificadores de voz (codecs) para otimizar o consumo de recursos de rede. Como requisitos primordiais: (1) deseja-se obter um modelo que possa ser facilmente acoplado a uma infraestrutura já existente; (2) possibilitar o monitoramento



e integração de diferentes tecnologias com gerenciamento do controle de banda alocado a comunicação VoIP; bem como, (3) buscar abranger vários tipos de situações de problemas ligados a consumo de banda em redes que compartilham recursos de voz e dados.

### **1.3 Motivação**

O crescente interesse na utilização de técnicas de tomada de decisões nas empresas e instituições, principalmente ligados ao gerenciamento a grande expansão das redes de dados, vem despertando na comunidade acadêmica, novos rumos para estudos de métodos inovadores que auxiliem os decisores. Entretanto, as decisões que envolvem muitas variáveis devem ser apoiadas por uma análise sólida, sem vícios. Compreender como estes métodos funcionam e como aplicá-los, certamente, é um assunto muito interessante.

Ademais, a crescente convergências das redes de comunicação de computadores demandam cada vez mais de ajustes finos quanto a qualidade dos serviços prestados. Em um ambiente onde cada vez mais recursos tem sido compartilhados, decisões erradas quanto a demanda, uso e correto gerenciamento dos recursos podem inviabilizar grandes investimentos na área de redes de computadores em pequenas, médias e grandes instituições.

### **1.4 Organização do Trabalho**

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos. O capítulo 2 abordará as técnicas de equalização dos serviços de rede baseadas em qualidade de serviço em comparação com a qualidade de experiência do usuário. Além disso, serão apresentados dados referentes a temas relacionados a área de redes de dados, como protocolos, algoritmos e métricas, além de um dos métodos de apoio à decisão multicritério, a Análise Hierárquica de Processos (AHP, *Analytic Hierarchy Process*), seguido de um exemplo de aplicação.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para modelagem do sistema, ferramentas e parâmetros fornecidos para obtenção dos dados da rede. Nesse capítulo também será possível verificar o local de atuação e as etapas necessárias para tomada de decisão do algoritmo de seleção.

O capítulo 4 apresenta os resultados do método AHP Codec Selection visando auxiliar o tomador de decisão em sua tarefa de configurar recursos de rede de forma satisfatória.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões e discussão de trabalhos futuros que poderiam orientar novas pesquisas que possam dar continuidade aos resultados obtidos nessa dissertação.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1 Comparação entre a qualidade de serviço e a qualidade de experiência

#### 2.1.1 Qualidade de Experiência (QoE)

De acordo com Laghari e Connelly (2012), a noção de qualidade de experiência tem sido um dos principais temas de pesquisa da comunidade científica relacionada às telecomunicações. Destaca-se que, apesar dessa constatação, este conceito pode ser aplicado a várias outras áreas do conhecimento, por levar em consideração a bagagem de conhecimento do analista da situação problema.

O conceito de QoE está relacionado à satisfação do cliente com os serviços prestados, principalmente referindo-se a telecomunicação em geral. Se o usuário de um serviço não percebe que está recebendo um produto suficientemente bom para o valor que está pagando, ele pode abandonar o provedor do serviço em questão (FIEDLER et al., 2010).

Segundo Tsiaras et al. (2014), as métricas de qualidade de serviço são utilizadas para avaliar a qualidade alcançada dos serviços entregues, sob a perspectiva dos operadores de rede. Entretanto, essas métricas não são adequadas para avaliar a experiência dos usuários finais, pois ela deve ser dimensionada com base em atividades tais como velocidade de carregamento de uma página web, qualidade de vídeo ou voz em um serviço de VoIP, dentre outros. E, por isso, é importante distinguir entre o conceito de QoE e QoS. Em anuência a essa afirmação, Mellouk, Hoceini e Tran (2013) citam que a QoE tem sido um critério decisivo para o sucesso do gerenciamento de redes de telecomunicações, e que a percepção do usuário deve ser a base para o desenvolvimento dos serviços futuros neste setor.

Antons et al. (2015) afirmam também que a definição de QoE tem provocado um interesse crescente pela relação entre emoções, características de qualidade e percepção de qualidade.

Dessa forma, os resultados da avaliação de QoE são apresentados como um valor escalar simples, tipicamente usando o índice de pontuação média de opinião (MOS, *Mean Opinion Score*) do setor de normalização das telecomunicações da união internacional das telecomunicações (ITU-T, *telecommunication standardization sector of international telecommunications union*) P.800 (ITU-T, 1996), que, embora útil, suas limitações são evidentes para várias aplicações por utilizar somente a média aritmética (HOBFELD;

HEEGAARD; VARELA, 2015). Este fato também é criticado por Antons et al. (2015), pois a média como é dada impede um provedor de serviço de ter um número real de quantos usuários serão atendidos ou estão insatisfeitos. Mas, apesar das limitações indicadas pelos autores, esta é a forma estabelecida pela ITU-T de se avaliar QoE em cenários de chamadas de voz.

Por outro lado, o QoS não pode ser desconsiderado. Sua aplicação em redes de dados também se mostra viável pois tem por principal objetivo fornecer serviços melhores e mais previsíveis, fornecendo características melhoradas para a rede. O QoS atinge esses objetivos, fornecendo ferramentas para gerenciar o congestionamento e formação de tráfego, utilizando-se de quantificadores de recursos da rede e definindo políticas de tráfego desta. O QoS oferece serviços de rede inteligente que, quando corretamente aplicadas, ajudam a fornecer desempenho consistente e previsível (CISCO SYSTEMS, 2019).

Ademais, o QoS serve para mensurar, de forma quantitativa (discreta), a qualidade dos serviços oferecidos em uma rede de comunicações, ou seja, refletir o quanto ela é capaz de atender às expectativas de seus usuários através dos serviços que a mesma oferece.

### **2.1.2 Fatores que influenciam a QoE e as suas áreas de aplicação**

O que faz com que o conceito de QoE seja sutil é que os parâmetros de avaliação que o definem podem diferir de serviço para serviço. Por exemplo, se determinada operadora telefônica oferece um bom serviço de ligações nacionais, mas seu serviço de ligações internacionais for ruim, os usuários que não efetuam ligações para outros países terão uma qualidade de experiência melhor e, por isso, mais satisfeitos que os demais (KUIPERS et al., 2010). Os parâmetros de avaliação podem ser classificados em três grupos que são:

1. A qualidade do conteúdo do vídeo/áudio na origem;
2. QoS, a qual se refere à entrega do conteúdo na rede;
3. Percepção humana, que inclui expectativas, ambiente, estado emocional, etc.

Deste modo, a qualidade do conteúdo refere-se ao tipo de codificador/decodificador (*codec*) utilizado, à taxa de bits e de amostragem, etc. Os parâmetros da QoS que afetam o desempenho dos serviços de transmissão de áudio e vídeo em tempo real (*streaming*) são, na maioria das vezes, a largura de banda, os atrasos, o jitter e a perda de pacotes. De acordo com (KUIPERS et al., 2010) os grupos 1 e 2 são relativamente fáceis de se quantificar, em contrapartida, o grupo 3 não, pois trata-se da percepção humana.

De forma generalizada, há três possíveis tipos de metodologias para avaliar a qualidade do sinal. O primeiro tipo consiste num modelo sem referência que não conhece o arquivo original; o segundo é um modelo de referência reduzida que conhece de forma limitada

o arquivo original e tenta combinar isto com avaliações em tempo real para conseguir prever o MOS, e o terceiro é o modelo de referência completa que tem acesso ao arquivo original (KUIPERS et al., 2010).

Dessa forma, classifica-se a recomendação ITU-T P.563 como sendo um exemplo do primeiro e segundo tipo de metodologia e as recomendações ITU-T P.862 e P.863 do terceiro tipo de metodologia.

Apesar das soluções existentes para se prever o índice de satisfação do usuário, Antons et al. (2015) afirmam que, não está claro como, e sob que circunstâncias, os aspectos técnicos de qualidade, tais como artefatos de compressão de vídeo, interrupções, etc., influenciam o estado emocional e/ou a compreensão dos usuários e, assim, suas avaliações de QoE. Além disso, também não é conhecido como a conotação emocional do próprio conteúdo experimentado, em conjunto com outros fatores, pode influenciar a avaliação e o processo de percepção da qualidade.

### **2.1.3 Diferença entre qualidade de serviço e acordo de nível de serviço**

A recomendação ITU-T E.860 descreve que a crescente competição, em parte favorecida pelos requisitos de performance impostos pelos usuários, tem produzido uma grande pressão sobre os provedores de redes e serviços. Estes últimos, após terem enfrentado redução de custos por vários anos têm, nos dias atuais, tentado melhorar sua QoS, na tentativa de se diferenciar no mercado e cativar mais seus clientes.

Além disso, esta situação destaca-se pela sempre crescente demanda global de serviços dessa natureza e, por isso, o papel de todas as entidades que fazem parte da provisão destes serviços e seus parceiros deve ser formalmente descrito. O escopo deve estabelecer responsabilidades para cada provedor, além de garantir a QoS requerida pelo usuário (ITU-T, 2002).

Esta recomendação relata também que, para formalizar as relações entre as entidades, deve ser criada uma ferramenta importantíssima, o acordo de nível de serviço (SLA, *service level agreement*). Esse acordo deve ser elaborado entre duas ou mais partes após negociação, a fim de estabelecer as regras para se avaliar as características do serviço, as responsabilidades e as prioridades de cada parte envolvida.

Por fim, a recomendação ITU-T E.860 estabelece que, dentro da estruturação da SLA, deve haver um elemento denominado "Acordo de QoS", no qual devem constar regras formais entre as partes para monitorar, medir e decidir os parâmetros de QoS para que o objetivo seja atingido e, no final, o usuário esteja satisfeito com o serviço prestado.

### 2.1.4 Dificuldades na implementação de QoS

A QoS pode ser definida como a capacidade da rede de ofertar e garantir bons serviços a seus clientes. Em outras palavras, a QoS mede o grau de satisfação do usuário e o desempenho da rede. Aplicações que utilizam o protocolo de transferência de arquivos (FTP, *file transference protocol*), o protocolo de transferência de hipertexto (HTTP, *hypertext transference protocol*) e e-mail não são sensíveis ao atraso das informações transmitidas, enquanto outros aplicativos, como voz e vídeo (chamadas de voz ou videoconferências), são mais sensíveis à perda, atraso e instabilidade das informações.

O desenvolvimento inicial de especificações de QoS geralmente são um desafio, pois deve-se equilibrar inúmeras variáveis (largura de banda, atraso, jitter e perda de pacotes) para obter o desempenho desejado das aplicações. É necessário, a princípio, identificar e categorizar o tráfego de rede gerado por cada aplicação (CISCO SYSTEMS, 2019).

Apesar disso, dispositivos de rede precisam ser programados com o conjunto correto de recursos e parâmetros para implementar essas políticas. Embora haja documentação rica sobre QoS, o processo de implementação efetiva é moroso. Sem automação, a configuração de QoS pode ser muito complexo. Isto se dá, comumente, devido às redes conterem vários tipos de dispositivos conectados, incluindo telefones IP, comutadores e roteadores. Diferentes dispositivos e de diferentes fornecedores, implementam funcionalidades de QoS de maneira diferente, criando um desafio para o administrador de rede.

Os administradores de rede são geralmente inundados com grandes quantidades de dados, entretanto, pouca informação é relevante para ajudar a identificar a causa de um problema ou quaisquer tendências importantes (por exemplo, padrões de tráfego e exceções).

Obter as informações corretas pode ser muito caro, e geralmente chega tarde demais para ser útil. Um exemplo típico é descobrir "quem" (ou seja, qual usuário ou endereço IP) está causando congestionamento ou criando cargas anormais em um link. Sem automação, estabelecer um processo de monitoramento eficiente pode levar muito tempo (CISCO SYSTEMS, 2019).

Grandes empresas desenvolvedoras de soluções para QoS, vêm, por anos, desenvolvendo tecnologias para implantação e administração de redes convergentes, entretanto, somente com funcionalidades proprietárias e que dependente de seus equipamentos.

### 2.1.5 QoS em VoIP

O processo de transmissão de voz pela rede mundial de computadores, conhecida como voz sobre IP (VoIP, *voice over Internet protocol*) usa o Protocolo da Internet (IP, *Internet protocol*) para transmitir a voz como pacotes em uma rede IP, em vez do sistema tradicional de telefone fixo chamado serviço de telefonia fixa comutada (STFC). O processo de VoIP pode ser alcançado em qualquer rede de dados que use IP, por exemplo, Internet e redes locais (LANs, *local area networks*). Por VoIP, o sinal de voz primeiro é digitalizado, compactado e convertido em pacotes IP e, em seguida, será transmitido pela rede. Com esta tecnologia, há um potencial para alcançar transmissão da voz a custos muito baixos ou até de forma gratuita. O aumento da capacidade da Internet, além da popularidade, aumenta a necessidade de fornecer serviços de voz e vídeo em tempo real à rede (ELMAHDY et al., 2009).

Segundo Kazemitabar et al, (2010) a QoS em VoIP pode ser medida de acordo com as recomendações do ITU-T com base em diferentes parâmetros como (atraso, jitter e perda de pacotes), esses parâmetros podem ser alterados e controlados dentro da faixa aceitável para melhorar o desempenho das comunicações. Alguns dos fatores que afetam a QoS são brevemente descritos a seguir:

#### I. Latência

Por se tratar de uma aplicação sensível ao atraso, a voz não pode tolerar muito o retardamento dos pacotes. A latência é definida como o tempo médio que um pacote leva para viajar da origem até o destino. O ideal é manter o atraso o mais baixo possível, mas se houver muito tráfego na linha (congestionamento) ou se um pacote de voz ficar preso atrás de vários pacotes de dados (como um anexo de email), o pacote de voz sofrerá atraso a ponto de comprometer a qualidade da chamada (SALAMA et al., 2009). A latência máxima que uma chamada de voz pode tolerar sem perda evidente de qualidade é de 150 milissegundos (0,15 segundos), mas é preferível que seja de 100 milissegundos (0,10 segundos) (MOHAMMED et. al, 2013).

$$D = \sum_{i=1}^N di/N \quad (2.1)$$

onde,  $D$  (atraso médio) é expresso como a soma de todos os atrasos ( $di$ ), dividido pelo número total de medições ( $N$ ). Segundo Tawfeeq (2009) a equação utilizada para o cálculo do atraso é descrita a descrita em Eq. 2.1.

## II. Perda de Sincronismo (Jitter)

Para que a voz seja inteligível, os pacotes de voz devem chegar a intervalos regulares. A análise da perda de sincronismo (jitter) descreve o grau de flutuação no acesso a pacotes, que pode ser causado por alto tráfego na linha (SALAMA et. al, 2009). Observa-se que o cálculo do jitter corresponde ao erro médio quadrático dos atrasos em relação ao atraso médio para uma quantidade  $N$  de medições. Os pacotes de voz podem tolerar apenas cerca de 75 milissegundos (0,075 segundos), mas é preferível que seja de 40 milissegundos (0,040 segundos) de atraso (MOHAMMED et. al, 2013).

$$J = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - D)^2} \quad (2.2)$$

De acordo com Tawfeeq (2009), a equação (Eq. 2.2) mostra o cálculo do Jitter ( $J$ ). O atraso médio e o jitter são medidos em segundos. Obviamente, se todos os valores de atraso ( $d_i$ ) são iguais, então  $D$  (atraso médio) =  $d_i$  e  $J = 0$  (ou seja, não há jitter).

## III. Perda de pacotes

Perda de pacotes é o termo usado para descrever os pacotes que não chegam ao destino pretendido quando um dispositivo (roteador, comutador) está sobrecarregado e não pode aceitar nenhum dado recebido em um determinado momento (MOHAMMED et. al, 2013). Ainda, segundo autor, os pacotes serão descartados durante os períodos de congestionamento da rede. O tráfego de voz pode tolerar menos de 3% de perda de pacotes, sendo 1% é o ideal, antes que os chamadores sintam as lacunas na conversa.

$$P = (N_L/N) \times 100\% \quad (2.3)$$

A equação (Eq. 2.3) mostra o cálculo da taxa de perda de pacotes ( $P$ ) definida como uma razão entre o número de pacotes perdidos e o número total de pacotes transmitidos, onde  $N$  é igual ao número total de pacotes transmitidos durante um período de tempo específico e  $N_L$  é igual ao número de pacotes perdido durante o mesmo período de tempo.

Portanto, a QoS atrelada a sistemas VoIP é de suma importância para garantir que os pacotes de voz não sofram atrasos ou sejam perdidos enquanto transmitidos pela rede (KAZEMITABAR et. al, 2010).



## 2.2 Voz sobre Protocolo de Internet (VoIP)

A transmissão de voz sobre o protocolo de internet (VoIP, *voice over internet protocol*) corresponde à tecnologia que permite o estabelecimento de chamadas e transporte da voz utilizando a rede IP. Além disso, diz-se que uma rede está preparada para oferecer o serviço de VoIP quando ela possui o tratamento adequado para tal, desde permitir este tipo de tráfego através de seus *firewalls* até utilizar práticas de QoS para garantir a qualidade das ligações (BORDIM, 2010).

Em suma, permite o tráfego de voz pelas redes de computadores. Alternativa extremamente viável dada a crescente implantação de redes de dados e por até pouco tempo, ser possibilitada apenas pela rede de telefonia tradicional. Com a implantação de Voz sobre IP, permite-se efetuar ligações telefônicas entre computadores, telefones comuns, telefones IP, celulares e centrais telefônicas (PABX) que podem, facilmente, ser substituídas fisicamente por versões virtualizadas em servidores de rede, com qualidade muitas vezes superior à telefonia convencional.

Ainda, segundo Bordim (2010), as vantagens da implantação da tecnologia VoIP perpassam pelos custos reduzidos de comunicação, proteção ao investimento, possibilidade de utilização de infraestrutura existente, infraestrutura demandada para implantação simplificada, possibilidade portabilidade e acréscimo de funcionalidades em tempo real de operação. Enfim, cita como benefícios de sua utilização a redução de custos, alto retorno sobre o investimento e integração com a rede de telefonia comutada convencional (ver Figura 1).

Entretanto, Bordim (2010) também cita que podem ocorrer desvantagens levando-se em consideração que tal implementação necessita de aquisição e modernização de equipamentos, certa escassez de mão de obra especializada, além da limitação da rede e/ou problemas relacionados a QoS.

Essa tecnologia foi introduzida no início da década de 90 pela empresa VocalTec Communications, que em 1994 desenvolveu um projeto de digitalização da voz que a comprimia e transmitia através da rede. Em seu princípio só era possível realizar ligações entre dois computadores. A qualidade era baixa, devido a vários cortes e atrasos. Desde então, a força tarefa de engenheiros para Internet (IETF, *Internet engineering task force*) e pela união internacional de telecomunicações (ITU, *international telecommunication union*) vem desenvolvendo e regulamentando padrões para sua efetiva utilização.

No final dos anos 90, surgiu o primeiro protocolo de sinalização para o estabelecimento de chamadas de voz através redes de pacotes, o H.323, desenvolvido pelo ITU. Posteriormente,



a IETF desenvolveu o protocolo de início de sessão (SIP, *session initiation protocol*), mais eficaz que seu antecessor, possibilitou a transmissão com maior qualidade e é o protocolo utilizado até então para as transmissões de VoIP.

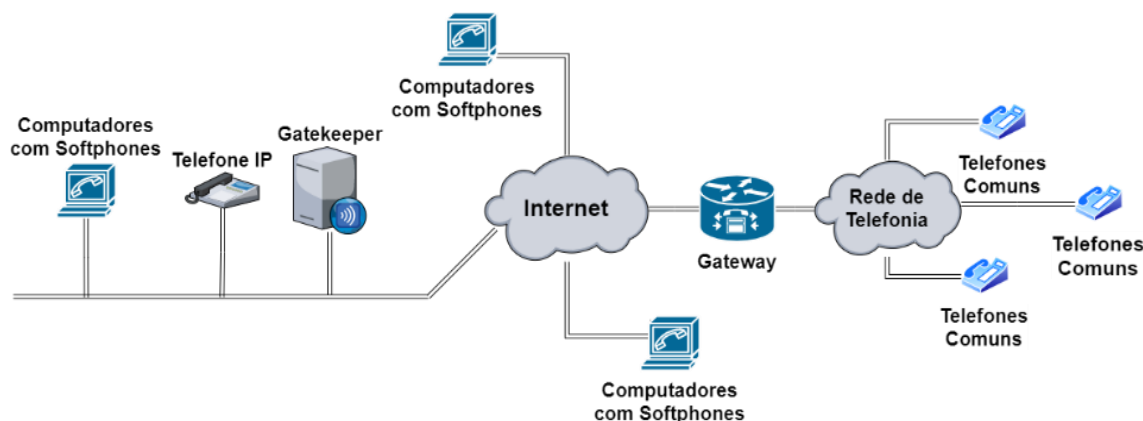


Figura 1 - Arquitetura típica de rede com VoIP.

De forma geral, a Voz sobre Protocolo de Internet tem sido amplamente utilizado em redes locais (LAN) IEEE 802.3 e redes locais sem fio (WLAN, *wireless local area network*) IEEE 802.11 devido ao seu baixo custo e conveniência. No entanto, os atrasos de todos os fluxos de VoIP aumentam dramaticamente quando a capacidade da rede é abordada. Além disso, a distribuição injusta do tráfego entre os fluxos de downlink e uplink em redes afeta a qualidade de VoIP percebida.

Yuan e Muntean (2014) propõem um esquema inteligente de gerenciamento de largura de banda para serviços VoIP (*iVoIP, intelligent voice over Internet protocol*) que melhora a utilização da largura de banda e fornece acesso justo ao canal de ligação downlink-uplink utilizando de técnica que usa estereótipos e considera vários parâmetros de qualidade de serviço para equilibrar o acesso à rede dos fluxos de downlink e uplink, respectivamente.

Em VoIP o uso de codecs diferentes proporciona diferentes taxas de amostragem e consequentemente diferentes taxas de utilização de bits (*bitrates*) podem reduzir o congestionamento de rede e melhorar a utilização de banda disponível (ADISESHU, 2005). Trabalhos recentes sobre esquemas de controle de fluxo fim a fim adaptativos para aplicações de áudio em tempo real abordam previsão e avaliação de qualidade, utilizando combinação ótima de vários codecs para a transmissão.

A análise do fluxo ativo e congestionamento da rede permite lançar técnicas de atenuação de uso dos recursos, assim, demonstram que é possível obter qualidade (QoS) utilizando menos largura de banda (CHANDRA, 2012). Existem vários codecs padronizados

para aplicações em VoIP. Alguns deles utilizam modulação por pulsos (PCM, *pulse-code modulation*), modulação por código de pulso diferencial (DPCM, *differential pulse-code modulation*), modulação por código de pulso adaptativo delta (ADPCM, *adaptive differential pulse-code modulation*), codificação preditiva linear (LPC, *linear predictive coding*), previsão linear excitada por código (CELP, *code-excited linear prediction*), etc. Estes, produzem diferentes taxas de utilização de recursos e também de qualidade de áudio.

Segundo Bordim (2012), o conceito de voz sobre IP é relativamente simples. Basta transformar a voz em um fluxo de bits que pode ser constante ou variável, dependendo do codec. O fluxo de bits assim obtido é encapsulado em datagramas do protocolo UDP, que por sua vez são encapsuladas em pacotes IP. Os pacotes IP assim obtidos são transportados pela rede, como qualquer pacote de dados, sem distinção.

### **2.2.1 Definição**

O serviço de chamadas de VoIP é, segundo Hartpence (2013), um serviço de voz que opera sobre uma rede IP e que se baseia em comutação de pacotes, diferentemente do Serviço Telefônico Fixo Comutado (STFC), que emprega comutação de circuitos. Nesse cenário deve-se considerar também o conceito de Internet Protocol Multimedia Subsystem (IMS), que é uma arquitetura de controle de serviço global, de acesso independente e de conectividade baseada no padrão IP, que permite vários tipos de serviços multimídia para os usuários finais utilizando protocolos de Internet comuns (POIKSELKA; MAYER, 2013).

Assim, a integração de serviços de voz e dados aumenta a produtividade e a efetividade global, enquanto o desenvolvimento de aplicações integrando voz, dados e multimídia irá criar demandas por novos serviços o que, conseqüentemente, aumentará o consumo de recursos de rede. A habilidade de combinar a mobilidade e a rede IP será crucial para o sucesso destes serviços no futuro (POIKSELKA; MAYER, 2013).

Adicionalmente, com a crescente oferta de serviços, principalmente levando-se em consideração o maior acesso à banda larga móvel disponibilizado pelas operadoras, as comunicações realizadas por telefonia móvel serão cada vez mais comutadas por pacotes através de chamadas VoIP. Conforme dados publicados pelo Relatório Anual de 2018 da ANATEL em Brasil (2019), verificou-se o crescimento das plataformas convergentes e baseadas em redes IP (Internet Protocol) e suas interfaces com o setor regulado. Tal fato reitera a premência pela modernização da atuação regulatória, com destaque à adoção de medidas que permitam o equilíbrio entre os setores regulados e seus novos competidores.

## 2.2.2 Codificação e Decodificação

De acordo com Hartpence (2013), no modelo atual, as conversações de voz e vídeo são capturadas do meio analógico, digitalizadas, transmitidas e convertidas de volta na outra extremidade, para que o receptor possa compreender o conteúdo transmitido. Esse processo é realizado por um codificador/decodificador de voz, denominado codec: acrônimo de codificador/decodificador de voz. Sua utilização pode ser implementada nos meios de telefonia convencionais bem como em infraestruturas de VoIP.

Há várias técnicas utilizadas para tratar estes fluxos de áudio e vídeo. A maioria dos codecs utilizados atualmente são padronizados nas recomendações da ITU-T, embora haja vários outros, esses padrões exigem dos fabricantes a implementação de um conjunto mínimo de ações e formas de compressão de áudio e vídeo.

A maior parte do trabalho realizado pelos codecs é um esforço para reduzir a quantidade de largura de banda ocupada pelos fluxos de voz através do uso de compressão. Aplicações de VoIP requerem o mesmo processo de conversão, embora nem sempre exista à preocupação com largura de banda das topologias de rede tradicionais (HARTPENEC, 2013).

Uma técnica bastante utilizada em telefonia para codificação de áudio é a PCM. Essa técnica, coleta amostras do sinal analógico em instantes uniformes de tempo, obtém a magnitude do sinal nestes instantes e representa esta magnitude de forma binária, conforme pode ser observado na Figura 2.

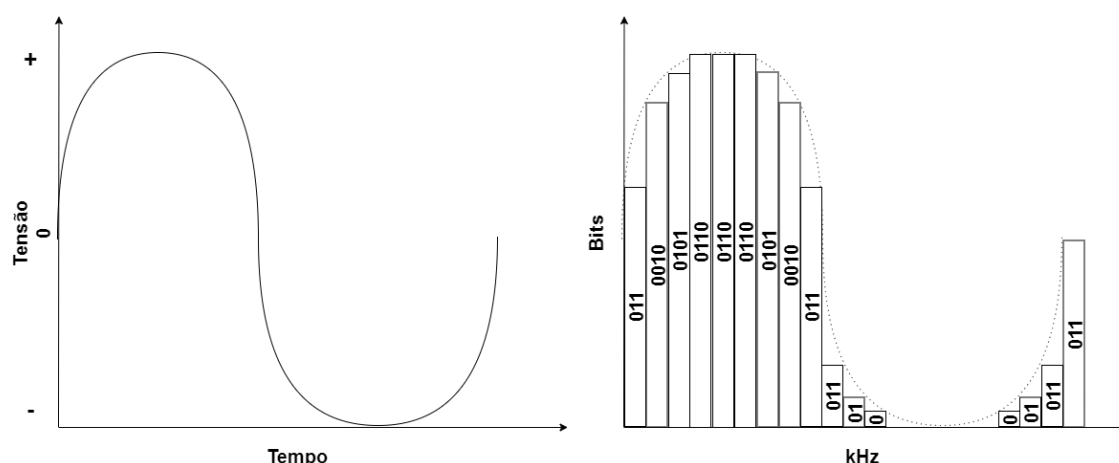


Figura 2 - Pulse Code Modulation (PCM).

As amostras de áudio utilizadas neste trabalho usam os codecs definidos pelas Recomendações ITU-T G.711 (ITU-T, 2000), ITU-T G.726 (ITU-T, 2005), ITU-T G.728 (ITU-T, 2014), ITU-T G.729 (ITU-T, 2017), ITU-T G.723 (ITU-T, 1988) e suas variações. Além

disso também foi utilizado o codec GSM (*Global System for Mobile communications*), frequentemente utilizado em telefonia móvel, sob a recomendação RPE-LTP (ITU-T, 1988).

### 2.2.3 Arquitetura e Protocolos

Do ponto de vista da arquitetura, sistemas VoIP operam de forma diferente do utilizado em STFC, onde são alocados recursos para cada chamada individualmente. Além disso, este sistema já vem sendo utilizado nas últimas duas décadas para entregar chamadas telefônicas confiáveis e de baixo consumo de banda, com alto nível de qualidade (HARTPENCE, 2013).

De outro lado, as redes IP utilizam comutação de pacotes, e cada pacote enviado é semiautônomo, tem seu próprio cabeçalho IP, e é transmitido separadamente pelos roteadores ao longo da rede, aumentando as ocorrências na rede de tráfego de pacotes, além de possibilitar perda de qualidade em outros serviços (HARTPENCE, 2013).

Ainda, de acordo com Hartpence (2013), os aparelhos telefônicos utilizados no sistema VoIP, denominados telefones VoIP, necessitam de dois tipos de protocolos: os de sinalização, responsáveis pelo processo inicial e final da transmissão (protocolo SIP), e os protocolos de transporte (UDP e protocolo de transporte de tempo real (RTP, *real-time transport protocol*), que se encarregam de transmitir os sinais de voz e/ou vídeo e dados. Esses protocolos serão descritos a seguir. A Figura 3 apresenta a arquitetura básica do VoIP.

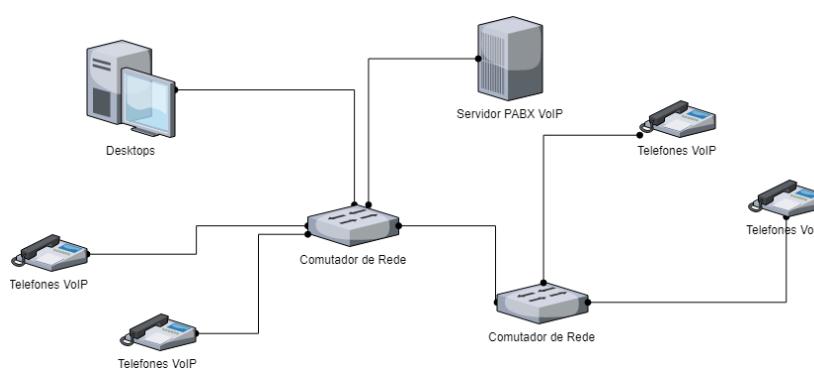


Figura 3 - A arquitetura básica de VoIP.

#### 2.2.3.1 Protocolos de sinalização

Segundo Hartpence (2013), os protocolos de sinalização mais utilizados são o H.323 da família de recomendações da ITU-T, o Skinny, protocolo proprietário da Cisco e o protocolo SIP, sendo este o mais recomendado por não ser proprietário. Além disso, o SIP é mais fácil de utilizar e é suportado por diversos fornecedores da indústria VoIP.

Hartpence (2013) destaca que todos praticamente executam as mesmas funções, sendo o H.323 o mais completo e complexo, por isso, o mais pesado. A principal desvantagem do Skinny, como relatado anteriormente, é justamente seu cunho proprietário, o que cerceia o desenvolvimento por outros fornecedores. Assim, então, o SIP se apresenta como o protocolo de maior relação custo/benefício. Entretanto, Tanenbaum e Wetherall (2010) afirmam que a recomendação H.323 é mais um ajuizamento da arquitetura de telefonia da Internet, isto é, uma especificação do que um protocolo específico. Esse faz referência a um grande número de outros protocolos específicos para codificação de voz, configuração de chamadas, sinalização, transporte de dados e outras áreas, em vez de especificar propriamente cada um desses elementos.

O protocolo SIP opera na camada de aplicação e, além ser utilizado para criar sessões de transmissão de voz, pode ser utilizado para outras sessões de usuário como vídeos, jogos e realidade virtual. Ademais, também foi projetado para configurar e finalizar sessões de mídia, localização do usuário e capacidades, disponibilidade e informação de manipulação de sessão (HARTPENGE, 2013).

Segundo Tanenbaum e Wetherall (2010), o protocolo SIP apesar de modular, foi especificamente projetado para interoperar bem com aplicações da Internet existentes, diferentemente do H.323 com todo seu conjunto de protocolos.

Considerando, então, seu modo de operação, quando da conexão entre usuários de VoIP, há um estrutura responsável pelo estabelecimento de algumas regras. Esta tarefa é realizada pelo protocolo SIP e pelo protocolo de descrição de sessão (SDP, *session description protocol*), que também é responsável pela negociação de parâmetros da conexão multimídia (HARTPENGE, 2013). Mas, antes da conexão, estes terminais ou usuários necessitam se encontrar, o que mais uma vez é possibilitado pelo endereçamento do SIP.

Similar ao e-mail, utiliza o identificador uniforme de recursos (URI, *uniform resource identifier*) que é comumente integrado com sistemas de nomes de domínio (DNS, *domain name system*) com sinalização da porta de conexão que, quando omitida, utiliza a porta 5060 por padrão (HARTPENGE, 2013). Alguns os exemplos podem ser observados a seguir.

- sip:usuario@dominio:porta
- sip:usuario@host:porta
- sip:<numero do telefone>@dominio

### 2.2.3.2 Protocolos de transporte

O protocolo de datagramas do usuário (UDP, *user datagram protocol*) é o principal protocolo de transporte utilizado neste processo. Segundo Tanenbaum e Wetherall (2010), o UDP e o protocolo de controle de transmissão (TCP, *transmission control protocol*) são os dois principais protocolos da Internet para a camada de transporte.

O UDP, protocolo de transporte sem conexão, oferece meios para aplicações enviarem datagramas IP encapsulados sem que seja necessário estabelecer conexões (TANENBAUM; WETHERALL, 2010).

Ainda, Tanenbaum e Wetherall (2010), o UDP transmite segmentos que consistem em um cabeçalho de 8 bytes, seguido pela carga útil. Assim, o principal valor de se ter o UDP em relação ao uso do IP bruto é a adição das portas de origem e destino. Sem os campos de portas, a camada de transporte não saberia o que fazer com o pacote. Com eles, a camada entrega segmentos corretamente. Sua representação gráfica pode ser observada na Figura 4.

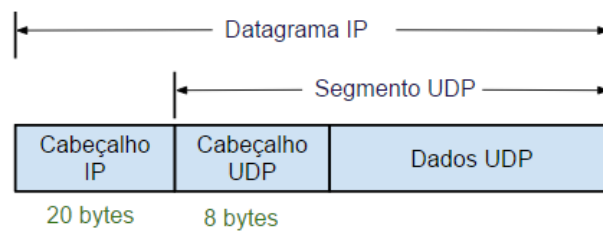


Figura 4 - Segmento UDP encapsulado.  
Fonte: [www.wdredes.blogspot.com](http://www.wdredes.blogspot.com) (2019)

Segundo Tanenbaum e Wetherall (2010), o UDP é especialmente útil em situações que envolvam um ambiente cliente/servidor, o que também abrange aplicações de tempo real. Tal relação parte da premissa de que o cliente envie uma pequena solicitação ao servidor e espera uma pequena resposta de volta. Se a solicitação ou a resposta se perder, o cliente simplesmente atingirá o *timeout* e tentará de novo.

Por outro lado, o TCP é um protocolo confiável e orientado a conexões, que permite a entrega sem erros de um fluxo de bytes originário de uma determinada máquina em qualquer computador da inter-rede (TANENBAUM; WETHERALL, 2010).

Porém esse protocolo não suporta transmissão de voz em tempo real, justamente por sua melhor característica, seu mecanismo de recuperação dos dados perdidos. Em caso de perda de pacotes, a aplicação teria que aguardar a nova recepção dos dados, o que acarretaria atrasos intoleráveis em se tratando de uma comunicação de voz entre usuários. Cabe então ao RTP

transportar dados de voz de um telefone para outro, e todos utilizam-no, conforme afirma Hartpence (2013).

O RTP utiliza-se de outro protocolo, para obter retorno quanto a qualidade e o desempenho do fluxo, chamado de protocolo de controle de tempo real (RTCP, *real-time control protocol*). Este, monitora os recursos para que sejam alocados sob demanda, melhorando, assim, a qualidade da transmissão (HARTPENGE, 2013).

Desta forma, Hartpence (2013) descreve que a fim de diminuir o tempo de entrega dos pacotes, o RTP encapsula os dados de voz e/ou vídeo processados pelo codec e, então, os coloca dentro do pacote RTP que, por sua vez, é colocado dentro de um pacote do UDP. A junção destes cabeçalhos, IP, UDP e RTP, acrescenta-se o conteúdo principal de dados (*payload*) gerado pelo codec, respectivamente 20 bytes, 8 bytes e 12 bytes, totalizando 40 bytes adicionais, conforme a Tabela 1. O receptor deve conhecer o tipo de codec utilizado e ser capaz de decodificar o conteúdo principal de dados contido no pacote RTP recebido.

Tabela 1 - Cabeçalho RTP.

IP	UDP	RTP	Conteúdo principal de dados ( <i>payload</i> )
(20 bytes)	(8 bytes)	(12 bytes)	(tamanho variável – dependente do codec)

Ressalta-se que os principais campos no cabeçalho RTP são o conteúdo principal de dados (*payload*), e o identificador de sequência, utilizado para reordenar os pacotes no receptor e, assim, reconstruir corretamente o sinal transmitido. O uso deste identificador de sequência se faz necessário, uma vez que o UDP não dispõe de função específica para este fim (HARTPENGE, 2013).

#### 2.2.4 Recomendações ITU-T

Os principais artigos produzidos pela ITU-T são suas Recomendações (ITU-T Recs), que definem padrões para que as redes de telecomunicações consigam operar em conjunto. Estas recomendações possuem nível de conformidade, aplicabilidade e qualidade altos devido a característica de seus membros que, geralmente são funcionários das principais empresas de tecnologia da informação e comunicação do mundo.

Existem hoje mais de 4000 recomendações em vigor sobre tópicos de definição de serviços a arquitetura e segurança de rede, de linha digital de assinante (DSL, *digital subscriber line*) de banda larga a sistemas de transmissão óptica, além de definições para as redes de próxima geração (NGN). A grande maioria de todas as recomendações está disponível em formato eletrônico (PDF), gratuitamente para todos.

As recomendações da ITU-T estão disponíveis em seu site em estrutura hierárquica de árvore, oferecendo recursos de pesquisa com vários critérios e navegação cruzada. Cada recomendação da ITU-T é reticulada ao item do programa de trabalho correspondente, processo de aprovação, descrições formais (mais de 1400 disponíveis gratuitamente), sinais de teste (mais de 15 GB de dados disponíveis gratuitamente), suplementos e guias de implementação.

#### 2.2.4.1 Recomendação ITU-TP.800

A Recomendação ITU-T P.800 descreve a metodologia e os processos necessários para conduzir e avaliar a qualidade de transmissão de forma subjetiva. Essas avaliações de equipamentos e sistemas de telecomunicações devem, em princípio, ser conduzidas utilizando-se apenas ouvintes ou métodos conversacionais de testes subjetivos (ITU-T, 1996).

Os métodos descritos nessa recomendação da ITU-T abrangem testes de opinião em conversação, audição, testes baseados em entrevistas e inspeção, entre outros. A semelhança entre eles é que todos se baseiam na opinião de vários indivíduos que, usando a escala de opinião do Quadro 1, fazem sua avaliação.

Quadro 1 - Pontuação MOS (*Mean Opinion Score*)

MOS	Definição	Descrição
5	Excelente	Áudio perfeito.
4	Bom	Áudio natural, como uma chamada telefônica convencional.
3	Razoável	Comunicação possível, mas com certo esforço.
2	Ruim	Baixa qualidade com dificuldade de compreensão.
1	Péssimo	Chamada com áudio picotando.

Fonte: ITU-T P.800 (ITU-T, 1996)

Estas escalas de opinião são muito importantes e devem seguir o padrão estabelecido pela ITU-T. Nestas escalas são avaliados diversos critérios que podem receber pontuação de 1 a 5, considerando que o valor 1 representa o pior caso e o valor 5 representa o melhor caso.

Segundo Nunes (2017), as notas fornecidas pelos participantes do teste são submetidas a cálculo de média aritmética. A esta média é dado o nome de pontuação média de opinião (MOS, *mean opinion score*).

#### 2.2.5 Algoritmos MOS

A avaliação de qualidade de voz pode ser realizada seguindo testes compostos por métodos objetivos, em que o índice MOS é dado por software, ou subjetivos, nos quais há participação de indivíduos no resultado da avaliação.



Como descrito anteriormente, a metodologia subjetiva é baseada em testes de audição. Estes testes são conduzidos em ambiente controlado, onde voluntários realizam procedimentos estabelecidos pelo aplicador do teste. Já o método objetivo se baseia na execução de algoritmos que tentam prever a avaliação dos voluntários quanto a qualidade do sinal de voz (ITU-T, 1996).

Os métodos definidos pelas recomendações ITU-T são divididos em dois tipos: testes não intrusivos e testes intrusivos. Este último necessita de um sinal de referência ao qual é confrontado com o sinal no ponto final, desta forma, é capaz de medir a qualidade e assim realizar a pontuação.

Diante disto, pode-se afirmar que os métodos intrusivos são mais confiáveis e considerados referência para uma avaliação objetiva. Entretanto, a possibilidade de execução em tempo real, da simplicidade de execução e do menor custo envolvido, fazem dos testes não intrusivos mecanismos relevantes de avaliação (ITU-T, 2001).

## **2.3 AHP**

### **2.3.1 Introdução**

É óbvio que integrar outros fatores além dos relacionados à rede é uma etapa fundamental para criar um modelo de avaliação de QoE. Devido à necessidade de estruturar a escolha dos fatores influentes na QoE, é oportuno modelar o problema de pesquisa em um processo que possa dar uma ordem de importância para cada fator de acordo com um objetivo: seu impacto na qualidade da experiência.

Foram criados algoritmos que pudessem auxiliar uma pessoa no processo de decisão com diversos critérios e várias alternativas, criando assim, uma área de pesquisa denominada Auxílio à Tomada de Decisão Multicritério. Os principais algoritmos começaram a surgir na década de 70 (CAPISTRANO, 2009).

Nesse sentido, como um tomador de decisão deve selecionar dentre um determinado conjunto de alternativas (fatores) concorrentes que são avaliados através de vários critérios, propõe-se utilizar a Análise Hierárquica de Processos (AHP), um método de suporte à decisão derivado da teoria da Tomada de Decisão de Multicritérios. O AHP fornece uma solução de multicritérios com um número finito de alternativas a serem classificadas por prioridade.

O AHP é baseado em matrizes recíprocas de decisão, obtidas pelo método de comparações par a par. Leva em consideração os julgamentos de especialistas para derivar

escalas de prioridade (prioridade de peso). O objetivo desse mecanismo de apoio à decisão é alcançar a alternativa apropriada dentre uma variedade de alternativas, a fim de resolver um problema de decisão.

Essa abordagem é utilizada neste trabalho para resolver o problema da escolha dos codecs apropriados, envolvendo dados qualitativos e quantitativos aplicada em várias configurações da tomada de decisão. Antes de modelar essa abordagem sobre o problema da pesquisa, a seguir serão revisados os procedimentos do AHP, fundamental para este trabalho.

Este método consiste em particionar o problema, modelar de forma hierárquica, julgar os critérios através de comparações, calcular os pesos de todos os elementos e obter uma conclusão a partir dos resultados.

### **2.3.2 Processo de Análise Hierárquica (AHP)**

O Processo de Análise Hierárquica (AHP) foi desenvolvido por Thomas Lorie Saaty no início da década de 70, quando atuava no Departamento de Defesa dos Estados Unidos e na Universidade da Pensilvânia. Obteve sucesso logo na sua primeira aplicação prática, realizada no uso racional de energia nas indústrias e favoreceu o surgimento de diversas extensões tais como o Método AHP Multiplicativo, o Método AHP Referenciado e o Método AHP BG, assim como diversas aplicações em outras áreas (GOMES et al, 2004).

A concepção principal do método criado por Saaty é de utilizar o que representa, a princípio, a “forma natural de funcionamento da mente humana” (SAATY, 1991). A mente humana quando confrontar-se com problemas complexos, tende a particioná-los em subproblemas, que podem ser tratados de maneira mais fácil.

Os subproblemas são geralmente colocados em grupos de acordo com suas características comuns. Ademais, existe uma relação de hierarquia da solução que não é assumida de uma só vez, mas em etapas. Desta forma, as decisões parciais são agregadas e passadas a níveis hierárquicos superiores, até sua conclusão (Capistrano, 2009).

Saaty (1991) afirma que o processo decisório está ligado diretamente a hierarquização do problema, satisfazendo a cada avaliação das alternativas, objetivos pretendidos. A escolha das alternativas que melhor satisfazem o objetivo é o problema a definir. Além disso, há necessidade de obtenção de pesos significativos para que haja a correta distribuição dos recursos.

### 2.3.3 Elementos fundamentais

O Método AHP, após a divisão do problema em níveis hierárquicos, determina, por meio da síntese dos valores dos agentes de decisão, uma medida global para cada uma das alternativas, priorizando-as ou classificando-as ao final do método. Os elementos fundamentais do método AHP são:

- **Atributos e propriedades:** um conjunto de alternativas é comparado em relação a um conjunto de propriedades (critérios).
- **Correlação Binária:** quando dois elementos são comparados baseados em uma propriedade, realiza-se uma comparação binária, na qual um elemento é preferível ou indiferente ao outro.
- **Escala Fundamental:** a cada elemento associa-se um valor de prioridade sobre outros elementos em uma escala numérica.
- **Hierarquia:** conjunto de elementos ordenados por ordem de preferência e homogêneos em seus respectivos níveis hierárquicos.

Como dito anteriormente, os critérios de escolha são os itens de julgamento e que devem criar a base do ordenamento final. As alternativas são as possíveis soluções que estão em julgamento. O estudo do processo utilizado pelo método AHP pode ser dividido em quatro etapas descritas a seguir.

#### 2.3.3.1 Modelagem hierárquica

Segundo Youssef et al. (2016), tomar uma decisão de maneira organizada para gerar prioridades; precisamos estruturar a decisão hierarquicamente a partir do objetivo da decisão em que declaramos o objetivo, por meio do nível intermediário em que definimos os critérios para o nível mais baixo com o leque de alternativas conforme pode ser observado na Figura 5.

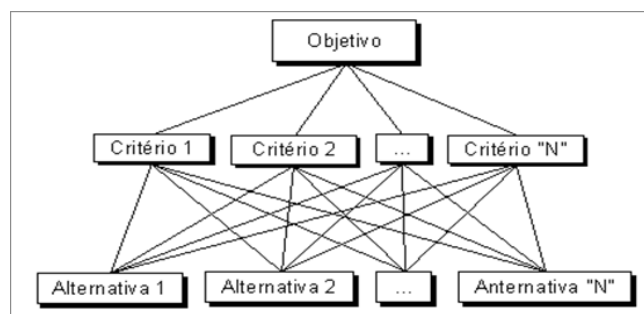


Figura 5 - Exemplo de estrutura hierárquica de problemas de decisão.  
Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

### 2.3.3.2 Julgamento dos elementos.

O AHP pode mostrar a importância dos critérios definidos em relação ao seu impacto na decisão. Uma vez que informações diferentes (critérios e alternativas) foram definidas, a importância relativa dos critérios deve ser determinada. Portanto, os critérios qualitativos e quantitativos serão comparados em pares, usando julgamentos para determinar a classificação final. Os especialistas podem classificar a comparação para cada critério como igual, pouco melhor, muito melhor, bastante melhor e extremamente melhor ou ainda pouco pior, muito pior, bastante pior e extremamente pior, depois esses julgamentos, são convertidos em números quantitativos (YOUSSEF et al., 2016). O Quadro 2 mostra a escala fundamental de classificação que corresponde a um conjunto de números que indica quantas vezes um critério é dominante sobre outro.

Quadro 2 - Escala Fundamental de Saaty

Escala	Avaliação	Recíproco	Comentários
Igual importância	1	1	Os dois critérios contribuem igualmente para os objetivos.
Importância moderada	3	1/3	A experiência e o julgamento favorecem um critério levemente sobre o outro.
Mais importante	5	1/5	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente sobre o outro.
Muito importante	7	1/7	Um critério é fortemente favorecido em relação a outro e pode ser demonstrado na prática.
Importância Extrema	9	1/9	Um critério é favorecido em relação a outro com mais alto grau de certeza
Valores intermediários	2,4,6 e 8		Quando se procura condições de compromisso entre duas definições. Quanto dois elementos estão próximos, a adição de decimais pode ser apropriada.

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

### 2.3.3.3 Cálculo dos pesos de todos os elementos

Depois de obter uma classificação de prioridades de uma matriz em pares, Saaty (1991) propõe uma solução para determinar a importância relativa dos critérios usando auto vetores. Obtendo assim os pesos dos critérios (Tabela 2). Na próxima etapa, as alternativas que representam as diferentes opções de ação disponíveis para o tomador de decisão precisam ser analisadas e priorizadas no que diz respeito ao critério múltiplo ao qual os problemas estão associados.

Tabela 2 - Exemplo de comparação par a par dos critérios

	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Pesos
Critério 1	1	1/7	1/3	0,0810
Critério 2	7	1	5	0,7306
Critério 3	3	1/5	1	0,1884

Os resultados das comparações são apresentados na seguinte forma matricial (Eq. 2.4), devendo atender as condições que seguem:  $a_{ij} = \alpha$ ;  $a_{ji} = 1/\alpha$ ;  $a_{ii} = 1$ . Em que  $\alpha$  consiste da comparação paritária entre os critérios e  $\alpha$  o valor de intensidade de importância.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Segundo Abreu et al. (2016), estes artifícios resultaram na ordenação e mensuração da importância dos critérios e, caso eles exijam subcritérios para sua descrição, todo o processo descrito repetir-se-á também no próximo nível hierárquico.

#### 2.3.3.4 Análise dos resultados

A última parte do processo do método AHP, chamada síntese, envolve obter a prioridade final das alternativas. O método de soma ponderada é usado para calcular a utilidade de cada alternativa em todos os critérios (Eq. 2.5). Precisa-se, portanto, multiplicar as classificações de cada alternativa pela prioridade de seu critério. Este produto é somado a todos os critérios da alternativa específica para gerar a classificação da alternativa.

$$V(a) = \sum_{j=1}^n p_j v_j(a) \quad (2.5)$$

com  $\sum_{j=1}^n p_j = 1$  e  $0 < p_j < 1$  ( $j = 1, \dots, n$ ), onde:

$V(a)$  - valor global da alternativa analisada

$p_j$  - importância relativa do critério  $j$

$v_j$  - nível de preferência da alternativa analisada no critério  $j$

Segundo Capistrano (2009), durante o processo deve-se atentar e garantir a homogeneidade dos níveis de decisão e a não-redundância dos critérios. A homogeneidade dos níveis de decisão trata do fato de se manter no mesmo nível de decisão dos critérios com o

mesmo grau de decisão. Nota-se que cada critério poderá ter quantidades de níveis decisórios inferiores diferentes.

Já a não-redundância dos critérios está ligada à construção da árvore de hierarquização desenvolvida (CAPISTRANO, 2009). Ela deve garantir a independência de um nível superior em relação aos seus níveis inferiores. Pode-se obter isto com uma construção de árvore onde os níveis inferiores só se relacionam com um único nível superior.

### 2.3.4 Análise de Inconsistência

Saaty (1991) executou seus experimentos com o método AHP em Matrizes de Decisão Consistentes, isto é, matrizes que possuem as propriedades de:

- a) **Reflexividade:** todos os elementos da diagonal principal são unitários. Isso ocorre já que esses elementos representam comparações de um item com ele mesmo, que por definição são iguais.
- b) **Reciprocidade:** deve-se preencher apenas metade da matriz, normalmente a metade superior, acima da diagonal principal. A outra metade poderá ser calculada como o recíproco do respectivo elemento superior.
- c) **Transitividade:** existe uma relação de dependência entre os elementos da matriz.

Entretanto, Saaty também buscou estudar o comportamento de seu método quando o mesmo é aplicado a Matrizes de Decisão Inconsistentes, isto é, que não apresentam as propriedades descritas anteriormente.

Para se chegar a um índice de consistência da matriz de decisão, utiliza-se o autovalor dominante  $\lambda_{max}$ . Saaty (1991) demonstrou que para matrizes consistentes tem-se  $\lambda_{max}=n$ . Assim, o desvio em relação a este valor é uma medida da inconsistência da matriz de decisão. A partir desta interpretação foi denominado o Índice de Consistência de acordo com a Eq. (2.6).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.6)$$

Onde:

$IC$  – Índice de Consistência;

$n$  – Dimensão da Matriz de Decisão;

$\lambda_{max}$  – Valor do autovalor dominante;

Os métodos de autovalores utilizam o conceito de autovalor dominante, ou seja, determina-se o maior autovalor da matriz de decisão. O autovetor associado ao autovalor dominante será o vetor de pesos.

A partir do Índice de Consistência devem-se procurar agora seus limites aceitáveis. Uma maneira de fazer isso é compará-lo ao Índice de Consistência Aleatória (ICA), ou seja, o índice de consistência obtido por uma matriz de decisão preenchida de forma totalmente aleatória.

Através de simulação de várias matrizes de decisão de dimensão  $n$ , com valores na escala de 1 a 9, recíprocas e reflexivas, mas obviamente não transitivas, Saaty (1991) obteve os seguintes valores típicos de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Índice de Consistência Aleatório

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ICA	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

O Índice de Consistência ( $IC$ ) calculado para a matriz de decisão é comparado com o valor do Índice de Consistência Aleatório ( $ICA$ ) para obter a Razão de Consistência ( $RC$ ), conforme pode observado na Eq. (2.7). Se  $RC$  for menor que 0,1 ( $RC < 10\%$ ), então os julgamentos da matriz de decisão são considerados consistentes, caso contrário, existem alguma inconsistência nos julgamentos e o especialista pode ser solicitado para rever a sua opinião.

$$RC = \frac{IC}{ICA} \quad (2.7)$$

O esquema multicriterial do AHP, realiza uma classificação global das decisões, tanto as objetivas quanto as subjetivas por meio da associação das partes do problema. O comportamento do método, através da divisão de critérios em hierarquias e da relação entre as alternativas, propicia de forma mais clara a compreensão e avaliação do problema.

Esse processo consegue identificar prioridades, dando peso maior ou menor às características modeladas do problema. Ao priorizar as alternativas, evidencia as peculiaridades; apoia os decisores numa melhor percepção da situação apresentada; aponta onde devem ser alocados os recursos para atingir suas metas.

Logo, evidencia-se que o processo iterativo proposto pelo AHP, é de grande valia para tomadores de decisão, principalmente quanto aplicados na resolução de problemas complexos (CAPISTRANO, 2009).

### 3. Metodologia

Este trabalho tem o objetivo de propor um procedimento de seleção de codecs VoIP para aplicações em redes de dados convergentes. Uma rede de dados convergente transporta vários serviços em um mesmo canal de comunicação conforme ilustrado na Figura 6.

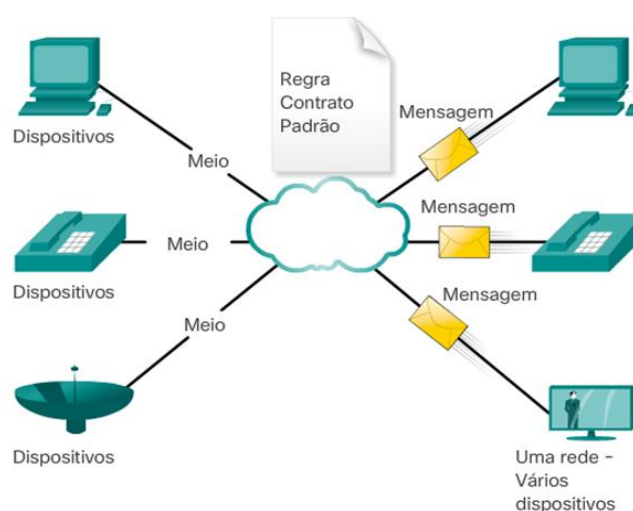


Figura 6 - Redes Convergentes.  
Fonte: NetAcad – Cisco (2019)

A convergência no contexto de redes é um termo usado para descrever o processo de combinar voz, vídeo e comunicações de dados em uma infraestrutura de rede comum. Os avanços tecnológicos proporcionaram a rápida disponibilidade desses recursos para grandes, médias e pequenas empresas

As redes convergentes são capazes de oferecer transmissão em tempo real de voz e vídeo, texto e gráficos entre vários tipos diferentes de dispositivos no mesmo canal de comunicação e estrutura de rede. Em uma rede convergente, ainda existem muitos pontos de contato e muitos dispositivos específicos, como computadores pessoais, telefones, TVs e tablets, mas há uma infraestrutura de rede comum.

Trafegar sinais de voz, vídeo e dados em uma infraestrutura única de comunicações permite que as empresas gerenciem melhor a tecnologia, já que a rede usará um conjunto comum de regras e padrões. Não serão necessários equipamentos de distribuição diferentes para oferecer voz e dados.

Até que as tecnologias amadureçam totalmente, a configuração e o gerenciamento de voz, vídeo e dados fluindo em um canal pode ser um desafio. Dar prioridade a voz sobre os dados que usam tecnologias de qualidade de serviço (QoS) pode ser bastante complexo para



empresas que não tenham uma equipe de Tecnologia da Informação treinada e capacitada à tirar o melhor da rede.

Neste trabalho é proposto um novo procedimento de seleção de codecs, levando em consideração o QoS (baseando-se nos dados obtidos da rede) e QoE (baseando-se na experiência e na priorização dos recursos de rede), que consiste nas etapas descritas a seguir.

### 3.1 Base para modelagem

O estudo foi baseado na rede e equipamentos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - Campus Avançado Três Corações. Por se tratar de uma rede privada, de cunho público federal e, após autorização da autoridade competente, parte desta foi mapeada e reproduzida com apoio do software Riverbed Modeler, na sua versão *Academic Edition*.

Por se tratar da versão acadêmica, esta versão tem limitação de inclusão de até 80 nós (dispositivos de rede) e até 50.000.000 de capturas de log. Diante do exposto, foi necessário mapear somente o bloco administrativo composto de 68 nós, visto que os demais blocos contém quantidades maiores, como por exemplo o bloco pedagógico que possui 130 máquinas, além de uma gama considerável de dispositivos conectados por rede sem fio.

Ademais, apesar de menor, o bloco administrativo conta com mais recursos de convergência como telefonia VoIP, Servidores de Rede, Sistemas de Videoconferência entre outros recursos pertinentes às redes de computadores.

Com intuito de representar situações distintas e assim poder testar a efetividade do modelo de seleção de codecs proposto, foram utilizados os seguintes ambientes e cenários, como pode ser visto na figura 7:

- 62 dispositivos finais de rede (hosts);
- 2 switches;
- 1 roteador;
- 3 servidores de serviços de rede (E-mail, Web, *Streaming*);
- Configurações necessárias para cada ambiente (*Application Definition e Profile Definition*);
- Conexões baseadas em 100Mbit/s (100 BaseT) Ethernet.

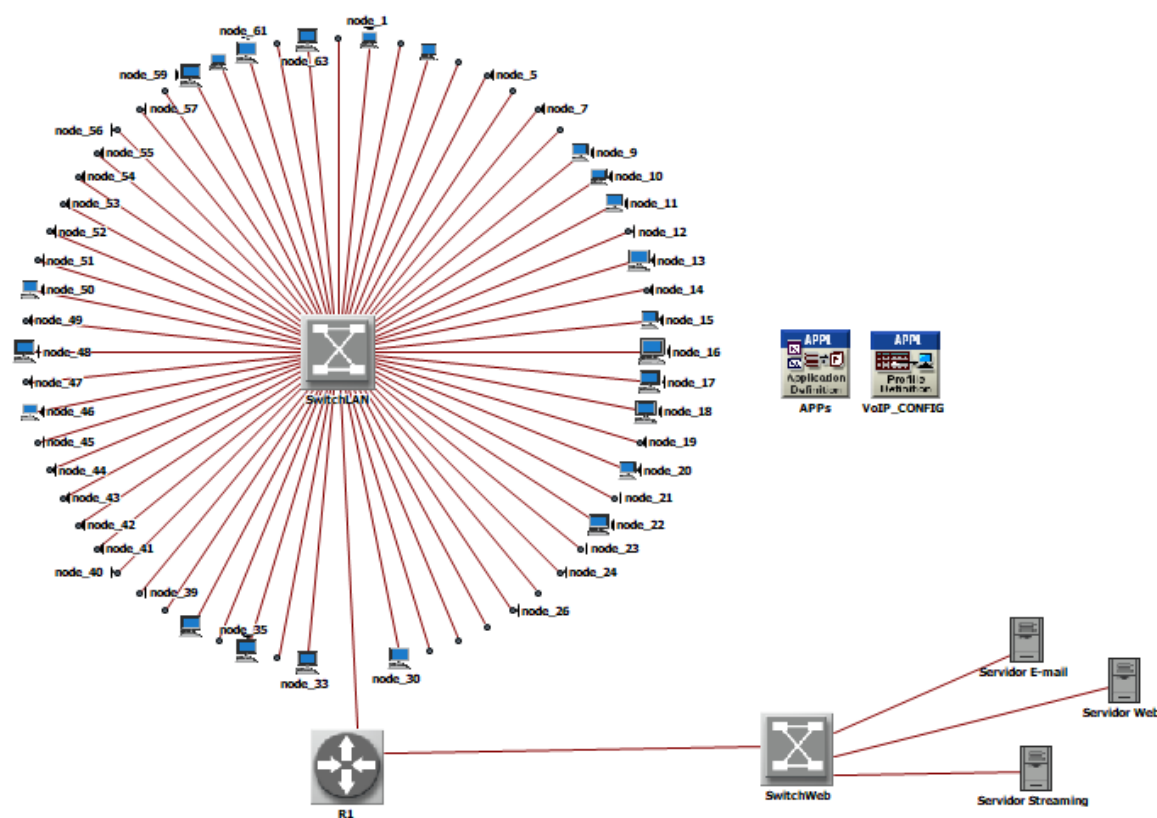


Figura 7 - Modelagem do ambiente.

Os codecs utilizados nos testes foram selecionados de acordo com os utilizados na instituição onde foi baseado o modelo. À seguir na Tabela 4 podemos observar as características destes:

Tabela 4 - Características dos codecs utilizados no modelo.

CODEC	Taxa de Bits (kbps)	MOS	Atraso (ms)
G.711	64,00	4,10	0,75
G.726	32,00	3,85	1,00
G.728	16,00	3,61	4,00
G.723a	5,30	3,65	30,00
G.723m	6,30	3,90	30,00
G.729	8,00	3,27	10,00
GSM	13,20	4,32	20,00

Fonte: Cisco (2019)

### 3.2 Cenários implementados

O Riverbed Modeler permite utilizar algumas predefinições de carga de rede. Diante disso, foram utilizados características de uso moderado e extremo dos recursos de rede para cada codec testado. Foram observadas as mesmas características de tráfego para ambos codecs

a fim de verificar o impacto causado em sua utilização. Nas tabelas 5 e 6 estão as definições utilizadas nos modelos de teste.

Tabela 5 - Cenário 0 - Carga baixa de rede.

CENÁRIO	CODEC	HTTP	E-MAIL	STREAMING
0	G711	Light Browsing	Low Load	Video Browsing
0	G723a	Light Browsing	Low Load	Video Browsing
0	G723m	Light Browsing	Low Load	Video Browsing
0	G726	Light Browsing	Low Load	Video Browsing
0	G728	Light Browsing	Low Load	Video Browsing
0	G729a	Light Browsing	Low Load	Video Browsing
0	GSM	Light Browsing	Low Load	Video Browsing

- Light Browsing: uso leve a moderado de navegação web.
- Low Load: uso leve de recursos de envio/recebimento de e-mails.
- Video Browsing: uso moderado de recursos de *streaming*.

Tabela 6 - Cenário 1 - Carga baixa de rede.

CENÁRIO	CODEC	HTTP	E-MAIL	STREAMING
1	G711	Heavy Browsing	High Load	Video Browsing
1	G723a	Heavy Browsing	High Load	Video Browsing
1	G723m	Heavy Browsing	High Load	Video Browsing
1	G726	Heavy Browsing	High Load	Video Browsing
1	G728	Heavy Browsing	High Load	Video Browsing
1	G729a	Heavy Browsing	High Load	Video Browsing
1	GSM	Heavy Browsing	High Load	Video Browsing

- Heavy Browsing: uso acentuado de navegação web.
- High Browsing: uso acentuado de recursos de envio/recebimento de e-mails.
- Video Browsing: uso moderado de recursos de *streaming*.

Nas definições do software não há implementações de cargas distintas para Streaming de vídeo, por este motivo em todos os testes foi utilizada a carga padrão.

### 3.3 Dados registrados para análise

Foram coletados inúmeros dados dos modelos. Os valores obtidos são médias calculadas a cada 100 eventos capturados, com exceção do MOS que é obtido pelo menor valor calculado pelos eventos. Alguns se demonstraram ineficientes para qualquer tipo de análise devido à reduzida ou inexistente variação entre seus resultados, destacando-se positivamente e/ou negativamente as seguintes métricas:

- **Ethernet Delay:** Estatística que representa o atraso de ponta à ponta contabilizando todos os pacotes recebidos pelas estações.
- **E-mail Download Response Time:** Tempo decorrido entre o envio de solicitação de e-mails e o recebimento de e-mails do servidor de rede. Esse tempo inclui atrasos de sinalização para a configuração da conexão.
- **HTTP Page Response Time:** Tempo decorrido para recuperar a página solicitada com todos os seus objetos embutidos.
- **MOS:** Esta estatística global captura o valor mínimo de MOS coletado na rede.
- **Jitter:** variação estatística do atraso na entrega de dados em uma rede, ou seja, pode ser definida como a medida de variação do atraso entre os pacotes sucessivos de dados.

Em análise prévia dos dados verificou-se que o Jitter era nulo ou irrisório (menor que  $1 \times 10^{-10}$  segundos ou 0,1 nanosegundo) para o desempenho da rede. Este então foi desconsiderado dos dados extraídos para o algoritmo de determinação do melhor codec.

Segundo Tavares, Lobato e Westphall (2004), para valores de latência que aumentam, o valor do jitter tende a ser positivo, porém quando a latência do pacote atual é menor, seu valor é negativo. Várias vezes ocorreram valores nulos para o jitter, evidenciando que a latência de um pacote em relação ao anterior é nula. O jitter nulo é o valor considerado ideal, principalmente para transmissões de dados em tempo real como som e áudio, pois se o jitter nessas transmissões variar demais, a transmissão poderá sofrer atraso (jitter positivo) ou aceleração da transmissão (no caso de repetidos pacotes com jitter negativo). Em casos como esse é melhor ter uma latência total um pouco maior, mas com um jitter nulo, assim a transmissão vai chegar com um pequeno atraso, mas sem travar ou acelerar.

### 3.4 Algoritmo AHP Codec Selection

Para analisar os dados de forma rápida e dar dinamismo à seleção dos codecs foi desenvolvido um algoritmo em linguagem C, visando dispositivos embarcados. Esse algoritmo atua na análise da rede (QoS) e da experiência do usuário (QoE). Assim, parte dos dados podem ser coletados da rede e para um ajuste fino o administrador do sistema pode pontuar ou seja, colocar pesos para os critérios que considerar mais relevantes.

Como os dados analisados são oriundos do simulador, o algoritmo AHP Codec Selection atua em quatro fases:

1. Carrega os dados obtidos na rede;

2. Gera matrizes de decisão;
3. Solicita o ajuste dos pesos ao usuário;
4. Apresenta os codecs em ordem ótima de execução (de acordo com as definições do usuário e da análise da rede).

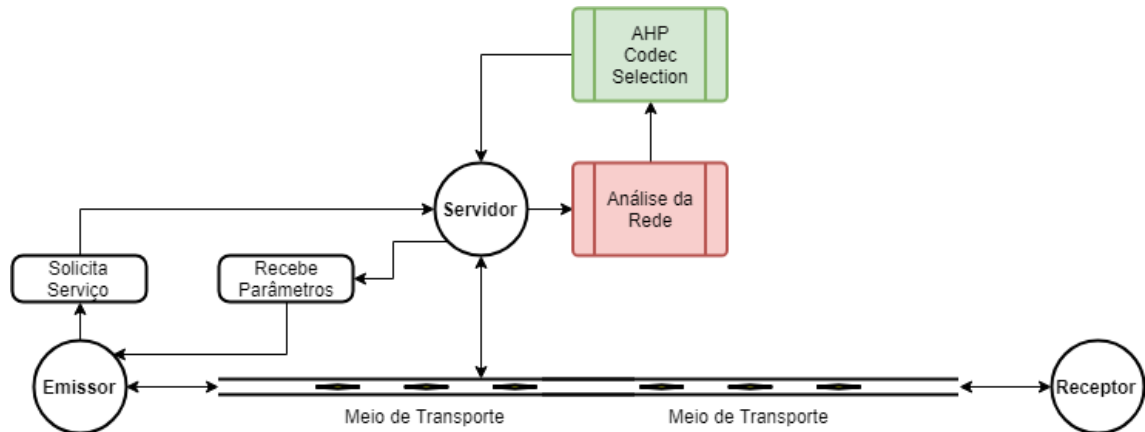


Figura 8 - Processo de obtenção do codec pelo emissor.

De forma a melhor exemplificar o local de atuação do algoritmo, podemos observar a Figura 8 com a representação gráfica do posicionamento do algoritmo no sistema proposto. Isto implica que o emissor, antes de iniciar a ligação com o receptor, requisite ao servidor a lista de codecs na melhor ordem para aquele momento específico, conforme pode ser visto na Figura 9.

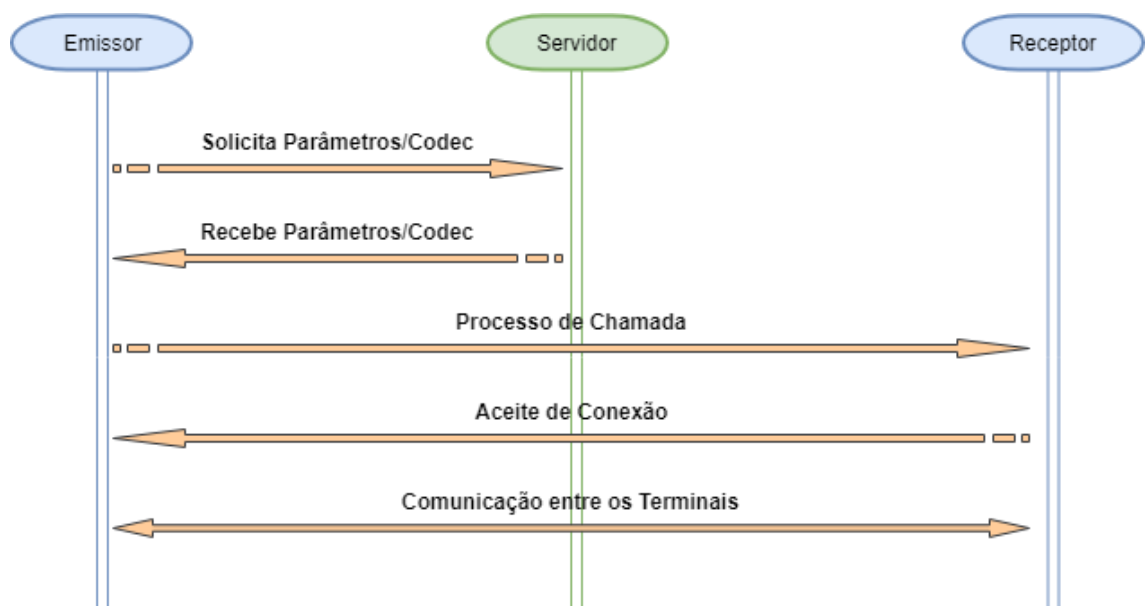
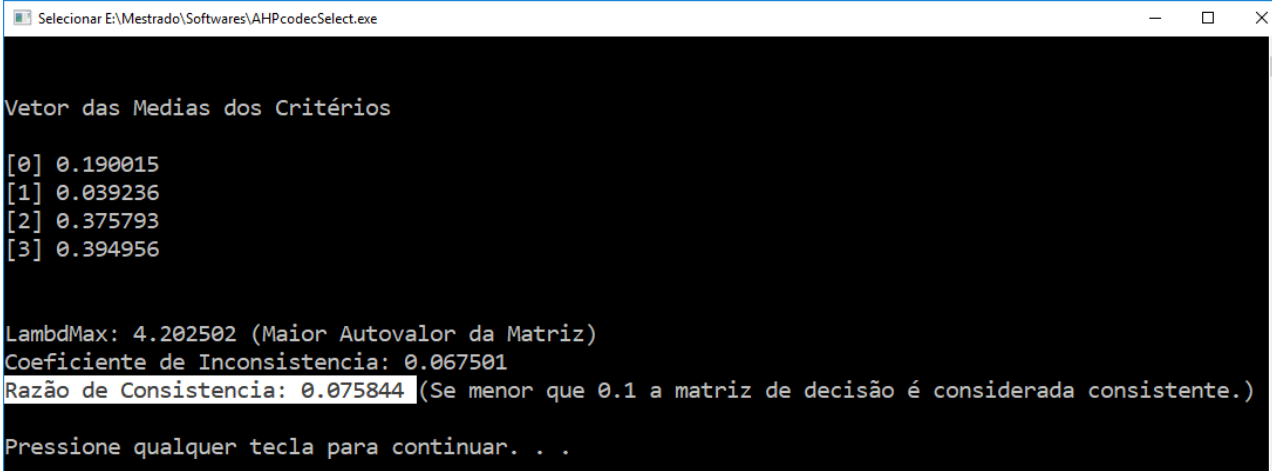


Figura 9 - Processo de Comunicação.

Os pesos de priorização dos recursos atribuídos pelo administrador da rede devem seguir a tabela fundamental de Saaty, todavia, podem conter inconsistências e assim após as definições é calculado o índice de consistência (IC) para a matriz de decisão, Comparando com o Índice Consistência Aleatória (ICA), para matrizes de ordem 1 à 10, com o IC obtendo-se à Razão de Consistência (RC), de forma que  $RC = IC/ICA$ . Se RC for menor 0,1 então os julgamentos da matriz de decisão são considerados consistentes, caso contrário, existe alguma inconsistência nos julgamentos e o especialista deve rever sua opinião (vide Figura 10).



```
Selecionar E:\Mestrado\Softwares\AHPcodecSelect.exe
Vetor das Medias dos Critérios
[0] 0.190015
[1] 0.039236
[2] 0.375793
[3] 0.394956

LambdMax: 4.202502 (Maior Autovalor da Matriz)
Coeficiente de Inconsistencia: 0.067501
Razão de Consistencia: 0.075844 (Se menor que 0.1 a matriz de decisão é considerada consistente.)
Pressione qualquer tecla para continuar. . .
```

Figura 10 - Saída do algoritmo AHP Codec Selection.

No processo de chamadas de VoIP, o dispositivo emissor envia ao dispositivo receptor uma lista dos codecs que possui. Essa lista é fixada pelo técnico durante a instalação do equipamento. Principalmente e geralmente por levar em consideração somente à métrica MOS para ordenação dos codecs, quase nunca é alterada. O receptor respeita esta lista e responde ao emissor com o primeiro codec que encontrar em sua base que respeite à ordem do emissor. Esta informação pode ser vista na Figura 11 que demonstra a captura do processo de requisição de **conexão** entre dois dispositivos de VoIP.

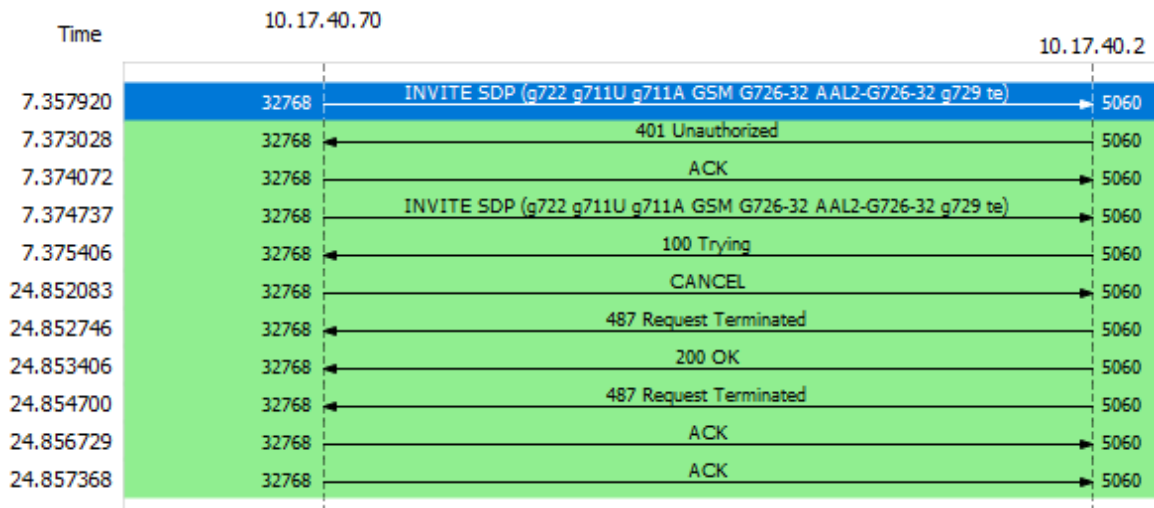


Figura 11 - Captura de processo de requisição de conexão VoIP.

Deste modo, o algoritmo terá a função de calcular e propor a melhor ordem de uso dos codecs para o emissor, conforme pode ser visto na Figura 12, dinamizando e otimizando os recursos de rede baseado nas métricas de qualidade estabelecidas previamente pelo administrador da rede de dados. A priorização de recursos poderá ser customizada de acordo com os aspectos de cada rede ou em favorecimento à algum serviço.

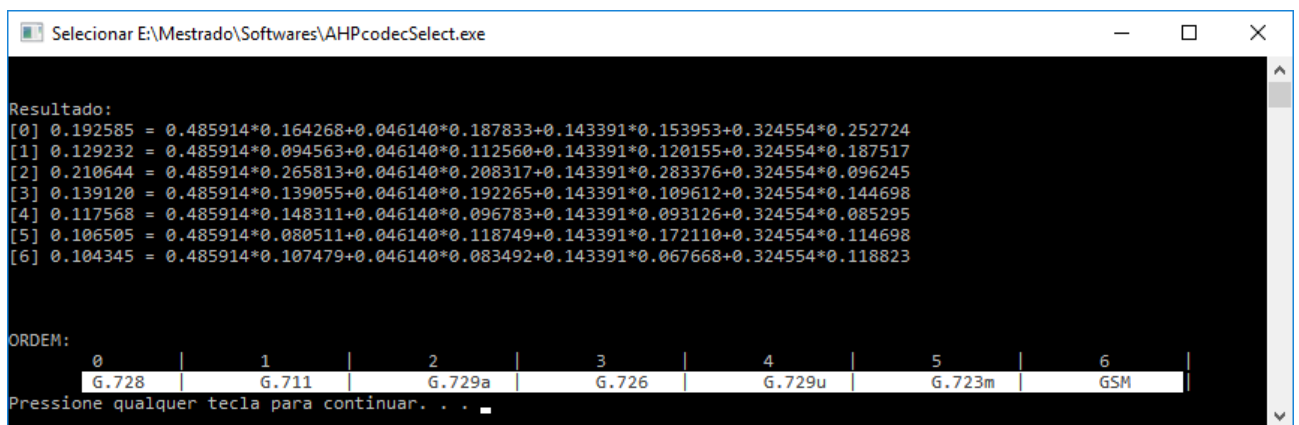


Figura 12 - Saída do algoritmo AHP Codec Selection.

### 3.5 Aplicação da metodologia AHP ao problema

O AHP permite ao tomador de decisão determinar valores de pesos relativos, para distintas alternativas e também pautar os critérios entre si de modo bem intuitivo. A inovação desta técnica é o emprego de comparações par a par, o que resolve o problema de quantificar alternativas isoladamente. Comparando-se dois a dois, torna-se fácil identificar a opção que melhor nos atende (CAPISTRANO, 2009).

A escolha dos codecs por si só poderia ser obtida utilizando o AHP, entretanto, o especialista teria como apoio somente as métricas descritas nas recomendações ITU-T de cada codec ou seu conhecimento técnico prévio. A fim de avaliar e comparar os resultados com o algoritmo AHP Codec Selection, o método convencional do AHP foi utilizado pelo especialista, sem levar em consideração os dados de outros serviços de rede influenciados pelos codecs.

O objetivo será escolher a melhor ordenação dos codecs para posterior emprego no serviço de telefonia VoIP. A seguir são exibidos as avaliações realizadas pelo especialista e as demais etapas envolvidas no processo. A Tabela 7 contém um compilado das métricas estabelecidas pela ITU-T para cada codec disponível para utilização no local modelado.

Tabela 7 - Características dos codecs utilizados no modelo.

CODEC	Taxa de Bits (kbps)	MOS	Atraso (ms)
<b>G.711</b>	64,00	4,10	0,75
<b>G.726</b>	32,00	3,85	1,00
<b>G.728</b>	16,00	3,61	4,00
<b>G.723a</b>	5,30	3,65	30,00
<b>G.723m</b>	6,30	3,90	30,00
<b>G.729</b>	8,00	3,27	10,00
<b>GSM</b>	13,20	4,32	20,00

Fonte: Adaptado de ITU-T

Para cada critério, são construídas as matrizes de decisão, formalizando assim a hierarquia do problema. Ao tomador de decisão cabe a função de avaliar par a par obtendo-se uma matriz de decisão quadrada e recíproca. Nessa matriz, o tomador de decisão anotará suas preferências segundo a escala fundamental. As comparações par a par serão realizadas em todos os níveis hierárquicos. A seguir são apresentadas as matrizes de decisão segundo os critérios estabelecidos. As avaliações são realizadas no sentido linha para coluna.



Tabela 8 - Matriz de decisão segundo o critério Taxa de Bits

<b>CRITÉRIO: Taxa de Bits</b>							
	<b>G.711</b>	<b>G.726</b>	<b>G.728</b>	<b>G.729a</b>	<b>GSM</b>	<b>G.723m</b>	<b>G.723a</b>
<b>G.711</b>	1,00	0,20	0,14	0,11	0,11	0,11	0,11
<b>G.726</b>	5,00	1,00	0,20	0,14	0,14	0,11	0,11
<b>G.728</b>	7,00	5,00	1,00	0,20	0,20	0,14	0,14
<b>G.729a</b>	9,00	7,00	5,00	1,00	1,00	0,33	0,33
<b>GSM</b>	9,00	7,00	5,00	1,00	1,00	0,33	0,33
<b>G.723m</b>	9,00	9,00	7,00	3,00	3,00	1,00	1,00
<b>G.723a</b>	9,00	9,00	7,00	3,00	3,00	1,00	1,00
<b>Σ</b>	<b>49,00</b>	<b>38,20</b>	<b>25,34</b>	<b>8,45</b>	<b>8,45</b>	<b>3,03</b>	<b>3,03</b>

Tabela 9 - Matriz de decisão segundo o critério MOS

<b>CRITÉRIO: MOS</b>							
	<b>G.711</b>	<b>G.726</b>	<b>G.728</b>	<b>G.729a</b>	<b>GSM</b>	<b>G.723m</b>	<b>G.723a</b>
<b>G.711</b>	1,00	1,11	1,11	1,25	0,91	1,05	1,11
<b>G.726</b>	0,90	1,00	1,05	1,25	0,83	1,00	1,00
<b>G.728</b>	0,90	0,95	1,00	1,05	0,83	0,91	1,00
<b>G.729a</b>	0,80	0,80	0,95	1,00	0,77	0,87	0,91
<b>GSM</b>	1,10	1,20	1,20	1,30	1,00	1,11	1,25
<b>G.723m</b>	0,95	1,00	1,10	1,15	0,90	1,00	1,05
<b>G.723a</b>	0,90	1,00	1,00	1,10	0,80	0,95	1,00
<b>Σ</b>	<b>6,55</b>	<b>7,06</b>	<b>7,41</b>	<b>8,10</b>	<b>6,04</b>	<b>6,89</b>	<b>7,32</b>

Tabela 10 - Matriz de decisão segundo o critério Atraso

<b>CRITÉRIO: Atraso</b>							
	<b>G.711</b>	<b>G.726</b>	<b>G.728</b>	<b>G.729a</b>	<b>GSM</b>	<b>G.723m</b>	<b>G.723a</b>
<b>G.711</b>	1,00	1,11	1,11	1,25	0,91	1,05	1,11
<b>G.726</b>	0,90	1,00	1,05	1,25	0,83	1,00	1,00
<b>G.728</b>	0,90	0,95	1,00	1,05	0,83	0,91	1,00
<b>G.729a</b>	0,80	0,80	0,95	1,00	0,77	0,87	0,91
<b>GSM</b>	1,10	1,20	1,20	1,30	1,00	1,11	1,25
<b>G.723m</b>	0,95	1,00	1,10	1,15	0,90	1,00	1,05
<b>G.723a</b>	0,90	1,00	1,00	1,10	0,80	0,95	1,00
<b>Σ</b>	<b>6,55</b>	<b>7,06</b>	<b>7,41</b>	<b>8,10</b>	<b>6,04</b>	<b>6,89</b>	<b>7,32</b>

Após a etapa de avaliação, as matrizes são normalizadas (Tabelas 8, 9 e 10), dividindo-se cada elemento da matriz pela soma da coluna a que pertence. Normalizar os valores de cada coluna resultará em uma matriz com colunas de soma igual a 1. Além disso, serão obtidos os vetores de pesos, calculando-se a cada linha de cada critério, a média aritmética. O resultado será um vetor que representa o grau de preferência ou pesos das alternativas para o dado critério (CAPISTRANO, 2019).

Tabela 11 - Normalização da matriz do Critério Taxa de Bits

<b>CRITÉRIO: Taxa de Bits</b>								
	<b>G.711</b>	<b>G.726</b>	<b>G.728</b>	<b>G.729a</b>	<b>GSM</b>	<b>G.723m</b>	<b>G.723a</b>	<b>Média (Pesos)</b>
<b>G.711</b>	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04	0,02
<b>G.726</b>	0,10	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
<b>G.728</b>	0,14	0,13	0,04	0,02	0,02	0,05	0,05	0,06
<b>G.729a</b>	0,18	0,18	0,20	0,12	0,12	0,11	0,11	0,15
<b>GSM</b>	0,18	0,18	0,20	0,12	0,12	0,11	0,11	0,15
<b>G.723m</b>	0,18	0,24	0,28	0,35	0,35	0,33	0,33	0,29
<b>G.723a</b>	0,18	0,24	0,28	0,35	0,35	0,33	0,33	0,29
<b>Σ</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

Tabela 12 - Normalização da matriz do Critério MOS

<b>CRITÉRIO: MOS</b>								
	<b>G.711</b>	<b>G.726</b>	<b>G.728</b>	<b>G.729a</b>	<b>GSM</b>	<b>G.723m</b>	<b>G.723a</b>	<b>Média (Pesos)</b>
<b>G.711</b>	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
<b>G.726</b>	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,15	0,14	0,14
<b>G.728</b>	0,14	0,13	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,13
<b>G.729a</b>	0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12
<b>GSM</b>	0,17	0,17	0,16	0,16	0,17	0,16	0,17	0,17
<b>G.723m</b>	0,15	0,14	0,15	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14
<b>G.723a</b>	0,14	0,14	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14
<b>Σ</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

Tabela 13 - Normalização da matriz do Critério Atraso

<b>CRITÉRIO: Atraso</b>								
	<b>G.711</b>	<b>G.726</b>	<b>G.728</b>	<b>G.729a</b>	<b>GSM</b>	<b>G.723m</b>	<b>G.723a</b>	<b>Média (Pesos)</b>
<b>G.711</b>	0,46	0,54	0,41	0,38	0,34	0,28	0,28	0,38
<b>G.726</b>	0,23	0,27	0,41	0,38	0,34	0,28	0,28	0,31
<b>G.728</b>	0,11	0,07	0,10	0,13	0,19	0,25	0,25	0,16
<b>G.729a</b>	0,05	0,03	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,05
<b>GSM</b>	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,06	0,06	0,04
<b>G.723m</b>	0,05	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
<b>G.723a</b>	0,05	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
<b>Σ</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

Com os vetores encontrados na etapa anterior (Tabelas 11, 12 e 13), constrói-se a matriz de avaliação (Tabela 14). As linhas constituirão as alternativas e as colunas os critérios. A coluna de cada critério é formada pelo vetor de pesos de cada critério, calculado anteriormente.

Tabela 14 - Matriz de avaliação das alternativas

<b>CODEC</b>	<b>Taxa de Bits</b>	<b>MOS</b>	<b>Atraso</b>
<b>G.711</b>	0,02	0,15	0,38
<b>G.726</b>	0,03	0,14	0,31
<b>G.728</b>	0,06	0,13	0,16
<b>G.729a</b>	0,15	0,12	0,05
<b>GSM</b>	0,15	0,17	0,04
<b>G.723m</b>	0,29	0,14	0,03
<b>G.723a</b>	0,29	0,14	0,03

A Tabela 15 representa o peso de cada alternativa quando analisada em relação a cada critério. A partir deste momento o especialista deve estabelecer o peso de cada critério no processo de decisão. As mesmas técnicas de comparações paritárias, normalização e cálculo dos pesos são utilizadas.

Tabela 15 - Matriz de decisão critério x critério

Critério x Critério			
	Taxa de Bits	MOS	Atraso
Taxa de Bits	1,00	0,33	0,20
MOS	3,00	1,00	5,00
Atraso	5,00	0,20	1,00
$\Sigma$	9,00	1,53	6,20

Tabela 16 - Normalização da matriz de decisão dos critérios

Critério x Critério				
	Taxa de Bits	MOS	Atraso	Média (Pesos)
Taxa de Bits	0,11	0,22	0,03	0,12
MOS	0,33	0,65	0,81	0,60
Atraso	0,56	0,13	0,16	0,28
$\Sigma$	1,00	1,00	1,00	1,00

Neste caso específico, verifica-se a tendência de priorização da qualidade da voz, como pode ser observado na Figura 16, que mostra o peso da escolha do especialista quanto aos critérios analisados.

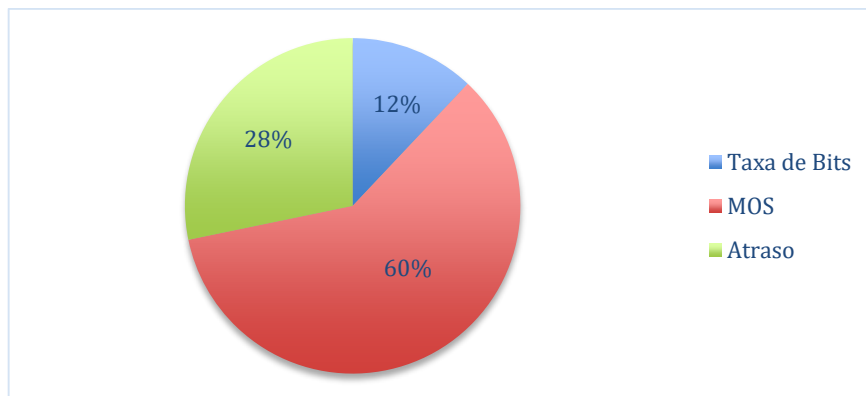


Figura 13 - Tendência dos pesos indicados pelo especialista.

Finalmente, será multiplicada a matriz de avaliação obtida pelo vetor de peso dos critérios obtido (Tabela 16). Tal operação resulta em um vetor que contém a quantificação final ou preferência final de cada alternativa (Tabela 17).

Tabela 17 - Cálculo do resultado final

CODEC	Taxa de Bits	MOS	Atraso		Pesos (Critérios)		Resultado Final
<b>G.711</b>	0,02	0,15	0,38	<b>X</b>	<b>0,12</b>	<b>=</b>	0,202
<b>G.726</b>	0,03	0,14	0,31				0,177
<b>G.728</b>	0,06	0,13	0,16				0,133
<b>G.729a</b>	0,15	0,12	0,05		<b>0,60</b>		0,105
<b>GSM</b>	0,15	0,17	0,04		<b>0,28</b>		0,128
<b>G.723m</b>	0,29	0,14	0,03		0,130		
<b>G.723a</b>	0,29	0,14	0,03		0,125		

Neste exemplo de aplicação do AHP, segundo a percepção do especialista a lista de codecs preferidos seria, em ordem do maior resultado para o menor, G.711, G.726, G.728, G.723m, GSM, G.723a e G.729a. Assim, a prioridade dos codecs para as ligações passaria por esta ordem, segundo as comparações paritárias fornecidas (Figura 14).

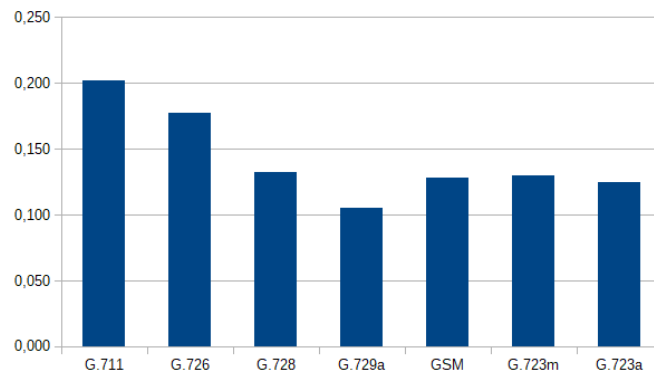


Figura 14 - Resultado da seleção através do método clássico.

Segundo Capistrano (2009) este método obtém um resultado numérico direto e pode ser utilizado em qualquer tomada de decisão, onde o decisor seja capaz de comparar as opções, segundo critérios previamente estabelecidos.

## 4. Resultados e discussões

Os resultados alcançados são provenientes dos experimentos realizados, bem como do desenvolvimento do algoritmo AHP Codec Selection, que deram suporte à realização deste trabalho. A seguir são apresentados os resultados dos experimentos obtidos da rede modelo e posteriormente, à aplicação do algoritmo de seleção para indicação da melhor lista de codecs para cada situação. Ainda, os dados coletados e discutidos sobre os efeitos dos codecs em redes convergentes foram publicados em forma de artigo em revista indexada (SANTOS, SOUZA e PAIVA, 2019).

Pode-se observar pela análise dos dados coletados que o uso de diferentes codecs exercem influências distintas no desempenho das redes de dados convergentes. Aqui serão apresentados comparativos entre os codecs em cenários formulados no ambiente de teste conforme descrito anteriormente no Capítulo 3.

A primeira análise realizada foi em relação ao tempo de resposta para o download de E-mails, isto é, o tempo decorrido entre o envio de solicitação de e-mails e o recebimento de e-mails do servidor de rede. Esse tempo inclui atrasos de sinalização para a configuração da conexão. Para uma melhor qualidade do serviço, quanto menor o tempo de download melhor.

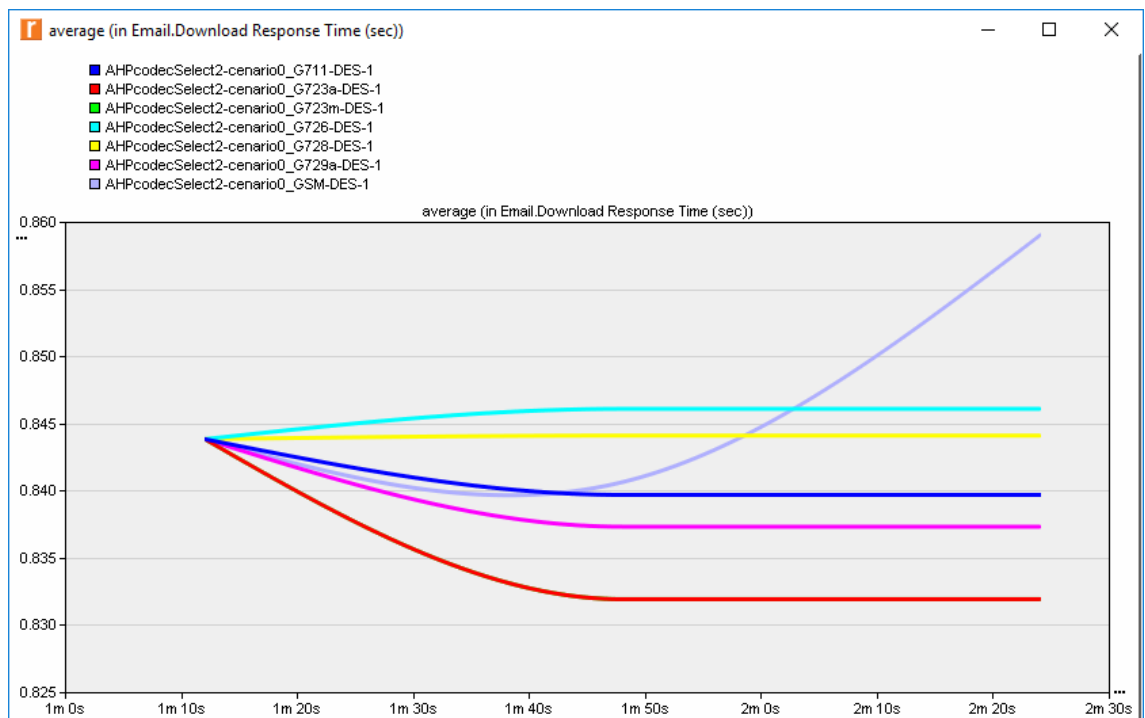


Figura 15 – Cenário 0: Tempo de Resposta E-mail.

Pode-se verificar que no cenário de carga reduzida da rede, com baixo consumo dos recursos, que os codecs G.723a e G.723m (os mais bem pontuados nesta avaliação), após o tempo de estabilização da rede, mantêm um valor contínuo. O mesmo ocorre com os codecs G.729a, G.711, G.728, G.726, mas em escalas distintas. Entretanto, o codec GSM (o pior pontuado nesta avaliação) desenvolve uma tendência de aumento do tempo de resposta superior aos demais, conforme Figura 15.

Se for tomar como base esta análise poderia inferir que a melhor sequência de codecs seria, em ordem do melhor para o pior, [0] G.723a, G.723m, G.729a, G.711, G.728, G.726 e GSM.

Comparando os mesmos codecs com o cenário de carga alta de rede, com efetivo consumo dos recursos, podemos observar a continuidade de tendência de melhor tempo de resposta e pior tempo de resposta para os codecs G.723a e GSM, respectivamente. Todavia, esta análise muda de patamar quando comparada a ordem dos codecs intermediários. Neste cenário há uma ligeira troca na ordem dos codecs. Considerando esta análise, a lista ordenada do melhor para pior codec para o quesito tempo de resposta de e-mail seria [1] G.723a, G.729a, G.711, G.723m, G.726, G.728 e GSM, como pode visto na Figura 16.

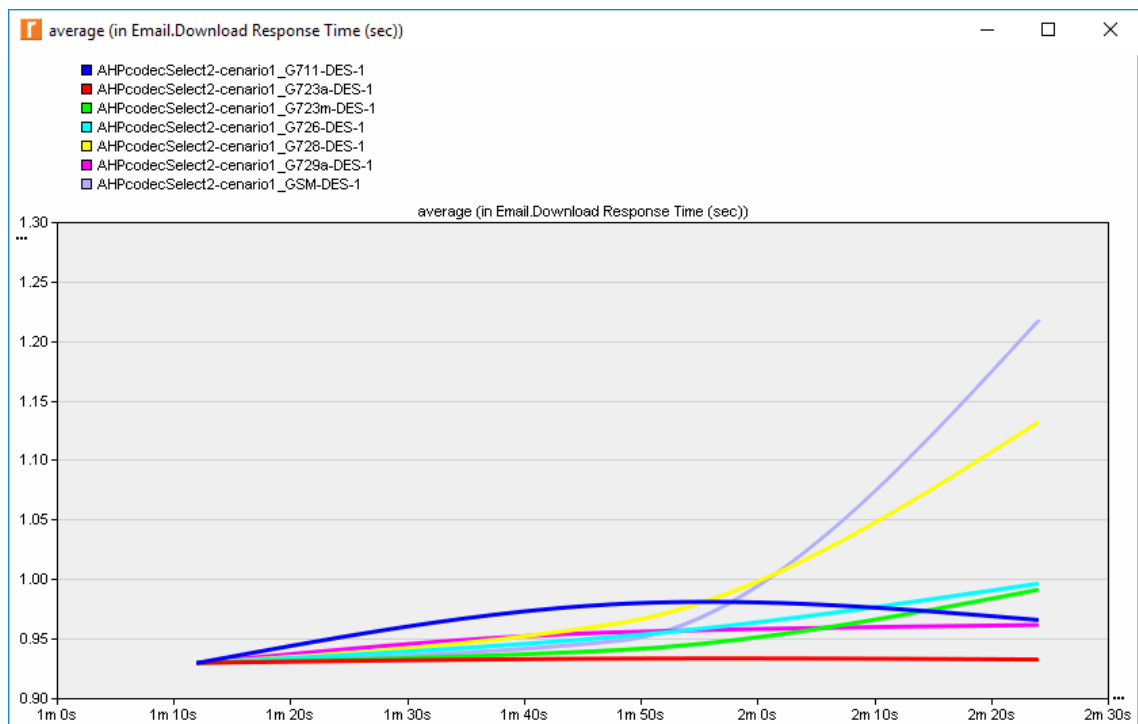


Figura 16 - Cenário 1: Tempo de Resposta E-mail.

A segunda análise foi realizada com os dados do Delay Ethernet (atraso da rede), estatística que representa o atraso de ponta a ponta contabilizando todos os pacotes recebidos

pelas estações. Assim como na análise anterior os mesmos codecs foram utilizados em cenários diferentes e os resultados serão apresentados à seguir. Também, como o anterior, quanto menor o tempo de atraso, melhor para a qualidade do serviço.

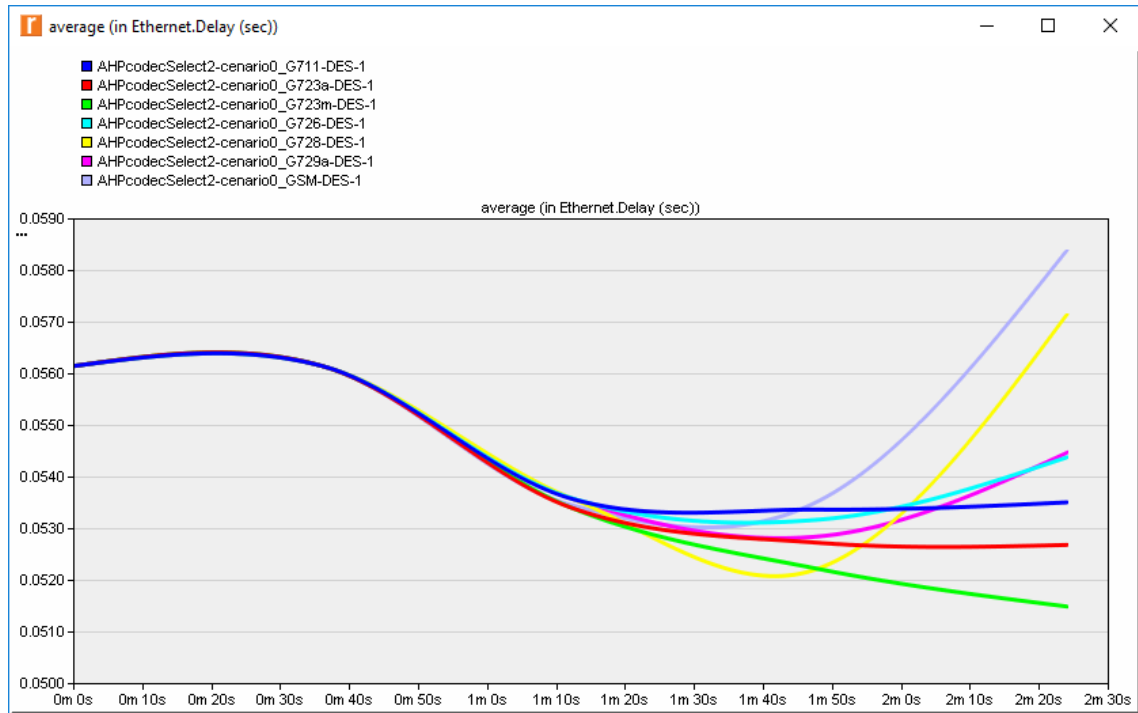


Figura 17 - Cenário 0: Ethernet Delay (atraso).

Comparando os codecs no cenário de carga baixa na rede de dados, Figura 17, pode-se observar uma tendência de aumento do atraso em relação ao tempo decorrido de alguns codecs como o GSM (pior pontuado neste quesito), G.728, G.729a e G.726. Os codecs G.711 e G.723a tendem a manter o atraso em valores constantes no decorrer do tempo, já o codec G.723m (melhor avaliado neste quesito) apresenta uma tendência de diminuição do atraso da rede no decorrer do tempo. Desta forma, para o cenário apresentado, a ordem do melhor para o pior codec seria [2] G.723m, G.723a, G.711, G.726, G.729a, G.728 e GSM.

Com o contexto aplicado ao cenário de carga alta dos recursos de rede, Figura 18, também houve modificações na proposição da ordem dos codecs devido ao desempenho diferente de alguns desses. O codec G.723m melhor avaliado no primeiro cenário, perde lugar para o G.723a. Há também aqui uma variação das tendências vistas no caso anterior, quanto à estabilidade do atraso, com destaque ao G.723a que demonstra indicativo de queda. Assim, de acordo com o desempenho dos codecs neste cenário à ordem do melhor para pior ficaria [3] G.723a, G.726, G.729a, G.711, G.728, G.723m e GSM.

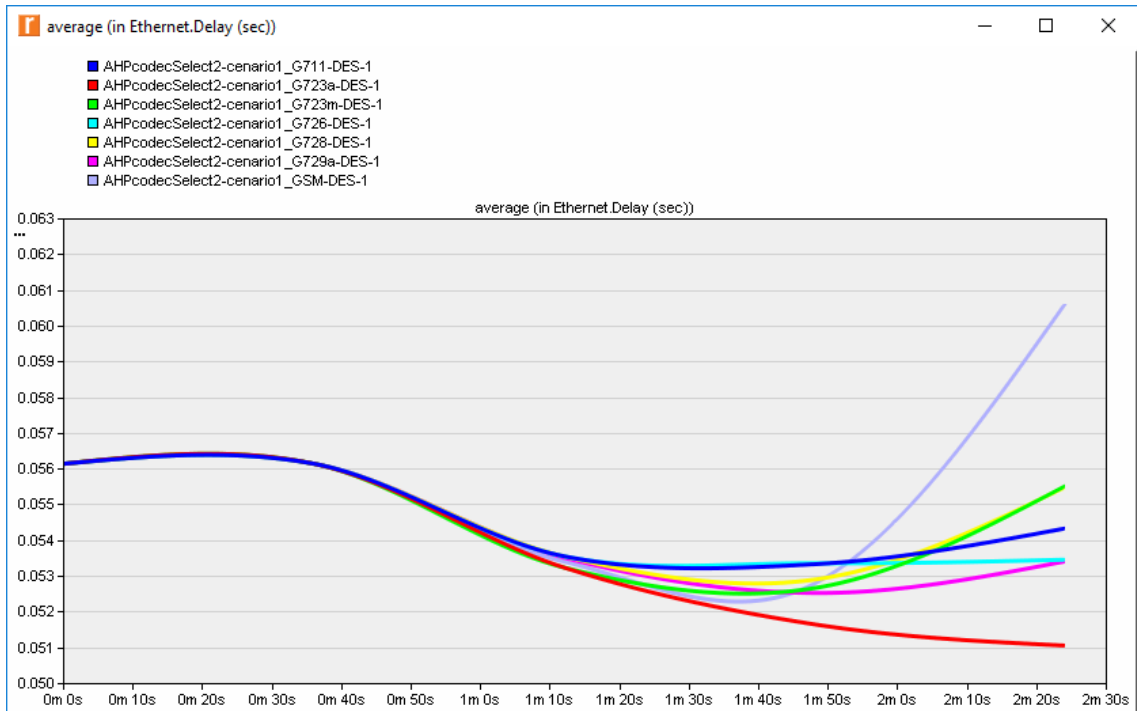


Figura 18 - Cenário 1: Ethernet Delay (atraso).

A terceira análise baseou-se nos dados referentes ao tempo de resposta de páginas web (HTTP Page Response Time), tempo decorrido para recuperar a página solicitada com todos objetos embutidos. Para este parâmetro, quanto maior o tempo, pior é a qualidade do serviço prestado.

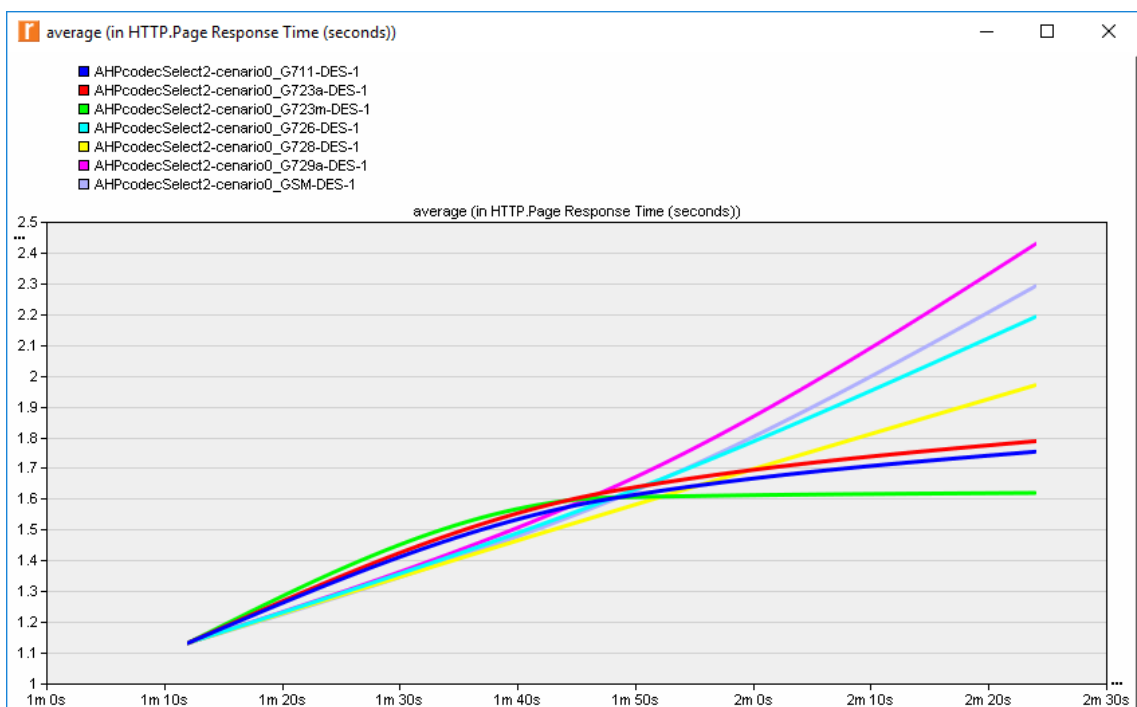


Figura 19 - Cenário 0: Tempo de Resposta HTTP.



Mais uma vez verifica-se que em cenários diferentes os mesmos codecs apresentam comportamentos distintos. Aqui, pela primeira vez, o codec GSM não obteve o pior resultado, ficando este para o codec G.729a (Figura 19). O único codec que não apresenta tendência de crescimento elevado no tempo é o G.723m (melhor colocado). Desta forma a ordem dos codecs, de acordo com seu desempenho, para o cenário de baixa carga da rede seria [4] G.723m, G.711, G.723a, G.728, G.726, GSM e G.729a.

Já para o cenário de carga maior da rede, o codec GSM apresenta uma tendência de crescimento discrepante dos demais codecs, levando-o novamente à última posição na lista. Enquanto isso, o codec G.723m cai de qualidade saindo da primeira para penúltima posição, como visto na Figura 20, [5] G.723a, G.728, G.726, G.711, G.729a, G.723m e GSM.

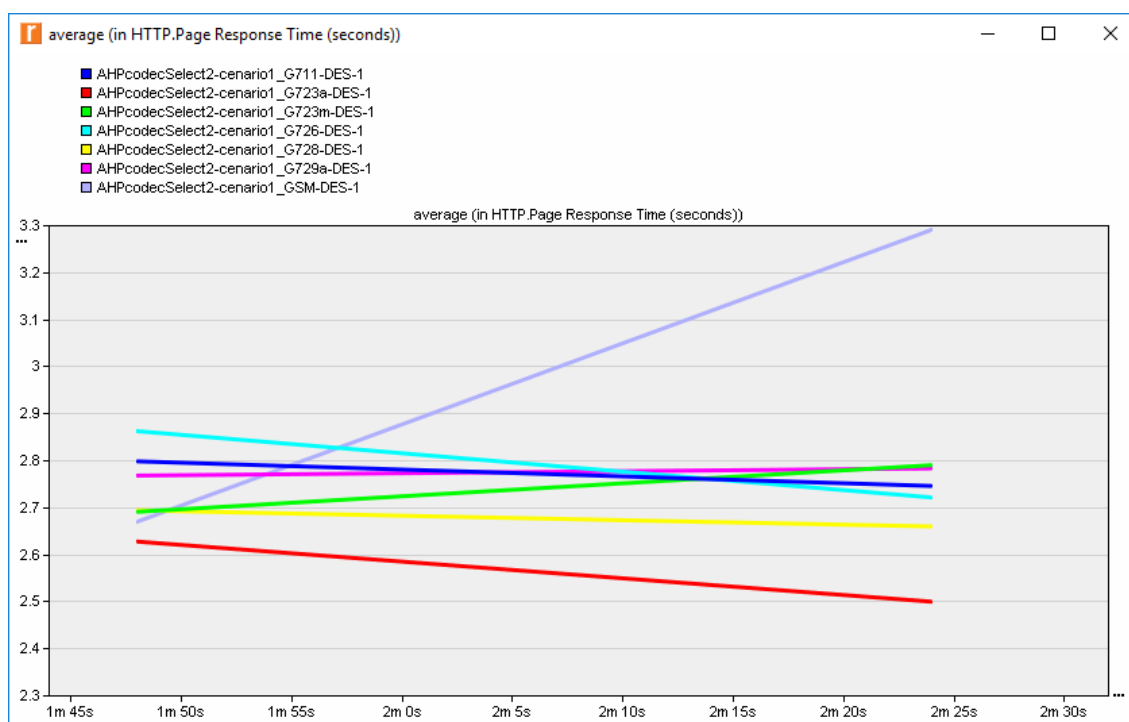


Figura 20 - Cenário 1: Tempo de Resposta HTTP.

A quarta análise foi realizada sobre a qualidade de audição da voz, baseado no cálculo do MOS. Como este cálculo é executado a partir de parâmetros obtidos diretamente dos codecs, como o tamanho do conteúdo principal de dados (*payload*), os valores não se alteram no decorrer do tempo. Isto fica claro ao analisarmos as Figuras 21 e 22 que representam respectivamente os cenários de baixa e alto uso dos recursos de rede. Porém, ainda podemos notar que há diferenças entre os codecs, sendo que para esta métrica, quanto maior o valor obtido pelo cálculo MOS, melhor será o entendimento da comunicação entre os interlocutores em uma ligação.

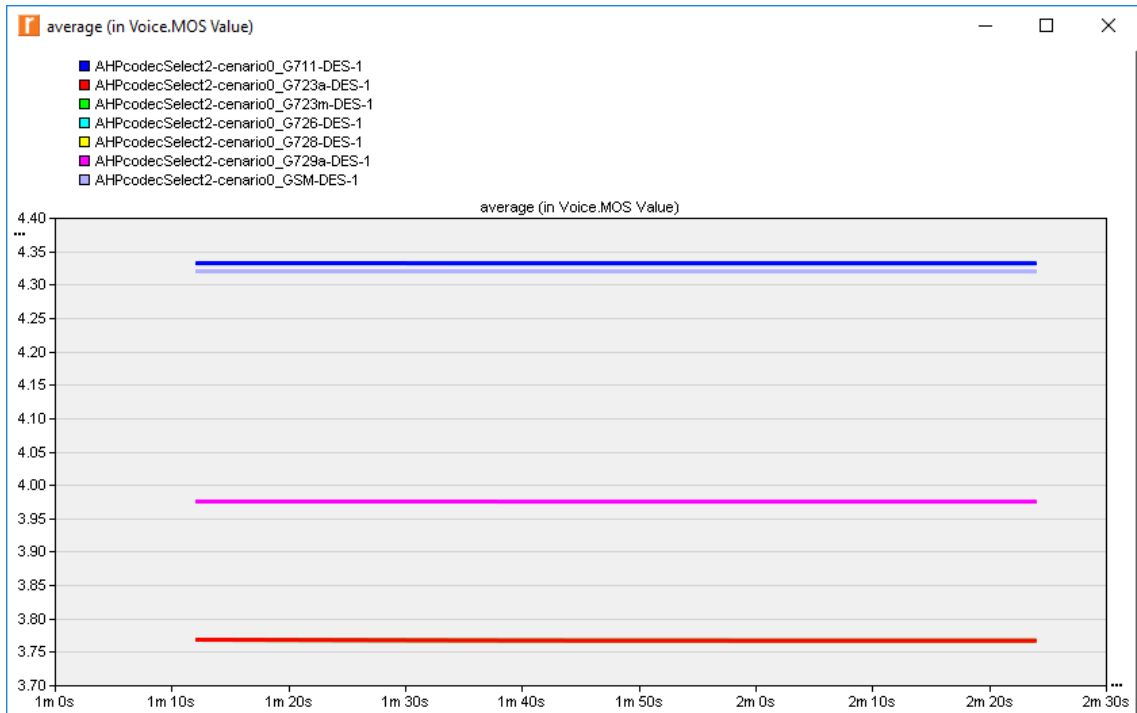


Figura 21 - Cenário 0: MOS.

Pode-se observar que o codec GSM, mal avaliado em outros quesitos, tem um valor de MOS relevantemente melhor do que outros codecs mais bem avaliados. Como alguns resultados foram muito próximos, suas linhas de tendência ficaram sobrepostas nos gráficos. Desta forma, através dos valores discretos colhidos nos testes, vide Tabela 18, podemos inferir que a ordem de execução dos codecs, baseado no MOS seria [6] G.728, G.711, G.726, GSM, G.729a, G.723m e G.723a

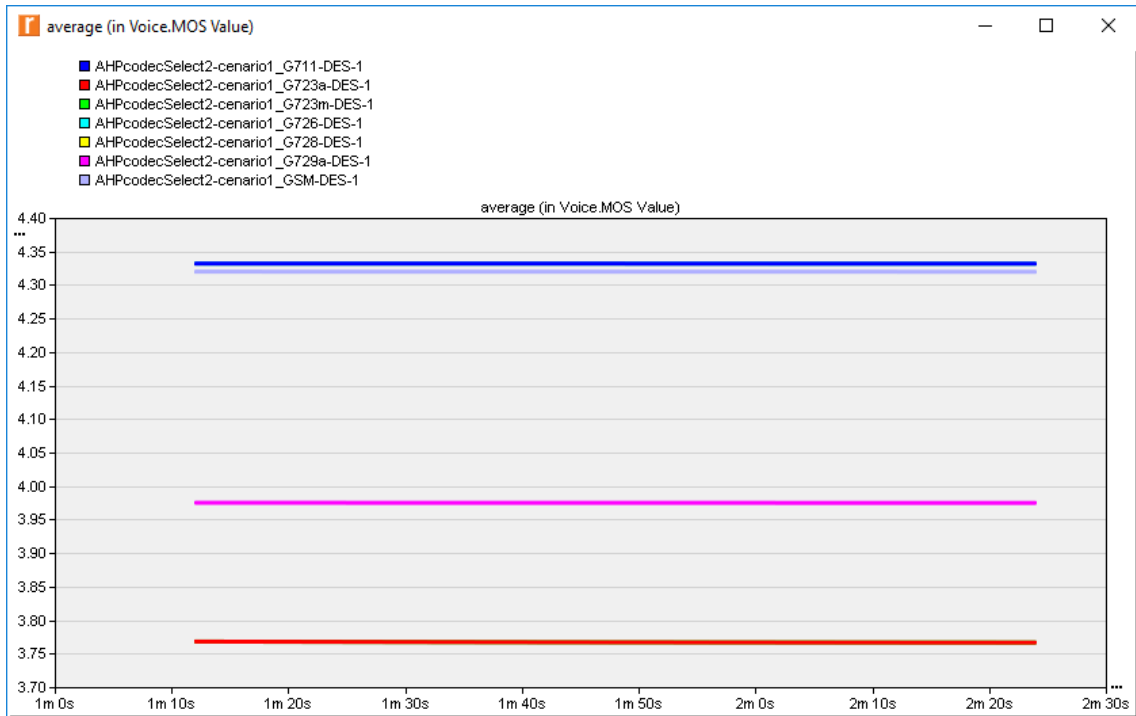


Figura 22 - Cenário 1: MOS.

São expostos na Tabela 18 os dados discretos calculados e coletados durante os testes.

Tabela 18 - MOS em valores discretos.

G.728	G.711	G.726	GSM	G.729a	G.723m	G.723a
4.332822	4.332756	4.332774	4.320647	3.975810	3.767428	3.767338

Através da análise conjunta desses dados pode-se verificar que a escolha dos codecs atuou diretamente na qualidade da rede. Porém, não houve uma constância considerável que justificasse um ou outro. A escolha da melhor solução deve se basear na melhoria de uma métrica em detrimento de outra. Pode-se observar isto na Tabela 19, que traz um resumo das análises.

Tabela 19 - Codecs por ordem de prioridade.

Lista	Sequência	Métrica	Cenário
0	G.723a, G.723m, G.729a, G.711, G.728, G.726 e GSM	E-mail	0
1	G.723a, G.729a, G.711, G.723m, G.726, G.728 e GSM	E-mail	1
2	G.723m, G.723a, G.711, G.726, G.729a, G.728 e GSM	Delay (Atraso)	0
3	G.723a, G.726, G.729a, G.711, G.728, G.723m e GSM	Delay (Atraso)	1
4	G.723m, G.711, G.723a, G.728, G.726, GSM e G.729a	Navegação (HTTP)	0
5	G.723a, G.728, G.726, G.711, G.729a, G.723m e GSM	Navegação (HTTP)	1
6	G.728, G.711, G.726, GSM, G.729a, G.723m e G.723a	MOS	0 e 1

Esta etapa da análise foca então no QoS da rede, utilizando as métricas obtidas para pontuar no algoritmo AHP Codec Selection, de forma automática, para gerar uma matriz de decisão com os pesos de cada codec comparados par a par.

Com intuito de balancear a carga de rede de acordo com a experiência, o administrador da rede de dados opina qual critério deve ser priorizado. Desta forma, o algoritmo calculará e apresentará uma lista de codecs que seja mais equilibrada à dinâmica que ele espera da rede. Para os testes foram utilizados várias características diferentes de balanceamento a fim de comparar os resultados, alguns destes podem ser vistos a seguir.

As notas são lançadas comparando o critério à esquerda com o critério à direita. Assim, notas abaixo de 1 indicam que o primeiro critério é menos importante que segundo e para notas maiores que 1 há indicativo de que o primeiro critério é mais importante que o segundo. À nota exata 1 equivale à igualdade de condições entre os dois critérios avaliados.

### Experimento 1: Cenário 0 (carga baixa da rede)

Tabela 20 - Experimento 1. Cenário 0: Notas do Especialista.

Critério		Critério	Nota do Especialista
E-mail	X	Delay	0,11
HTTP	X	Delay	1,00
HTTP	X	E-mail	7,00
MOS	X	Delay	5,00
MOS	X	E-mail	9,00
MOS	X	HTTP	3,00

- **Razão de Consistência dos critérios:** 0,089525 ou 8,95%.
- **Lista de codecs obtida:** GSM, G.711, G.726, G.723a, G.729a, G.728 e G.723m.

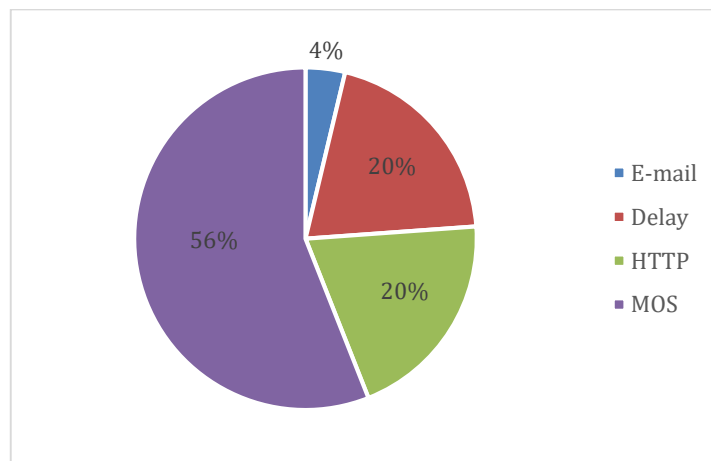


Figura 23 - Vetor de prioridades do especialista: Experimento 1

O vetor de pesos obtidos com as notas do especialista demonstram consistência, sem vícios, pois a RC (Razão de Consistência) calculada ficou abaixo de 10%, além disso, também há a priorização pelo MOS (qualidade do áudio), em contrapartida, fica nítido que, para aquela situação ou momento, o tráfego relacionado a e-mails não tinha relevância. Demonstra também que os ajustes necessários para HTTP (tráfego relacionado à páginas web) e o Delay (atraso geral da rede) tinham pesos e/ou relevâncias equivalentes. Como para os Cenários 0 e 1 foram aplicados as mesmas avaliações do especialista as Figuras 23 e 24 apresentam resultados idênticos.

Como os pesos obtiveram uma Razão de Consistência menor que 10%, foram validados pelo algoritmo que, após avaliar os dados coletados da rede, confrontou suas medições com o vetor de prioridades do especialista e apontou o que seria, para aquela situação, a lista de codecs em ordem de prioridade para atingir o objetivo estabelecido, aplicar a QoS a rede.

### Experimento 2: Cenário 1 (carga alta da rede)

Tabela 21 - Experimento 2. Cenário 1: Notas do Especialista.

Critério		Critério	Nota do Especialista
E-mail	X	Delay	0.11
HTTP	X	Delay	1.00
HTTP	X	E-mail	7.00
MOS	X	Delay	5.00
MOS	X	E-mail	9.00
MOS	X	HTTP	3.00

- **Razão de Consistência dos critérios:** 0,089525 ou 8,95%.
- **Lista de codecs obtida:** G.728, G.723m, G.723a, G.711, G.729a, G.726, GSM

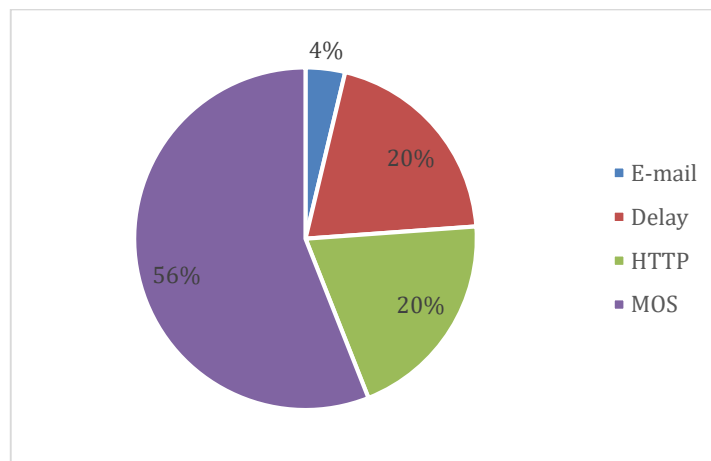


Figura 24 - Vetor de prioridades do especialista: Experimento 2

O experimento 2 aponta que o algoritmo AHP Codec Selection, diante de uma situação diferente (aumento da carga da rede) e, apesar de utilizar o mesmo vetor de pesos de prioridade, apresenta uma lista de codecs distinta da primeira. Isto se dá, devido as características de cada codec que proporcionam desempenhos diferentes à rede. Quando confrontados os dados, o algoritmo decidiu por utilizar um codec que possuía um menor conteúdo principal de dados (*payload*). Fica demonstrado também que, para tráfego mais leve o codec GSM se mostra mais atraente para a rede, enquanto para situações de maior congestionamento o G.728 se portaria melhor, dando assim mais qualidade as ligações.

### Experimento 3: Cenário 0 (carga baixa da rede)

Tabela 22 - Experimento 3. Cenário 0: Notas do Especialista.

<b>Critério</b>		<b>Critério</b>	<b>Nota do Especialista</b>
E-mail	X	Delay	9.00
HTTP	X	Delay	5.00
HTTP	X	E-mail	1.00
MOS	X	Delay	3.00
MOS	X	E-mail	0.20
MOS	X	HTTP	1.00

- **Razão de Consistência dos critérios:** 0,084368 ou 8,44%.
- **Lista de codecs obtida:** GSM, G.711, G.729a, G.723a, G.726, G.728, G.723m.

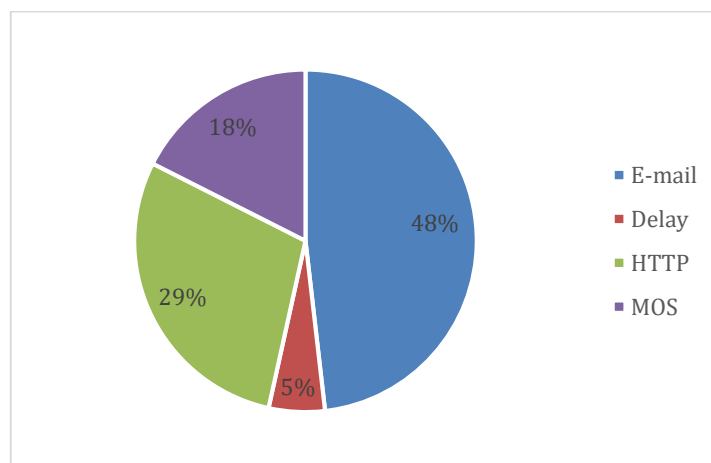


Figura 25 - Vetor de prioridades do especialista: Experimento 3.

Assim como nos experimentos 1 e 2, foi solicitado ao especialista que utilizasse os mesmos pesos para os experimentos 3 e 4, a fim de obter-se uma métrica de comparação. Por opção, o especialista priorizou o tráfego de e-mail em detrimento do atraso da rede (Delay). Também preferiu que o tráfego HTTP fosse melhor qualificado do que a qualidade da voz

(MOS) nas ligações. Como esperado o algoritmo AHP Codec Selection, aplicou as prioridades às medições da rede e apontou listas de codecs, que atendessem às demandas do especialista (vide Figuras 25 e 26).

#### Experimento 4: Cenário 1 (carga alta da rede)

Tabela 23 - Experimento 4. Cenário 1: Notas do Especialista.

Critério		Critério	Nota do Especialista
E-mail	X	Delay	9.00
HTTP	X	Delay	5.00
HTTP	X	E-mail	1.00
MOS	X	Delay	3.00
MOS	X	E-mail	0.20
MOS	X	HTTP	1.00

- **Razão de Consistência dos critérios:** 0,084368 ou 8,44%.
- **Lista de codecs obtida:** G.728, G.729a, G.723m, G.711, G.726, G.723a, GSM.

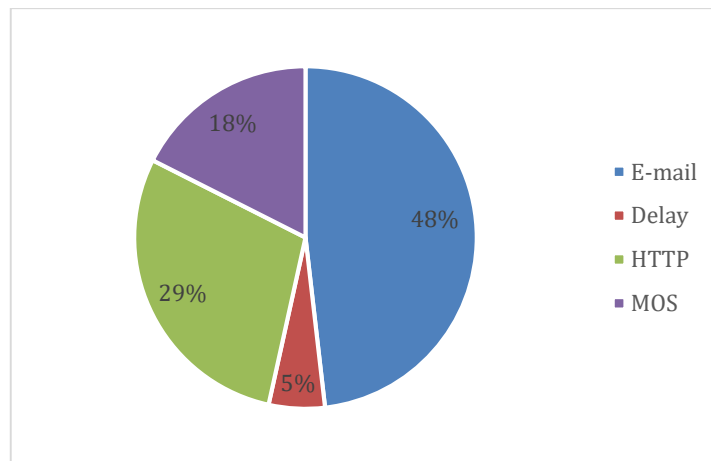


Figura 26 - Vetor de prioridades do especialista: Experimento 4.

Os resultados apresentados anteriormente assinalam que:

- Os codecs influenciam de forma diferente o tráfego da rede, pois também possuem características diferentes em suas concepções (vide Tabela 24);
- O algoritmo AHP Codec Selection efetiva-se como uma ferramenta de apoio ao QoS de redes convergentes;
- A metodologia adotada (unir QoE a QoS) foi possibilitada pela adoção do método AHP e surtiu efeitos satisfatórios, uma vez que o algoritmo não recorre ao especialista para analisar uma imensidão de dados gerados pela rede.

Tabela 24 - Taxa de operação dos codecs

Codecs	Taxa de Bits (kbit/s)	GP (ms)	Carga de Dados (bytes)	Cabeçalhos IPv4 Ethernet	PPS	Taxa de Operação (KB/s)
<b>G.711</b>	64,00	20	160	58	50	<b>87,20</b>
<b>G.726</b>	32,00	20	80	58	50	<b>55,20</b>
<b>G.728</b>	16,00	20	40	58	50	<b>39,20</b>
<b>G.729a</b>	8,00	20	20	58	50	<b>31,20</b>
<b>GSM</b>	13,20	20	20	58	50	<b>36,40</b>
<b>G.723m</b>	6,30	20	15,75	58	50	<b>29,50</b>
<b>G.723a</b>	5,30	20	13,25	58	50	<b>28,50</b>

Além disso, quanto maior o número de variáveis envolvidas, melhores serão os apontamentos realizados ao ponto de que o QoS seja cada vez mais otimizado.



## **5. Conclusão**

O procedimento proposto neste trabalho, para o balanceamento da carga de rede, levando em consideração o QoS e o QoE, se mostrou eficiente e de possível utilização em sistemas embarcados como aparelhos de VoIP ou em servidores em redes de dados. O trabalho apresenta uma nova abordagem para a escolha de codecs em redes convergentes. Tal método propicia a melhor escolha para rede através de uma metodologia automatizada que visa priorizar serviços além da qualidade da voz.

A metodologia adotada (unir QoE a QoS) foi possibilitada pela adoção do método AHP e surtiu efeitos satisfatórios, uma vez que o algoritmo não recorre ao especialista para analisar uma imensidão de dados gerados pela rede, pois para o AHP Codec Selection, quanto maior o número de variáveis envolvidas, melhor serão os apontamentos realizados, conseqüentemente a melhor otimização dos recursos de rede.

Os resultados obtidos com os experimentos sugerem um potencial promissor para aplicações diversas em redes convergentes, tais como sistemas de videochamada e/ou webconferências que também dependem da tecnologia de codecs.

Outra aplicação possível está no fato de cada vez mais as operadoras de telefonia fixa estarem migrando seus serviços para enlaces de dados do tipo E1 ou ISDN (utilizando-se da mesma tecnologia VoIP), mas com limitação de banda entre 1,5Mbps a 2Mbps o que aponta para uma grande necessidade de controle e qualidade de tráfego.

### **5.1 Recomendações para trabalhos futuros**

A metodologia proposta por esse trabalho pode motivar novas pesquisas nas áreas de qualidade de serviços e de experiência ligados a comunicação de voz sobre IP. Com a diversificação e crescente aumento das tecnologias de comunicação móveis, este campo se torna atrativo a aplicação de ferramentas de qualidade, embarcadas ou não.

Por se tratar de um algoritmo, o AHP Codec Selection pode ser reproduzido em servidores (em formato de serviço) e dispositivos. Além do mais, cabe ainda a verificação de seu desempenho em um ambiente real e até mesmo a sua comparação com os demais algoritmos e metodologias empregados atualmente.

## Referências Bibliográficas

- ADISESHU H.; VOLKER H.; MARKUS H.; DEBASIS M.; IRAJ S.; ANWAR W.; INDRA W. **Intelligent media gateway selection in a VoIP network**. Bell Labs Technical Journal 10(1), 47–57 (2005) • DOI: 10.1002/bltj.20078
- ANTONS, J. N. et al. **Impact of perceived quality and other influencing factors on emotional video experience**. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON QUALITY OF MULTIMEDIA EXPERIENCE, 70., 2015, Pylos-Nestor. Proceedings... Pylos-Nestor: IEEE, 2015. p. 1–6.
- BRASIL. Agência Nacional de Telecomunicações. **Relatório anual 2018**. Brasília, DF, 2019. 10 p.
- BORDIM, J. L. **Introdução à Voz sobre IP e Asterisk**. Escola Superior de Redes. Rio de Janeiro, 2010.
- CAPISTRANO, G. C. C. **Uma aplicação do PAHP no planejamento de sistemas elétricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2009.
- CHANDRA, M.; RAY, M. **Comparative Study of PCM, LPC, and CELP Speech Coders Used for VoIP Applications, Intelligent Computing, Communications and Devices, Advances in Intelligent Systems and Computing** 308, DOI 10.1007/978-81-322-2012-1\_62.
- CISCO SYSTEM INC. **Automation for Quality of Service Deployments: Cisco AutoQoS**. 2019. Disponível em: <[https://www.cisco.com/en/US/technologies/tk543/tk879/technologies\\_white\\_paper0900aecd803228e0.html](https://www.cisco.com/en/US/technologies/tk543/tk879/technologies_white_paper0900aecd803228e0.html)>. Acesso em: 26 setembro de 2019.
- ELMAHDY H. N.; TAHA, M. H. N. **The Impact of Packet Size and Packet Dropping Probability on Bit Loss of VoIP Networks**. Paper in ICGST-CNIR Journal, Volume 8, Issue 2, January 2009, Faculty of Computers and Information, Cairo University, Giza, Egypt.
- FIEDLER, M. et al. **Quality of experience**. Annals of Telecommunications, New York, v. 65, n. 1, p. 1–2, Feb. 2010.
- GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C., **Tomada de decisões em cenários complexos**, Tradução técnica: Marcela Cecília González Araya, São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- HARTPENGE, B. **Packet guide to voice over IP: a system administrator's guide to VoIP technologies**. Sebastopol: O'Reilly Media, 2013. 242 p.
- HOBFELD, T.; HEEGAARD, P. E.; VARELA, M. **QoE beyond the MOS: added value using quantiles and distributions**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON QUALITY OF MULTIMEDIA EXPERIENCE, 70., 2015, Pylos-Nestor. Proceedings... Pylos-Nestor: IEEE, 2015. p. 1–6.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.3 Ethernet Working Group**. 2019. Disponível em <<http://www.ieee802.org/3/>>. Acesso em 27 de setembro de 2019.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 802.11 - The Working Group for WLAN Standards**. 2019. Disponível em <<http://www.ieee802.org/11/>>. Acesso em 27 de setembro de 2019.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **Methods for subjective determination of transmission quality**. Genebra, 1996. Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-P.800/en>>. Acesso em 27 de setembro de 2019.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **Framework of a Service Level Agreement**. Genebra, 2002. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-E.860-200206-I/en>>. Acesso em 27 de setembro de 2019.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): an objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs**. Genebra, 2007. Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862/en>>. Acesso em 27 de setembro de 2019.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **Perceptual objective listening quality prediction**. Genebra, 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-P.863-201803-I>>. Acesso em 27 de setembro de 2019.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR. **Single-ended method for objective speech quality assessment in narrow-band telephone applications**. Genebra, 2007. Disponível em: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-P.563/en>>. Acesso em 27 de setembro de 2019.

INTERNET ENGINEERING TASK FORCE. **Requirements for VoIP Header Compression over Multiple-Hop Paths**. 2003. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/draft-ash-e2e-voip-hdr-comp-rqm-ts-01>>. Acesso em 27 de setembro de 2019.

JOURNEY INTO COMMUNICATION SYSTEM. **PCM (Pulse Code modulation)**. 2019. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/evocommune/wireless-comm/how-signal-is-transmitted/signal-transfer-3/pcm-pulse-code-modulation>>. Acesso em 26 de setembro de 2019.

KAZEMITABAR, H.; AHMED, S.; NISAR, K.; SAID, A. B.; HASBULLAH, H. B. **A Survey on Voice over IP over Wireless LAN**. Paper in World Academy of Science, Department of Computer and Information Sciences, University Technology, Malaysia, 2010.

KUIPERS, F. et al. **Techniques for measuring quality of experience**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRED/WIRELESS INTERNET COMMUNICATIONS, 8, 2010, Lulea. Proceedings... Lulea: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 216–227.

LAGHARI, K. U. R.; CONNELLY, K. **Toward total quality of experience: a QoE model in a communication ecosystem**. IEEE Communications Magazine, New York, v. 50, n. 4, p. 58–65, Apr. 2012.

MOHAMMED, H. A.; ALI, A. H.; MOHAMMED H. J. **The Affects of Different Queuing Algorithms within the Router on QoS VoIP application Using OPNET**. International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC) Vol.5, No.1, January 2013

MELLOUK, A.; HOCEINI, S.; TRAN, H. A. **Quality of experience vs. quality of service: Application for a CDN architecture**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE, TELECOMMUNICATIONS AND COMPUTER NETWORKS, 21., 2013, Primosten.Proceedings...Primosten: IEEE, 2013. p. 1–8.

NUNES, R. D. **Algoritmo para melhorar o desempenho de uma métrica não intrusiva de qualidade de voz**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2017.

POIKSELKA, M.; MAYER, G. **The IMS: ip multimedia concepts and services**. 3rd ed. Chichester: J. Wiley, 2013. 533 p.

SAATY, T. L., **Método de Análise Hierárquica**, Tradução e revisão técnica Wainer da Silveira e Silva, São Paulo: McGraw-Hill, Makron, 1991.

SALAMA, G. I.; SHEHAB, M. E.; HAFEZ, A. A.; ZAKI, M. **Performance Analysis of Transmitting Voice over Communication Links Implementing IPSec**. Paper in 13th International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology (ASAT), Military Technical College, Cairo, Egypt, May 2009.

SANTOS, C. J.; SOUZA, L. E; PAIVA, B. G. M. **Análise da influência de diferentes codificadores de voz (codecs) em redes convergentes**. Revista E-Locução. 17º Edição. 2019. (ISSN 2238-1899).

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. **Computer Networks**. 5th ed. Boston: Prentice Hall, 2010. 960 p.

TAVARES, R. K.; LOBATO, M. R.; WESTPHALL, C. B.; **Análise de Parâmetros de QoS e Esquemas de Filas em um Ambiente Bluetooth**. IV Congresso Brasileiro de Computação – CBCComp 2004.

TAWFEEQ, F. N. **Network Congestion and Quality of Service Analysis Using OPNET**. Thesis, Department of Information Engineering, Al-Nahrain University, March 2009.

TSIARAS, C. et al. **Towards evaluating type of service related quality-of-experience on mobile networks**. In: WIRELESS AND MOBILE NETWORKING CONFERENCE, 7., 2014, Vilamoura: IEEE, 2014. p. 1–8.

YOUSSEF, Y. B.; AFIF, M.; TABBANE, S. **Novel AHP-based QoE Factors' Selection Approach**. 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA). IEEE/ACS, 2016.

YUAN, Z. & MUNTEAN, GM. **iVoIP: an intelligent bandwidth management scheme for VoIP in WLANs**. IEEE Wireless Network (2014) 20: 457. doi:10.1007/s11276-013-0616-7.

# ANEXO I

## Algoritmo AHP Codec Selection

```

#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<string.h>

#define nCRITERIOS 4
#define nFATORES 7
#define tNOMES 100

char dadosNome[nCRITERIOS][tNOMES];
double dadosRede[nCRITERIOS][nFATORES];

typedef struct{
    char nomeFator[tNOMES];
    double resultado;
}Resultados;

typedef struct{
    char nomeCriterio[nCRITERIOS][tNOMES];
    double matrizDecisao[nCRITERIOS][nCRITERIOS];
    double matrizNormalizada[nCRITERIOS][nCRITERIOS];
    double vetorPesos[nCRITERIOS];
}Critérios;

typedef struct{
    char nomeFator[tNOMES];
    double matrizDecisao[nFATORES][nFATORES];
    double matrizNormalizada[nFATORES][nFATORES];
    double vetorPesos[nFATORES];
}Fatores;

int _normaliza(Fatores *Fx);
int _pesoCriterio(Critérios *Cx);
int _pesoFator(Fatores *Fx, int flagDIV, int Critério);
int _leitura(char Arquivo[]);
int _exporta(char Arquivo[]);
int _ConcistenciaF(Fatores *Fx);
int _ConcistenciaC(Critérios *Cx);
int _bolha(Resultados *Rx);

int main(){

    Fatores F1;
    Fatores F2;
    Fatores F3;
    Fatores F4;
    Critérios C0;
    Resultados R0[nFATORES];

    int opcao;
    do{
        printf("\n***** AHP CODEC SELECT *****");
        printf("\n1 - Carregar arquivo");
        printf("\n2 - Matrizes de Decis\xC6o");
    }

```

```

printf("\n3 - Pontuar Crit\x82rios");
printf("\n4 - Resultado da AHP");
printf("\n0 - Encerrar");
printf("\n-----");
printf("\nSelecione: ");
scanf("%d",&opcao);
switch(opcao){
    case 1:
        _leitura("cenario.txt");
        break;
    case 2:
        _pesoFator(&F1,0,0);
        _pesoFator(&F2,0,1);
        _pesoFator(&F3,0,2);
        _pesoFator(&F4,1,3);
        _normaliza(&F1);
        _normaliza(&F2);
        _normaliza(&F3);
        _normaliza(&F4);
        strcpy(C0.nomeCriterio[0],F1.nomeFator);
        strcpy(C0.nomeCriterio[1],F2.nomeFator);
        strcpy(C0.nomeCriterio[2],F3.nomeFator);
        strcpy(C0.nomeCriterio[3],F4.nomeFator);
        break;
    case 3:
        _pesoCriterio(&C0);
        break;
    case 4:
        system("cls");
        strcpy(R0[0].nomeFator,"G.711");
        strcpy(R0[1].nomeFator,"G.726");
        strcpy(R0[2].nomeFator,"G.728");
        strcpy(R0[3].nomeFator,"G.729a");
        strcpy(R0[4].nomeFator,"G.729u");
        strcpy(R0[5].nomeFator,"G.723m");
        strcpy(R0[6].nomeFator,"GSM");

        printf("\n\nResultado: \n\n");
        for(int L=0;L<nFATORES;L++){
            R0[L].resultado = C0.vetorPesos[0]*F1.vetorPesos[L]+
                C0.vetorPesos[1]*F2.vetorPesos[L]+
                C0.vetorPesos[2]*F3.vetorPesos[L]+
                C0.vetorPesos[3]*F4.vetorPesos[L];
            printf("[%d] %lf = %lf*%lf+%lf*%lf+%lf*%lf+%lf*%lf\n",
                L, R0[L].resultado,
                C0.vetorPesos[0],F1.vetorPesos[L],
                C0.vetorPesos[1],F2.vetorPesos[L],
                C0.vetorPesos[2],F3.vetorPesos[L],
                C0.vetorPesos[3],F4.vetorPesos[L]
            );
        }

        printf("\n\n");

        //Algoritmo de ordenaao (Bolha)
        printf("\nORDEM: ");
        _bolha(R0);

        printf("\n\n");
        system("pause");

```

```

        system("cls");
        break;
    case 0:
        break;
    default:
        printf("\nOpção Inválida");
        system("pause");
        system("cls");
    }
} while(opcao!=0);

return 0;
}

//Funções Auxiliares

int _normaliza(Fatores *Fx){
    double soma=0;
    for(int C=0;C<nFATORES;C++){
        for(int L=0;L<nFATORES;L++){
            soma+=Fx->matrizDecisao[L][C];
        }
        for(int L=0;L<nFATORES;L++){
            Fx->matrizNormalizada[L][C]=Fx->matrizDecisao[L][C]/soma;
            printf("[%d][%d] %lf = %lf / %lf\n",L,C,Fx->matrizNormalizada[L][C],Fx-
>matrizDecisao[L][C],soma);
        }
        soma=0;
    }

    system("pause");

    printf("\nMatriz Normalizada do Critério: %s\n",Fx->nomeFator);
    for(int i=0;i<nFATORES;i++){
        for(int j=0;j<nFATORES;j++){
            printf("[%d][%d] %lf\t",i,j,Fx->matrizNormalizada[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }

    system("pause");
    system("cls");

    //Calculo das médias
    for(int L=0;L<nFATORES;L++){
        soma=0;
        for(int C=0;C<nFATORES;C++){
            soma+=Fx->matrizNormalizada[L][C];
        }
        Fx->vetorPesos[L] = soma/nFATORES;
    }

    printf("\nVetor das Medias do Critério: %s\n",Fx->nomeFator);
    for(int i=0;i<nFATORES;i++){
        printf("[%d] %lf\n",i,Fx->vetorPesos[i]);
    }

    _ConcistenciaF(Fx);
}

```

```

    system("pause");
    system("cls");

    return 0;
}

int _pesoCriterio(Criterios *Cx){

    int iteracao = 0;
    double nota;

    for(int L=1;L<nCRITERIOS;L++){
        system("cls");
        printf("\n\nAvalia\x87\xC6o especializada dos Crit\x82rios\n\n");
        printf("Crit\x82rio: %s\n\n",Cx->nomeCriterio[L]);
        printf("\n\nNOTAS:\n");
        printf("-----
\n");

        printf("Extremamente\tBastante\tMuito\tPouco\tIgual\tPouco\tMuito\tBastante\tExtremamente\n");
        printf("-----
\n");

        printf("Menos Importante\t\t\tSemelhante\t\t\tMais Importante\n");
        printf("-----
\n");

        printf("0.11\t\t0.14\t\t0.20\t\t0.33\t\t1.00\t\t3.00\t\t5.00\t\t7.00\t\t9.00\n");
        printf("-----
\n\n");

        for(int C=0;C<=iteracao && iteracao<nCRITERIOS;C++){
            printf("Avalia\x87\xC6o [%s] x [%s] : ",Cx->nomeCriterio[L],Cx-
>nomeCriterio[C]);
            scanf("%lf",&Cx->matrizDecisao[L][C]);
        }
        iteracao++;
    }

    //Reciprocidade da Matriz
    iteracao = 0;
    for(int L=1;L<nCRITERIOS;L++){
        for(int C=0;C<=iteracao && iteracao<nCRITERIOS;C++){
            Cx->matrizDecisao[C][L] = 1/Cx->matrizDecisao[L][C];
        }
        iteracao++;
    }

    //Diagonal principal
    for(int L=0;L<nCRITERIOS;L++){
        for(int C=0;C<nCRITERIOS;C++){
            if(L==C){
                Cx->matrizDecisao[C][L] = 1.0;
            }
        }
    }

    printf("\n\nMatriz de decis\xC6o dos Crit\x82rios\n\n");
    for(int i=0;i<nCRITERIOS;i++){
        for(int j=0;j<nCRITERIOS;j++){
            printf("[%d][%d] %lf\t",i,j,Cx->matrizDecisao[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }
}

```



```

}

system("pause");
system("cls");

//Normalizaçãõ da Matriz
double soma=0;
for(int C=0;C<nCRITERIOS;C++){
    for(int L=0;L<nCRITERIOS;L++){
        soma+=Cx->matrizDecisao[L][C];
    }
    for(int L=0;L<nCRITERIOS;L++){
        Cx->matrizNormalizada[L][C]=Cx->matrizDecisao[L][C]/soma;
        printf("[%d][%d] %lf = %lf / %lf\n",L,C,Cx->matrizNormalizada[L][C],Cx-
>matrizDecisao[L][C],soma);
    }
    soma=0;
}

system("pause");

printf("\n\nMatriz Normalizada dos Crit\x82rios\n\n");
for(int i=0;i<nCRITERIOS;i++){
    for(int j=0;j<nCRITERIOS;j++){
        printf("[%d][%d] %lf\t",i,j,Cx->matrizNormalizada[i][j]);
    }
    printf("\n");
}

system("pause");
system("cls");

//Calculo das m\u00e9dias
for(int L=0;L<nCRITERIOS;L++){
    soma=0;
    for(int C=0;C<nCRITERIOS;C++){
        soma+=Cx->matrizNormalizada[L][C];
    }
    Cx->vetorPesos[L] = soma/nCRITERIOS;
}

printf("\n\nVetor das Medias dos Crit\x82rios\n\n");
for(int i=0;i<nCRITERIOS;i++){
    printf("[%d] %lf\n",i,Cx->vetorPesos[i]);
}

_ConcistenciaC(Cx);

system("pause");
system("cls");

return 0;
}

int _pesoFator(Fatores *Fx, int flagDIV, int Criterio){
    /*
    * Fatores *Fx -> Ponteiro para estrutura do fator
    * flagDIV -> 0 - Menor valor \u00e9 melhor | 1 - Maior valor \u00e9 melhor
    * Criterio -> Indice da linha que representa o crit\u00e9rio escolhido para a matriz de decis\u00f5es
    */
}

```

```

*/
int base=0;
int iteracao=0;
double NOTA = 0; //variavel novo algoritmo
strcpy(Fx->nomeFator,dadosNome[Critério]);

if(flagDIV==0){
    //Menor valor é melhor
    for(int L=0;L<nFATORES;L++){
        for(int C=iteracao;C<nFATORES;C++){
            if(dadosRede[Critério][base]<dadosRede[Critério][C]){
                NOTA = (1-
(dadosRede[Critério][base]/dadosRede[Critério][C]))*10;
                if(NOTA<=0.09){
                    NOTA=1.0;
                }
            }else if(dadosRede[Critério][base]>dadosRede[Critério][C]){
                NOTA = 1/((1-
(dadosRede[Critério][C]/dadosRede[Critério][base])*10);
                if(NOTA<=0.09){
                    NOTA=1.0;
                }else{
                    NOTA = 1/NOTA;
                }
            }else{
                NOTA = 1;
            }
            //Tratando excessões
            if(NOTA<=0.09){
                NOTA=1.0;
            }else if(NOTA>9.0){
                NOTA=9.0;
            }
            //Atribuição de nota
            Fx->matrizDecisao[L][C]=NOTA;

            //Fx->matrizDecisao[L][C]=1+(1-
dadosRede[Critério][base]/dadosRede[Critério][C]);
            printf("[%d][%d] %lf = %lf / %lf\n",L,C,Fx-
>matrizDecisao[L][C],dadosRede[Critério][base],dadosRede[Critério][C]);
        }
        printf("\n");
        iteracao++;
        base++;
    }
}else{
    //Maior valor é melhor
    for(int L=0;L<nFATORES;L++){
        for(int C=iteracao;C<nFATORES;C++){

            if(dadosRede[Critério][base]>dadosRede[Critério][C]){
                NOTA = (1-
(dadosRede[Critério][C]/dadosRede[Critério][base]))*10;
            }else if(dadosRede[Critério][base]<dadosRede[Critério][C]){
                NOTA = 1/((1-
(dadosRede[Critério][base]/dadosRede[Critério][C]))*10);
            }else{
                NOTA = 1.0;
            }
            //Tratando excessões

```

```

        if(NOTA<=0.09){
            NOTA=1.0;
        }else if(NOTA>9.0){
            NOTA=9.0;
        }
        //Atribuição de nota
        Fx->matrizDecisao[L][C]=NOTA;

        //Fx->matrizDecisao[L][C]=1+(1-
dadosRede[Criterio][C]/dadosRede[Criterio][base]);
        printf("[%d][%d] %lf = %lf / %lf\n",L,C,Fx-
>matrizDecisao[L][C],dadosRede[Criterio][base],dadosRede[Criterio][C]);
    }
    printf("\n");
    iteracao++;
    base++;
}
}

system("pause");
system("cls");

//Reciprocidade da Matriz
iteracao = 0;
for(int L=1;L<nFATORES;L++){
    for(int C=0;C<=iteracao && iteracao<nFATORES;C++){
        Fx->matrizDecisao[L][C] = 1/Fx->matrizDecisao[C][L];
    }
    iteracao++;
}

system("pause");

printf("\n\nMatriz de decis\xC6o do Crit\x82rio: %s\n\n",Fx->nomeFator);
for(int i=0;i<nFATORES;i++){
    for(int j=0;j<nFATORES;j++){
        printf("[%d][%d] %lf\t",i,j,Fx->matrizDecisao[i][j]);
    }
    printf("\n");
}

system("pause");
system("cls");

return 0;
}

int _leitura(char Arquivo[]){

    FILE *arquivo;
    int L = 0;
    double i1, i2, i3, i4, i5, i6, i7;
    arquivo = fopen(Arquivo,"r");

    system("cls");

    if(arquivo==NULL){
        printf("\nErro, n\xC6o foi poss\xA1vel abrir o arquivo!\n");
    }else{
        while(fscanf(arquivo,"%s %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf\n",

```

```

        &dadosNome[L],
        &dadosRede[L][0],
        &dadosRede[L][1],
        &dadosRede[L][2],
        &dadosRede[L][3],
        &dadosRede[L][4],
        &dadosRede[L][5],
        &dadosRede[L][6]
    )!=EOF){
        L++;
    }
}

for(int i=0;i<nCRITERIOS;i++){
    printf("%s", dadosNome[i]);
    for(int j=0;j<nFATORES;j++){
        printf("%f", dadosRede[i][j]);
    }
    printf("\n");
}

fclose(arquivo);
system("pause");
system("cls");
return 0;
}

int _exporta(char Arquivo[]){
    return 0;
}

int _ConcistenciaF(Fatores *Fx){

    int iteracoes = 10;
    double lambda[nFATORES] = {0,0,0,0,0,0,0};
    double lambdaMax = 0;
    double T[nFATORES] = {1,1,1,1,1,1,1};
    double CI = 0;
    double CR = 0;
    double soma=0;
    int linha=0;

    //Cálculo do lambdaMAX (maior autovalor da matriz)
    for(int i=0;i<iteracoes;i++){
        for(int L=0;L<nFATORES;L++){
            for(int C=0;C<nFATORES;C++){
                lambda[L] += Fx->matrizDecisao[L][C]*T[C];
            }
        }
        for(int i=0;i<nFATORES;i++){
            T[i] = lambda[i]/lambda[0];
        }
        lambdaMax = lambda[0];
        for(int i=0;i<nFATORES;i++){
            lambda[i] = 0;
        }
    }

    //Cálculo do Coeficiente de Inconsistência
    CI = (lambdaMax-nFATORES)/(nFATORES-1);

```

```

//Cálculo do Coeficiente de Concistência
if(nFATORES==1){
    CR = CI/0.0;
}else if(nFATORES==2){
    CR = CI/0.0;
}else if(nFATORES==3){
    CR = CI/0.52;
}else if(nFATORES==4){
    CR = CI/0.89;
}else if(nFATORES==5){
    CR = CI/1.11;
}else if(nFATORES==6){
    CR = CI/1.25;
}else if(nFATORES==7){
    CR = CI/1.35;
}else if(nFATORES==8){
    CR = CI/1.40;
}else if(nFATORES==9){
    CR = CI/1.45;
}else if(nFATORES==10){
    CR = CI/1.49;
}

printf("\n\nLambdMax: %lf (Maior Autovalor da Matriz)",lambdaMax);
printf("\nCoeficiente de Inconsistencia: %lf",CI);
printf("\nRazão de Consistencia: %lf (Se menor que 0.1 a matriz de decisões considerada
consistente.)\n\n",CR);

//Caso o CR seja maior que 10% ou maior que 0.10 o especialista é convidado a revisar seus
julgamentos
if (CR>0.10){
    printf("ATENCAO: Os valores obtidos pelo algoritmo demonstram inconsistências em seu
julgamento, favor revisar suas opinioes!!!\n\n");
}

return 0;
}

int _ConcistenciaC(Criterios *Cx){

    int iteracoes = 10;
    double lambda[nCRITERIOS] = {0,0,0,0};
    double lambdaMax = 0;
    double T[nCRITERIOS] = {1,1,1,1};
    double CI = 0;
    double CR = 0;
    double soma=0;
    int linha=0;

    //Cálculo do lambdaMAX (maior autovalor da matriz)
    for(int i=0;i<iteracoes;i++){
        for(int L=0;L<nCRITERIOS;L++){
            for(int C=0;C<nCRITERIOS;C++){
                lambda[L] += Cx->matrizDecisao[L][C]*T[C];
            }
        }
        for(int i=0;i<nCRITERIOS;i++){
            T[i] = lambda[i]/lambda[0];
        }
    }
}

```

```

        lambdaMax = lambda[0];
        for(int i=0;i<nCRITERIOS;i++){
            lambda[i] = 0;
        }
    }

    //Cálculo do Coeficiente de Inconsistência
    CI = (lambdaMax-nCRITERIOS)/(nCRITERIOS-1);

    //Cálculo do Coeficiente de Concistência
    if(nCRITERIOS==1){
        CR = CI/0.0;
    }else if(nCRITERIOS==2){
        CR = CI/0.0;
    }else if(nCRITERIOS==3){
        CR = CI/0.52;
    }else if(nCRITERIOS==4){
        CR = CI/0.89;
    }else if(nCRITERIOS==5){
        CR = CI/1.11;
    }else if(nCRITERIOS==6){
        CR = CI/1.25;
    }else if(nCRITERIOS==7){
        CR = CI/1.35;
    }else if(nCRITERIOS==8){
        CR = CI/1.40;
    }else if(nCRITERIOS==9){
        CR = CI/1.45;
    }else if(nCRITERIOS==10){
        CR = CI/1.49;
    }

    printf("\n\nLambdMax: %lf (Maior Autovalor da Matriz)",lambdaMax);
    printf("\nCoeficiente de Inconsistencia: %lf",CI);
    printf("\nRazão de Consistencia: %lf (Se menor que 0.1 a matriz de decisões considerada
consistente.)\n\n",CR);

    //Caso o CR seja maior que 10% ou maior que 0.10 o especialista é convidado a revisar seus
    julgamentos
    if (CR>0.10){
        printf("ATENÇÃO: Os valores obtidos pelo algoritmo demonstram inconsistências em seu
julgamento, favor revisar suas opiniões!!!!\n\n");
    }

    return 0;
}

int _bolha(Resultados *Rx){

    int fim,i;
    for (fim=nFATORES-1; fim>0; fim--){
        for (i=0; i<fim; i++){
            if (Rx[i].resultado>Rx[i+1].resultado) {

                double temp = Rx[i].resultado;
                char ntemp[tNOMES];
                strcpy(ntemp,Rx[i].nomeFator);

                Rx[i].resultado = Rx[i+1].resultado;
                strcpy(Rx[i].nomeFator,Rx[i+1].nomeFator);
            }
        }
    }
}

```

```
                Rx[i+1].resultado = temp;
                strcpy(Rx[i+1].nomeFator,ntemp);
            }
        }
    }

    printf("\n\n");
    for(int i=0;i<nFATORES;i++){
        printf("\t%d\t",i);
    }
    printf("\n");
    for(int i=nFATORES-1;i>=0;i--){
        printf("\t%s\t",Rx[i].nomeFator);
    }

    return 0;
}
```