



UEMA - Universidade Estadual do Maranhão
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação e
Sistemas

Caio de Castro Torres
**Universidade VOIP: Caso de usuário posto de
Combustível.**

São Luís - MA
2025

Caio de Castro Torres

Universidade VOIP: Caso de usuário posto de Combustível.

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação e Sistemas, ao Programa PECS da Universidade Estadual do Maranhão.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
SISTEMAS

Universidade Estadual do Maranhão

São Luís - MA

2025

Torres, Caio de Castro

Universidade VOIP: caso de usuário posto de combustível. / Caio de Castro – São Luis, MA, 2025.

71 f

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação e Sistemas/PECS) - Universidade Estadual do Maranhão, 2025.

Orientador: Prof. Dr Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira.


1.Aplicativos. 2.Comunicação. 3.Empresarial. 4.Telefonia. 5.VoIP.
I.Titulo.

CDU: 004.77


Caio de Castro Torres

Universidade VOIP: Caso de usuário posto de Combustível.


Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação e Sistemas, ao Programa PECS da Universidade Estadual do Maranhão.

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS HENRIQUE RODRIGUES DE OLIVEIRA**
Data: 29/08/2025 09:56:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Carlos Henrique Rodrigues
de Oliveira**
Orientador
UEMA - Universidade Estadual do

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO MOREIRA LIMA SILVA**
Data: 01/09/2025 10:07:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rogerio Moreira Lima Silva
Examinador Interno
UEMA - Universidade Estadual do
Maranhão

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO RENATO DO CARMO PEREIRA FILHO**
Data: 29/08/2025 11:36:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Ms. Marcelo Renato do Carmo
Pereira Filho**
Examinador Externo
Universidade Estadual do Maranhão

São Luís - MA
2025

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que é meu guia e sempre ouve minhas preces. Toda honra e toda glória à ti.

Aos meus pais, meu irmão, minha esposa e toda minha família, que sempre estão ao meu lado e tenho a felicidade de poder conviver em todos os momentos.

Ao meu orientador, professor Dr. Carlos Henrique, que é um exemplo de ser humano, sempre confiando em mim e me apoiando nessa jornada, jornada esta que começou desde a graduação, e que durante todos esses anos minha admiração só aumentou pelo trabalho exemplar que o professor tem com a instituição.

A todo corpo docente e discente que fizeram parte dessa caminhada e tornaram-a possível.

Aos meus amigos do grupo Gestão, que sempre compartilhamos conhecimento e todos estão dispostos a ajudar.

"Grandes coisas nos negócios nunca são feitas por uma única pessoa. São feitas por uma equipe de pessoas."

(Steve Jobs)

Resumo

A telefonia continua sendo uma peça fundamental nas operações de qualquer empresa nos dias de hoje, e isso por motivos bem claros e práticos. Ela não só garante uma comunicação direta e confiável entre funcionários, clientes e parceiros, o que ajuda a resolver problemas na hora, fechar negócios sem perda de tempo e dar suporte imediato ao cliente, mas também se encaixa perfeitamente naquela máxima do mundo dos negócios: “tempo é dinheiro”. Para muitos executivos e diretores, investir em uma telefonia eficiente é sinônimo de agilidade, pois permite que as equipes lidem com demandas urgentes de forma rápida, evitando atrasos que custam caro em produtividade e oportunidades perdidas.

Embora o uso da telefonia tradicional tenha se reduzido em decorrência do crescimento dos aplicativos de mensagens e chamadas pela internet, a comunicação por voz não perdeu sua relevância. O que se observa é uma transformação no meio utilizado: a tecnologia migrou de linhas fixas e centrais analógicas para plataformas digitais, mais flexíveis e adaptadas ao ambiente corporativo.

Nos últimos anos, a popularização da internet de alta velocidade permitiu que a voz passasse a ser transmitida como pacotes de dados, abrindo espaço para soluções de *Voice over IP (VoIP)*. Essa mudança representou um marco para empresas de todos os portes, já que possibilitou a redução de custos, a integração de recursos avançados, como gravação de chamadas e filas de atendimento, e a escalabilidade necessária para acompanhar o crescimento das organizações.

Apesar da presença marcante de aplicativos de comunicação no cotidiano das pessoas, em contextos empresariais eles ainda apresentam limitações, como a falta de integração com sistemas internos e a dificuldade em manter a segurança e a privacidade dos contatos. Por isso, a telefonia corporativa baseada em *VoIP* se consolidou como a alternativa mais eficiente, capaz de aliar economia, confiabilidade e recursos inteligentes de gestão de chamadas.

Em resumo, a telefonia não deixou de ser importante; ao contrário, ela evoluiu e se adaptou às novas demandas. Hoje, mais do que apenas um canal de voz, ela se integra às redes de dados e às ferramentas digitais das empresas, tornando-se parte fundamental da infraestrutura tecnológica moderna.

Palavras-chave: Aplicativos; Comunicação; Empresarial; Telefonia; *VoIP*.

Abstract

Telephony continues to be a fundamental element in the operations of any company today, and this is for very clear and practical reasons. It not only ensures direct and reliable communication between employees, clients, and partners—helping to solve problems immediately, close deals without wasting time, and provide instant customer support—but it also perfectly fits the well-known business maxim: “Time is money.” For many executives and managers, investing in efficient telephony is synonymous with agility, as it allows teams to handle urgent demands quickly, avoiding delays that can be costly in terms of productivity and lost opportunities.

Although the use of traditional telephony has declined due to the growth of messaging and internet-based calling applications, voice communication has not lost its relevance. What has occurred is a transformation in the medium used: technology has migrated from fixed lines and analog exchanges to digital platforms, which are more flexible and better adapted to the corporate environment.

In recent years, the widespread adoption of high-speed internet has enabled voice to be transmitted as data packets, paving the way for Voice over IP (VoIP) solutions. This change marked a milestone for companies of all sizes, as it allowed cost reductions, integration of advanced features such as call recording and call queues, and the scalability necessary to support organizational growth.

Despite the strong presence of communication applications in people’s daily lives, in business contexts they still present limitations, such as the lack of integration with internal systems and the difficulty of maintaining security and contact privacy. For this reason, corporate telephony based on VoIP has consolidated itself as the most efficient alternative, combining cost savings, reliability, and intelligent call management features.

In summary, telephony has not ceased to be important; on the contrary, it has evolved and adapted to new demands. Today, more than just a voice channel, it integrates with companies’ data networks and digital tools, becoming a fundamental part of modern technological infrastructure.

Keywords: Applications; Business operations; Communication; Telephony; VoIP.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Funcionamento da telefonia analógica.	21
Figura 2 – Multiplexação por divisão no tempo: TDM.	23
Figura 3 – Digitalização do sinal analógico.	24
Figura 4 – Tripé do 5G.	31
Figura 5 – Conexão FXS.	36
Figura 6 – Conexão FXO.	37
Figura 7 – Rack de telecomunicações.	48
Figura 8 – Monitoramento dos <i>links</i>	49
Figura 9 – Diagrama unifilar caixa de emenda óptica.	51
Figura 10 – Anel óptico.	52
Figura 11 – Liberação de portas no firewall para tráfego UDP.	55
Figura 12 – Configuração telefone VoIP.	55
Figura 13 – Central PABX.	56
Figura 14 – Configuração da central iCTI Manager.	57
Figura 15 – <i>Download</i> do banco de dados da central.	58
Figura 16 – ATA.	59
Figura 17 – Configuração do ATA.	60

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela Comparativa de <i>Codecs</i> de Áudio	27
Tabela 2 – Link budget por enlace (SFP SM 1310 nm até 10 km)	69
Tabela 3 – Cenários de dimensionamento (150 m ² e 190 clientes por AP)	71

Lista de abreviaturas e siglas

100BASE-T	<i>Ethernet a 100 Mbps sobre par trançado de cobre</i>
1000BASE-LX	<i>Ethernet a 1 Gbps (γ longa) sobre fibra, tipicamente monomodo</i>
1000BASE-SX	<i>Ethernet 1 Gbps (γ curta) sobre fibra multimodo</i>
1000BASE-T	<i>Ethernet 1 Gbps sobre par trançado de cobre</i>
10GBASE-LR	<i>Ethernet 10 Gbps (alcance longo) sobre fibra monomodo</i>
2G	<i>Segunda geração de telefonia móvel</i>
3G	<i>Terceira geração de telefonia móvel</i>
4G	<i>Quarta geração de telefonia móvel</i>
5G	<i>Quinta geração de telefonia móvel</i>
6G	<i>Próxima geração de telefonia móvel</i>
A-law	<i>Lei de companding A</i>
ACL	<i>Access Control List (Lista de Controle de Acesso)</i>
ACK	<i>Acknowledgement (confirmação)</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter (Conversor Analógico-Digital)</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
ATA	<i>Analog Telephone Adapter (Adaptador de Terminal Analógico)</i>
AVC	<i>Advanced Video Coding</i>
CELP	<i>Code Excited Linear Prediction (Predição Linear Excitada por Código)</i>
CEO	<i>Caixa de Emenda Óptica</i>
CO	<i>Central Office (central pública de comutação)</i>
CPU	<i>Central Processing Unit (Unidade Central de Processamento)</i>
CS-ACELP	<i>Conjugate-Structure Algebraic-Code-Excited Linear Prediction</i>
CTI	<i>Computer Telephony Integration (Integração Computador-Telefonia)</i>

DEI	<i>Drop Eligible Indicator (indicador de descarte elegível na tag 802.1Q)</i>
DIO	<i>Distribuidor Interno Óptico</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
DoS	<i>Denial of Service (negação de serviço)</i>
DDoS	<i>Distributed Denial of Service (negação de serviço distribuída)</i>
DTMF	<i>Dual-Tone Multi-Frequency (sinalização por tons multifrequenciais)</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing (multiplexação densa por comprimentos de onda)</i>
ERB	<i>Estação Rádio-Base (torre/célula de telefonia móvel)</i>
Ethernet (IEEE 802.3)	<i>Padrão de enlace/rede local comutada</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence (sequência de verificação de quadro)</i>
FreePBX	<i>Plataforma/GUI para Asterisk</i>
FreeBSD	<i>Sistema operacional BSD</i>
FXO	<i>Foreign Exchange Office (interface que “ouve” a linha; ligação para a central/operadora)</i>
FXS	<i>Foreign Exchange Subscriber/Station (interface que “fornece” tom e sinal ao terminal)</i>
G.711	<i>Recomendação ITU-T para PCM de voz a 64 kb/s (A-law/μ-law)</i>
G.729	<i>Recomendação ITU-T para codificação de voz a 8 kb/s (CS-ACELP)</i>
Gbps	<i>Gigabits per second (gigabits por segundo)</i>
GHz	<i>Gigahertz</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network (Rede Óptica Passiva Gigabit)</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications (padrão 2G)</i>
H.264	<i>Padrão de codificação de vídeo (AVC)</i>
Hz	<i>Hertz (ciclos por segundo)</i>
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
IDS	<i>Intrusion Detection System (Sistema de Detecção de Intrusão)</i>

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications (família de sistemas móveis 3G/4G/5G)</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPS	<i>Intrusion Prevention System (Sistema de Prevenção de Intrusão)</i>
IPv4	<i>Internet Protocol version 4</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
ISP	<i>Internet Service Provider (Provedor de Acesso à Internet)</i>
IXP	<i>Internet Exchange Point (Ponto de Troca de Tráfego; no Brasil, PTT)</i>
IoT	<i>Internet of Things (Internet das Coisas)</i>
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group (formato/padrão de imagens)</i>
kbit/s	<i>kilobits per second (quilobits por segundo)</i>
kbps	<i>kilobits per second (equivalente a kbit/s)</i>
kHz	<i>Quilohertz</i>
LAN	<i>Local Area Network (Rede Local)</i>
LTE	<i>Long Term Evolution (padrão 4G de banda larga móvel)</i>
MAC	<i>Media Access Control (endereço/camada de acesso ao meio)</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network (Rede Metropolitana)</i>
MHz	<i>Megahertz</i>
MOS	<i>Mean Opinion Score (métrica subjetiva de qualidade de voz)</i>
ms	<i>milissegundo</i>
NAT	<i>Network Address Translation (Tradução de Endereços de Rede)</i>
NIC.br	<i>Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR</i>
NVR	<i>Network Video Recorder (gravador de vídeo em rede)</i>
Opus	<i>Codec de áudio escalável (IETF/RFC 6716)</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection (modelo de referência em 7 camadas)</i>

PABX	<i>Private Automatic Branch Exchange (Central Privada de Comutação Telefônica)</i>
PBX	<i>Private Branch Exchange (idem PABX)</i>
PCP	<i>Priority Code Point (prioridade 0–7 na tag 802.1Q)</i>
PCM	<i>Pulse Code Modulation (Modulação por Código de Pulsos)</i>
pfSense	<i>Firewall de código aberto baseado em FreeBSD</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network (Rede Telefônica Pública Comutada)</i>
PTT	<i>Ponto de Troca de Tráfego (IXP no Brasil)</i>
QoS	<i>Quality of Service (Qualidade de Serviço)</i>
RAM	<i>Random Access Memory (memória de acesso aleatório)</i>
RFC	<i>Request for Comments (documentos normativos da IETF)</i>
RTP	<i>Real-time Transport Protocol (transporte de mídia em tempo real)</i>
RTCP	<i>Real-time Transport Control Protocol (controle/estatísticas do RTP)</i>
SCM	<i>Serviço de Comunicação Multimídia</i>
SFP	<i>Small Form-factor Pluggable (módulo óptico/elétrico hot-swap)</i>
SIP	<i>Session Initiation Protocol (sinalização de sessões multimídia)</i>
SIP Trunk	<i>Tronco SIP (interconexão VoIP com a operadora)</i>
SDP	<i>Session Description Protocol (descrição de sessão/codec/portas)</i>
Snort	<i>Ferramenta IDS/IPS de código aberto</i>
SSD	<i>Solid State Drive (unidade de estado sólido)</i>
STFC	<i>Serviço Telefônico Fixo Comutado</i>
STP	<i>Shielded Twisted Pair (par trançado blindado)</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
Tbps	<i>Terabits per second (terabits)</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.1.3	Metodologia	16
1.1.4	Justificativa	16
1.1.5	Aplicabilidade	17
2	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	18
2.1	Organização do Trabalho	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Evolução da telefonia	20
3.1.1	Telefonia analógica	21
3.1.2	Telefonia digital	23
3.1.2.1	Codecs	26
3.1.3	Telefonia móvel	28
3.1.4	VoIP (<i>Voice over Internet Protocol</i>)	31
3.1.4.1	Protocolos de uma chamada VoIP	32
3.1.4.1.1	Camada Física (L1)	32
3.1.4.1.2	Camada de Enlace (L2)	33
3.1.4.1.3	Camada de Rede (L3)	33
3.1.4.1.4	Camada de Transporte (L4)	34
3.1.4.1.5	Camada de Sessão (L5)	34
3.1.4.1.6	Camada de Apresentação (L6)	35
3.1.4.1.7	Camada de Aplicação (L7)	35
3.2	Portas físicas FXS e FXO	35
3.2.1	Porta FXS (<i>Foreign Exchange Station</i>)	36
3.2.2	Porta FXO (<i>Foreign Exchange Office</i>)	36
3.3	Firewall e Configuração para VoIP	37
3.4	Fibra óptica	38
3.4.1	Topologias	41
3.4.2	Enlaces	43
3.4.2.1	Enlaces Submarinos de Fibra Óptica	43
3.4.2.2	PTTs (Pontos de Troca de Tráfego)	43
3.5	Trabalhos Correlacionados	44

4	DESENVOLVIMENTO	45
4.1	Posto de Combustível	46
4.2	Projeto de implantação	46
4.2.1	Planejamento e análise de necessidades	50
4.2.2	Projeto de infraestrutura de fibra óptica	50
4.2.3	Implementação de banco de bateria	53
4.2.4	Atualização da infraestrutura	54
4.2.5	Configurações	54
4.2.6	Integração com a rede legada	56
4.3	Modelo de negócio	61
5	CONCLUSÃO	62
6	TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICES	67
	APÊNDICE A – CÁLCULO DE ORÇAMENTO DE POTÊNCIA (LINK BUDGET) PARA ENLACES ÓPTICOS	68
	APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DE COBERTURA E CAPACIDADE WI-FI	70

1 Introdução

A comunicação por voz sempre esteve no centro das transformações tecnológicas. Durante décadas, a telefonia fixa foi o principal recurso de contato entre pessoas e empresas. Contudo, nos últimos anos, esse modelo passou a perder relevância diante do crescimento da internet e da digitalização dos serviços. No Brasil, observa-se uma redução contínua no número de linhas fixas, acompanhando uma tendência mundial de substituição da infraestrutura tradicional por soluções mais modernas e flexíveis baseadas em IP (Agência Nacional de Telecomunicações, 2024).

Esse movimento foi acelerado pelo avanço da internet em alta velocidade, tanto fixa quanto móvel, que tornou possível transportar a voz em pacotes de dados de forma eficiente. Com isso, abriu-se espaço para o desenvolvimento de aplicações e serviços de Voz sobre IP (*VoIP*), que aliam custo reduzido, flexibilidade de expansão e integração com sistemas corporativos.

Outro fator importante foi a ampliação da conectividade em regiões remotas. Projetos de internet via satélite, como o da *Starlink*, passaram a oferecer acesso de alta velocidade em áreas antes desassistidas, permitindo que a telefonia digital alcançasse locais isolados, como comunidades amazônicas e áreas rurais do interior brasileiro. Em paralelo, os provedores regionais de internet, os chamados *ISPs*, desempenharam papel essencial no processo de massificação da banda larga. Atualmente, esses provedores respondem por mais da metade do mercado de internet fixa no Brasil, chegando a superar a participação das grandes operadoras em cidades menores e áreas periféricas.

Esse cenário alterou profundamente a forma como a sociedade e as empresas se comunicam. Se por um lado os aplicativos de mensagens ganharam espaço entre os usuários domésticos, por outro, no ambiente corporativo, eles não oferecem a robustez necessária. A ausência de integração com sistemas internos, a falta de recursos de gestão e as questões de privacidade tornam esses aplicativos insuficientes para operações críticas. É nesse ponto que o *VoIP* se destaca: além de trazer os benefícios de custo e flexibilidade, oferece funcionalidades essenciais como gravação de chamadas, relatórios, roteamento inteligente e integração com bancos de dados corporativos, consolidando-se como a solução ideal para empresas de diferentes portes.

Assim, a evolução da telefonia no Brasil reflete um processo maior de transformação tecnológica: a transição da comunicação por circuitos dedicados para plataformas digitais convergentes, nas quais voz e dados compartilham a mesma infraestrutura, garantindo maior eficiência, escalabilidade e confiabilidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo desse projeto é apresentar um caso real de implementação de *VoIP* em funcionamento, destacando a grandiosidade dessa tecnologia e o vasto potencial de mercado, que mesmo sendo uma tecnologia consolidada e que está no mercado a bastante tempo, ainda é inexplorado, especialmente em setores privados, onde a comunicação interna e externa precisa ser ágil e integrada a sistemas legados para maximizar eficiência sem grandes reformulações na infraestrutura existente.

1.1.2 Objetivos Específicos

Atender o mercado empresarial com uma solução acessível e que seja configurada de acordo com a necessidade do cliente, fazendo com que tenham benefícios pela utilização do *VoIP*.

- Diminuição do custo com telefonia;
- Aproveitar ao máximo da infraestrutura atual do cliente para realizar as configurações, evitando investimentos desnecessários e facilitando a transição híbrida de sistemas analógicos para digitais;
- Integrar com a rede legada existente, como PABX tradicionais, por meio de gateways ou ATAs, permitindo que equipamentos antigos continuem operando enquanto se introduz *VoIP* para maior escalabilidade e features modernas, como gravação de chamadas e roteamento inteligente.

1.1.3 Metodologia

A metodologia utilizada foi a qualitativa, onde foram feitas diversas visitas in loco para mapear as demandas reais do cliente, identificar gargalos na comunicação atual e avaliar como o *VoIP* poderia se encaixar sem disrupções. Durante essas visitas, foram realizadas entrevistas com colaboradores e análise de fluxos operacionais, o que revelou que os custos mensais com telefonia poderiam cair drasticamente, estimativas iniciais apontam para uma redução de até 60% após a migração.

1.1.4 Justificativa

Durante as visitas técnicas ao cliente, foi relatada insatisfação em relação ao serviço de telefonia fornecido pela operadora tradicional, principalmente devido aos altos custos praticados. Essa condição tornava a manutenção do modelo anterior financeiramente

inviável, sobretudo considerando a elevada demanda de comunicação existente no estabelecimento. Diante desse cenário, surgiu a necessidade de buscar uma alternativa que reduzisse significativamente as despesas com telefonia sem comprometer a eficiência operacional ou a usabilidade do sistema.

A telefonia, no contexto do cliente, é um recurso estratégico e indispensável. O posto de combustível funciona como um grande complexo comercial, onde diversas empresas e setores precisam manter comunicação constante entre si e com clientes externos. Qualquer solução adotada, portanto, deveria garantir continuidade, confiabilidade e simplicidade no uso, sem impor barreiras adicionais ao cotidiano dos colaboradores.

Nesse sentido, a migração para uma solução baseada em *VoIP* apresentou-se como a escolha mais adequada. Além de atender ao objetivo central de reduzir custos operacionais, essa tecnologia possibilita maior flexibilidade de expansão, integração com sistemas legados e incorporação de funcionalidades avançadas, como gravação de chamadas, roteamento automático e monitoramento. Outro ponto importante é que a adoção do *VoIP* não significou ruptura imediata com a infraestrutura já existente, mas sim uma transição gradual, onde os investimentos anteriores puderam ser preservados e aproveitados, como no caso da integração com a central analógica Intelbras Impacta por meio do ATA.

A justificativa da solução, portanto, fundamenta-se em três pilares principais: a redução expressiva dos custos de telefonia, a manutenção da qualidade e confiabilidade do serviço, e a modernização da infraestrutura de comunicação, permitindo ao cliente alinhar-se às melhores práticas do setor de telecomunicações sem comprometer a operação diária.

1.1.5 Aplicabilidade

O *VoIP* é a solução ideal para ser implantada, mostrando que existem muitas ferramentas que poderiam ser utilizadas de acordo com a exigência da contratante para o funcionamento de acordo com o desejado. Trazendo uma redução significativa do custo mensal e ainda assim, atendendo as demandas do cliente para a operação.

2 Contribuições da Pesquisa

Esta pesquisa trouxe contribuições relevantes tanto no âmbito prático quanto no acadêmico. No campo prático, o trabalho demonstrou a viabilidade de implementação de soluções de *Voice over IP (VoIP)* em um ambiente empresarial de grande porte, utilizando uma infraestrutura híbrida que integra sistemas legados e tecnologias modernas. A experiência documentada mostrou que é possível alcançar ganhos significativos de redução de custos, escalabilidade e qualidade de comunicação sem a necessidade de substituição imediata da infraestrutura existente, o que representa uma alternativa realista para empresas que buscam modernizar seus sistemas de telefonia.

Além disso, a pesquisa contribuiu com a sistematização de boas práticas para a implantação de soluções VoIP em ambientes críticos, incluindo: planejamento de rede, integração com centrais analógicas por meio de *gateways*, utilização de técnicas de redundância e balanceamento de carga, além da adoção de ferramentas de monitoramento como o Zabbix. Essa abordagem prática fornece um guia de referência que pode auxiliar profissionais de telecomunicações e gestores de TI em projetos semelhantes.

No âmbito acadêmico, este estudo reforça a importância do VoIP como objeto de pesquisa contínua, especialmente em contextos de integração entre tecnologias legadas e soluções digitais. O trabalho amplia o debate sobre a aplicabilidade de arquiteturas modulares, segurança em redes VoIP e o impacto da infraestrutura de conectividade (fibra óptica, *firewall*, enlaces redundantes) na qualidade do serviço de voz. Esta pesquisa consolidou-se como parte de um esforço contínuo de produção científica. Resultados parciais do trabalho foram publicados em eventos de relevância nacional e internacional, incluindo:

- O projeto *VoIP University Solution: VoIP UEMA Project*, apresentado no **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)** em 2024 (OLIVEIRA et al., 2024).
- O artigo *Low-Cost Communication Solution with Voice over Internet Protocol*, aceito e apresentado na **19th International Conference on Wireless Networks (ICWN)** em 2025 (OLIVEIRA et al., 2025).

Essas publicações reforçam a contribuição da pesquisa para a comunidade científica, validando sua relevância e ampliando o alcance dos resultados obtidos. Além disso, evidenciam a participação ativa dos autores na discussão acadêmica acerca das soluções de comunicação baseadas em VoIP, tanto no contexto nacional quanto internacional.

Como trabalhos futuros, destaca-se a possibilidade de desenvolver uma solução de comunicação própria, por meio da customização de um aplicativo já existente (*white-*

labeling). Essa remodelação permitiria adequar funcionalidades e identidade visual à realidade da empresa, oferecendo aos colaboradores e parceiros mais uma ferramenta integrada para comunicação e aumento da produtividade. Essa proposta abre espaço para novas pesquisas na área de integração entre telefonia VoIP e aplicações móveis corporativas.

2.1 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado em capítulos de forma lógica e progressiva, permitindo o entedimento desde sua motivação até os resultados obtidos e as propostas de continuidade. A seguir, apresenta-se a organização dos capítulos:

- **Capítulo 2 – Contribuições da Pesquisa:** Apresenta as principais contribuições do trabalho, destacando os avanços obtidos tanto do ponto de vista acadêmico quanto prático, com ênfase na implementação do sistema VoIP no posto de combustível.
- **Capítulo 3 – Fundamentação Teórica:** Reúne a base conceitual necessária para compreensão do tema, abordando a evolução da telefonia, os princípios do VoIP, protocolos envolvidos, bem como aspectos de redes, fibra óptica e segurança.
- **Capítulo 4 – Desenvolvimento do Trabalho:** Descreve detalhadamente a metodologia adotada, o ambiente de implantação, a infraestrutura utilizada e todas as etapas do projeto, desde o levantamento de requisitos até a configuração final da solução.
- **Capítulo 5 – Conclusão:** Apresenta os resultados alcançados e discute a relevância do trabalho, ressaltando os benefícios obtidos com a implementação da solução proposta e as lições aprendidas ao longo do processo.
- **Capítulo 6 – Trabalhos Futuros:** Indica possíveis linhas de continuidade e expansão do estudo, incluindo melhorias na infraestrutura, integração com novas tecnologias e o desenvolvimento de soluções personalizadas para o posto, como a remodelação de aplicativos.

3 Fundamentação Teórica

A telefonia sempre teve um papel central na comunicação humana, transformando a forma como as pessoas se relacionam desde a sua invenção. Criada por Alexander Graham Bell em 1876, ela permitiu que a voz fosse transmitida a longas distâncias, aproximando indivíduos e encurtando barreiras físicas que, até então, parecia impossível (FREEMAN, 2008). Mais do que uma inovação técnica, o telefone tornou-se um marco social: encurtou distâncias familiares, acelerou negociações comerciais e deu agilidade ao atendimento em situações de emergência.

Nos primeiros anos, o funcionamento da telefonia ainda era simples e limitado, com redes dependentes de operadores manuais para comutar chamadas entre os assinantes. Mesmo assim, seu impacto foi imediato, pois a possibilidade de falar em tempo real mudava radicalmente a lógica das comunicações, substituindo o ritmo lento das cartas ou dos telegramas. Pouco a pouco, o telefone deixou de ser apenas um objeto de curiosidade e passou a integrar a vida cotidiana, tornando-se um dos pilares do progresso econômico e social.

Com o tempo, a tecnologia evoluiu. O que começou como um sistema puramente analógico, baseado em sinais elétricos transmitidos por cabos de cobre, foi ganhando camadas de sofisticação. A digitalização da telefonia marcou um salto fundamental: aumentou a qualidade do áudio, reduziu interferências e permitiu que os sistemas se integrassem a redes de dados cada vez mais complexas. Esse processo foi decisivo para empresas, que passaram a contar com comunicações mais rápidas, estáveis e seguras, pontos críticos para setores que não podem lidar com falhas ou latência elevada.

A evolução da telefonia, portanto, não deve ser vista apenas como uma mudança tecnológica, mas como um reflexo da própria necessidade da sociedade de se comunicar com mais eficiência. Hoje, quando se fala em telefonia, não se refere apenas a aparelhos e cabos, mas a uma infraestrutura integrada, capaz de transportar voz, dados e até vídeo, com recursos que vão desde centrais automatizadas até sistemas *VoIP*. Essa trajetória evidencia como a telefonia se adaptou às novas demandas, mantendo-se sempre essencial para o funcionamento da vida em sociedade e para a dinâmica das organizações modernas.

3.1 Evolução da telefonia

A trajetória da telefonia reflete avanços tecnológicos constantes, passando de sistemas analógicos limitados a soluções digitais e *IP* que integram voz, dados e multimídia. Inicialmente dependente de circuitos dedicados, ela migrou para pacotes de dados, otimizando

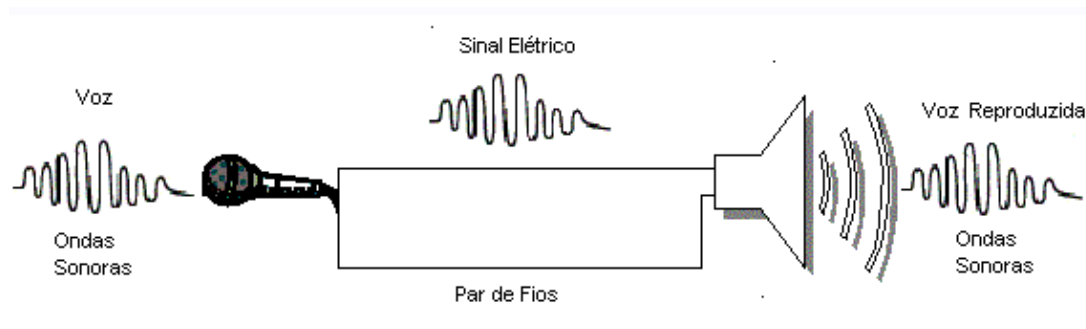
recursos e reduzindo custos.

3.1.1 Telefonia analógica

Ao decorrer dos anos, desde a sua invenção, a telefonia foi passando por avanços tecnológicos. Iniciando primeiramente com a telefonia analógica, em que utilizava sinais elétricos contínuos para transmitir a voz. Onde era necessária a operação manual dos equipamentos, como mostrado em muitas situações.

A telefonia analógica é um sistema de comunicação que utiliza sinais analógicos para transmitir voz. A voz humana é um fenômeno físico que se propaga como ondas sonoras no ar, essas ondas variam continuamente em amplitude e frequência. Na telefonia analógica, essa variação que é captada pelo microfone é convertida diretamente em um sinal elétrico equivalente, que percorre a rede de cobre até chegar ao destino, e na outra ponta, os alto-falantes transformam esses pulsos em ondas novamente. Esse sistema foi amplamente utilizado ao longo do século XX e ainda é encontrado em algumas áreas, mesmo que com o passar dos anos e com o avanço da tecnologia tenha sido em grande parte substituído pela telefonia digital na maior parte do mundo.

Figura 1 – Funcionamento da telefonia analógica.



Fonte: (Teleco, 2004)

Na telefonia analógica, como pode ser observado na Figura 1, o sinal de voz é convertido em um sinal elétrico, após a conversão, o sinal é transmitido através de cabos de cobre, coaxial ou outras infraestruturas. Para que nessa frequência tenha-se informações úteis, é necessário que o sinal seja modulado na determinada frequência e transmitido através do meio de comunicação (par trançado/cobre, coaxial ou outro meio de transmissão) até chegar ao destino desejado. Ao chegar no destinatário, o sinal precisa ser demodulado e convertido de volta para um sinal de áudio que pode ser ouvido pelo receptor (FREEMAN, 2008).

A telefonia analógica é utilizada até os dias de hoje por conta de sua simplicidade e robustez. Além disso, a qualidade do som em sistemas analógicos pode ser bastante boa,

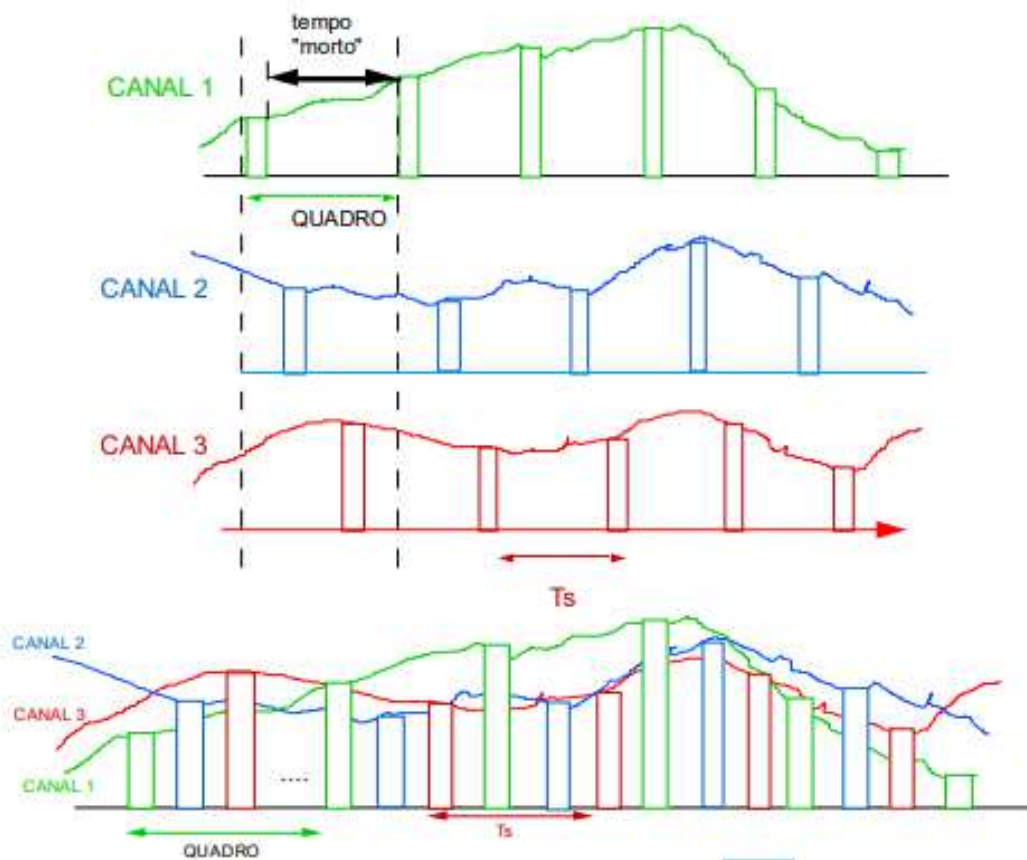
especialmente em comparação com as primeiras gerações de telefonia digital (OLIVEIRA, 2012).

No entanto, está sendo falado da primeira tecnologia da telefonia, é evidente que ela vai possuir limitações em relação às suas evoluções. Uma delas é a capacidade limitada de transmitir dados além da voz. Enquanto a telefonia analógica transmite apenas voz, os sistemas digitais podem transmitir uma quantidade muito maior de informações, como dados de vídeo e internet. Os sistemas analógicos podem ser utilizados sem problemas quando se trata apenas de comunicações de voz simples. Os sistemas analógicos são mais suscetíveis a interferências e ruídos, o que pode resultar em uma qualidade de chamada inferior em comparação com a telefonia digital em gerações mais avançadas.

Apesar de ser funcional apenas para comunicação de voz, é um feito gigantesco, foi uma grande evolução, sendo responsável diretamente no desenvolvimento das comunicações modernas e ainda, como dito anteriormente, é utilizada em algumas áreas onde a infraestrutura digital não está disponível ou não é economicamente viável e a comunicação com voz atende à demanda. No entanto, à medida que a tecnologia digital continua se tornando mais acessível e tendo melhorias, é possível que a telefonia analógica seja aos poucos substituída por sistemas digitais em todo o mundo.

Nas redes de telefonia analógica, o *TDM (Time Division Multiplex)* – multiplexação por divisão no tempo – é utilizado para otimizar, ele faz a multiplexação de várias chamadas telefônicas em um único par de fios de cobre. O *TDM* divide o tempo em intervalos fixos e alocados para cada chamada telefônica, e isso o difere do *TDMA*, em que os intervalos não são fixos, eles são alocados dinamicamente para cada usuário. Essa característica pode ser visualizada na Figura 2, onde é possível perceber como diferentes canais compartilham o mesmo meio físico em intervalos de tempo distintos, garantindo eficiência na utilização da largura de banda disponível.

Figura 2 – Multiplexação por divisão no tempo: TDM.



Fonte: (FREEMAN, 2008)

3.1.2 Telefonia digital

Com o avanço das tecnologias de comunicação, a telefonia passou por um processo de evolução que transformou a forma como a voz é transmitida e processada. Inicialmente, os sistemas eram puramente analógicos, baseados na variação contínua de sinais elétricos. Posteriormente, com a digitalização e a popularização da internet, surgiram tecnologias que convertem a voz em dados binários, transmitidos por redes digitais. Neste sistema, a voz é convertida em dados digitais antes de ser transmitida, proporcionando uma transmissão mais eficiente e confiável, além de oferecer recursos adicionais, como identificação de chamadas e correio de voz.

Ao contrário da telefonia analógica, onde os sinais de voz são transmitidos como variações contínuas de amplitude e frequência, na telefonia digital, a voz é convertida em dados digitais antes da transmissão. Isso é alcançado através da amostragem do sinal analógico. Amostragem é a primeira etapa para converter um sinal de voz, originalmente analógico, em uma sequência de dados digitais que possa ser processada e transmitida por redes digitais.

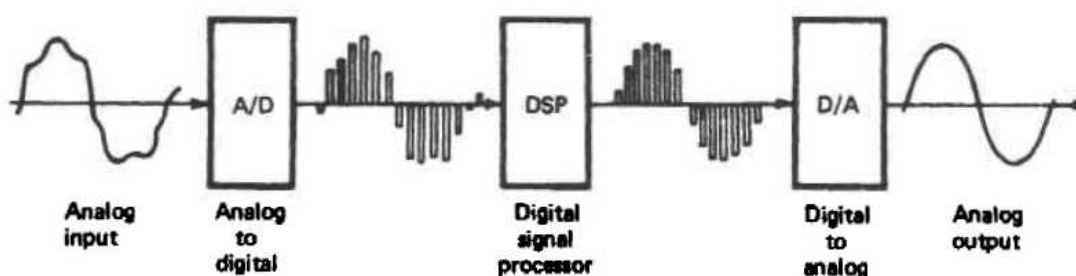
Todo o processo começa com a captação da voz por um microfone. Essa voz é

uma onda sonora contínua, que se transforma em um sinal elétrico igualmente contínuo — característico da telefonia analógica. Para integrá-lo a sistemas digitais, como redes de comutação por pacotes ou centrais telefônicas digitais, é necessário realizar a Conversão Analógico-Digital (ADC). A amostragem consiste em medir o valor instantâneo do sinal elétrico em intervalos regulares de tempo. A frequência com que essas medições são feitas é chamada de frequência de amostragem.

Na telefonia digital padrão, como especificado pela Recomendação *ITU-T G.711* (ITU-T, 1988) e fundamentado no Teorema de Nyquist-Shannon, utiliza-se uma taxa de 8 kHz, ou seja, 8 mil amostras por segundo. Essa taxa é suficiente para representar sinais de voz com frequências de até 4 kHz, que abrangem a faixa essencial para a inteligibilidade da fala humana.

Segundo o teorema, para reconstruir um sinal analógico de forma fiel a partir de suas amostras, a taxa de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência máxima presente no sinal. Por isso, com a voz humana limitada a aproximadamente 3400 Hz nas redes telefônicas, adota-se 8 kHz como frequência padrão (BELLAMY, 2000).

Figura 3 – Digitalização do sinal analógico.



Fonte: (BELLAMY, 2000)

A Figura 3 ilustra o percurso completo de um sinal de voz desde a sua forma original, analógica, até a conversão em dados digitais, passando pelo processamento digital e retornando novamente ao formato analógico na reprodução. Esse ciclo é fundamental para o funcionamento da telefonia digital e, de forma mais ampla, para qualquer sistema de comunicação que utilize *Digital Signal Processing (DSP)*.

O processo inicia-se com o sinal analógico proveniente da voz humana. Essa voz é captada por um microfone que converte as variações de pressão sonora em variações contínuas de tensão elétrica. Na telefonia analógica tradicional, este sinal poderia ser transmitido diretamente pela rede, porém, na telefonia digital, ele precisa ser convertido para o domínio digital.

O sinal de entrada é contínuo no tempo e na amplitude. Isso significa que, teoricamente, ele contém infinitas variações e detalhes, como por exemplo: a intensidade

do som, o timbre, frequência, etc., algo impossível de ser armazenado ou processado diretamente em sistemas digitais. Após a entrada, é feita a conversão do sinal analógico para digital. A etapa A/D (*Analog to Digital Converter – ADC*) executa dois processos fundamentais:

1. Amostragem

O sinal é medido em intervalos regulares, por exemplo, 8.000 vezes por segundo (8 kHz), conforme o Teorema de Nyquist-Shannon.

2. Quantização

Cada amostra é aproximada para o nível mais próximo dentro de um conjunto pré-definido. No padrão *G.711*, cada amostra é codificada com 8 bits, gerando 256 níveis possíveis.

O resultado desta etapa é uma representação discreta do sinal original, composta por valores numéricos binários. Na telefonia digital, esse fluxo de bits já pode ser multiplexado e transmitido pela rede. A próxima etapa é conhecida como o “cérebro” do sistema digital, onde é possível realizar operações como: compressão de voz, cancelamento de eco, supressão de ruído e codificação para transmissão.

Por conta disso, um dos principais benefícios da telefonia digital é a capacidade de transmitir não apenas voz, mas também uma variedade de outros tipos de dados, como texto, imagens e vídeo, usando os mesmos princípios de codificação digital. Além do que, os sinais digitais são menos sujeitos a interferências e degradações durante a transmissão, e isso resulta em uma qualidade de chamada mais consistente e melhor em comparação com a telefonia analógica.

Levantando mais benefícios da telefonia digital, pode-se citar a capacidade de compressão de dados, que permite uma utilização mais eficiente da largura de banda disponível, vale ressaltar a importância de uma melhor eficiência de largura de banda, pois está diretamente ligado a quantidade de dados que podem ser transmitidos. Essa situação fica ainda mais delicada quando se trata de ambientes onde o espectro de frequência é bastante limitado, como em redes móveis e via satélite. A compressão de dados também possibilita a transmissão de mais chamadas simultâneas sobre uma mesma infraestrutura, aumentando a capacidade do sistema. Em contrapartida, a compressão não é utilizada em todos os cenários, pois o uso do áudio *PCM (Pulse Code Modulation)*, formato de áudio digital mais básico e “puro”, exatamente como sai do processo de conversão analógico–digital, sem compressão e sem perda de informação, é amplamente adotado em situações onde a largura de banda não é um problema, garantindo uma comunicação mais clara e de alta fidelidade.

Um exemplo disso é o VoIP em redes locais (*LANs*) ou interconexões de alta capacidade, onde o uso de *PCM (G.711)* é preferido pela baixa latência, qualidade consistente e compatibilidade universal entre equipamentos.

3.1.2.1 Codecs

No contexto das comunicações VoIP (*Voice over IP*), a compressão de áudio, vídeo e imagens é viabilizada pelo uso de *codecs (codificadores/decodificadores)*, que são algoritmos capazes de converter sinais analógicos ou digitais brutos em formatos mais compactos, reduzindo significativamente a quantidade de dados necessária para transmissão. Um *codec* atua em duas etapas principais:

- **Codificação** – O sinal original (voz, vídeo ou imagem) é processado, analisando suas características e removendo informações redundantes ou irrelevantes para a percepção humana.
- **Decodificação** – No destino, o *codec* reconstrói o sinal original a partir dos dados comprimidos, tentando manter a qualidade o mais próxima possível da fonte.

No caso do áudio, *codecs* como *G.729* e *Opus* realizam compressão para economizar largura de banda, possibilitando que mais chamadas sejam transportadas na mesma rede sem perda significativa de qualidade. Para vídeo, *codecs* como *H.264* ou *VP8* reduzem a taxa de bits mantendo a nitidez, algo crucial em videoconferências (ITU-T, 2003). Já para imagens, especialmente em recursos de *video call* ou *screen sharing*, *codecs* como *JPEG* ou *WebP* são empregados para otimizar o tráfego.

O uso de *codecs* é muito utilizado porque, sem compressão, formatos de áudio *PCM (Pulse Code Modulation)* (como *G.711*) ou vídeos não comprimidos consumiriam grandes quantidades de largura de banda, limitando a escalabilidade e aumentando os custos da infraestrutura de rede. Por exemplo, enquanto um áudio *PCM* a 64 kbps exige mais largura de banda, o *G.729* pode transmitir a mesma conversa em apenas 8 kbps, e o *Opus* consegue ajustar dinamicamente entre qualidade e consumo, variando entre 6 kbps e 510 kbps.

Ao observar a tabela comparativa entre os *codecs G.711, G.729* e *Opus*, é possível identificar diferenças marcantes em aspectos como taxa de amostragem, profundidade de bits, consumo de largura de banda, latência de codificação, qualidade percebida (*Mean Opinion Score – MOS*), necessidade de processamento e aplicabilidade.

Tabela 1 – Tabela Comparativa de *Codecs* de Áudio

Característica	PCM (G.711) – Áudio não comprimido	G.729 – Áudio comprimido	Opus (modo VoIP) – Áudio comprimido
Taxa de amostragem	8 kHz	8 kHz	8 a 48 kHz (configurável)
Profundidade de bits	8 bits (A-law/ μ -law)	8 bits (codificação CELP)	16 bits (em média)
Taxa de bits do áudio	64 kbps	8 kbps	6 a 64 kbps
Consumo total com RTP/IP/Eth	~80–100 kbps	~24 kbps	~20 a 64 kbps (dependendo do modo)
Latência de codificação	<1 ms	15–20 ms	2,5 a 20 ms (dependendo da taxa)
Qualidade de voz	Muito alta (<i>MOS</i> ~4,1)	Boa (<i>MOS</i> ~3,9)	Boa a excelente (<i>MOS</i> 3,9–4,5)
Processamento necessário	Muito baixo	Médio (CELP)	Médio/Alto
Uso típico	LANs, interconexões de operadora, gravações de alta qualidade	WAN, satélite, redes com banda limitada	VoIP de alta qualidade, WebRTC, streaming de áudio

Fonte: (Cisco Systems, 2023)

- **Consumo de largura de banda**

O *G.711* utiliza 64 kbps para transportar o áudio, e, ao somar os cabeçalhos de protocolos (*RTP*, *UDP*, *IP* e *Ethernet*), o consumo total aproxima-se de 80 a 100 kbps por chamada. Essa característica o torna mais adequado para redes com banda abundante, como redes locais (*LANs*) ou enlaces dedicados de alta capacidade (ITU-T, 1988). Já o *G.729*, ao trabalhar com apenas 8 kbps para o áudio, apresenta consumo total próximo de 24 kbps, sendo extremamente eficiente em cenários de banda restrita, como links via rádio, conexões *WAN* e enlaces satelitais (ITU-T, 2007). O *Opus*, por sua vez, se destaca por ser adaptativo, podendo variar entre 6 kbps e 64 kbps, ajustando-se dinamicamente à capacidade da rede para equilibrar qualidade e uso de banda (VALIN et al., 2012).

- **Qualidade de áudio (MOS)**

O *G.711* oferece qualidade muito alta (*MOS* em torno de 4,1), já que utiliza áudio *PCM* sem compressão perceptual. O *G.729*, mesmo com taxa de bits muito mais baixa, consegue manter um *MOS* aceitável (3,9), mas com ligeira perda de fidelidade perceptível em situações críticas. O *Opus* é versátil, atingindo *MOS* acima de 4,5 em altas taxas e mantendo valores competitivos mesmo em taxas mais baixas, graças ao seu processamento avançado de voz e resiliência a perdas de pacotes.

- **Latência de codificação**

A latência de codificação é praticamente desprezível no *G.711* (<1 ms), devido à ausência de compressão complexa. No *G.729*, a codificação exige mais processamento, gerando atraso de aproximadamente 15 a 20 ms, o que, em redes já congestionadas, pode impactar a experiência de voz. O *Opus* consegue operar com latências muito baixas (a partir de 2,5 ms) em modos otimizados, mas também pode trabalhar com quadros maiores para aumentar a eficiência de compressão, o que eleva a latência.

- **Necessidade de processamento**

Por ser extremamente simples, o *G.711* demanda pouquíssimos recursos de CPU, sendo ideal para equipamentos de baixo custo ou sistemas que precisam lidar com muitas chamadas simultâneas sem sobrecarregar o *hardware*. Já o *G.729* requer processamento moderado devido à sua codificação. O *Opus* é o mais exigente em termos computacionais, pois combina diferentes algoritmos e possui modos adaptativos que requerem mais cálculos, especialmente quando operando em alta qualidade.

- **Compatibilidade e interoperabilidade**

O *G.711* é amplamente suportado por praticamente todos os dispositivos e sistemas VoIP, sendo o padrão de fato para interoperabilidade entre operadoras. O *G.729* também é bastante suportado, mas requer licença de uso em muitos casos (o que pode ser uma barreira). O *Opus*, embora cada vez mais presente, ainda enfrenta limitações de compatibilidade com sistemas legados, principalmente em centrais PABX e *gateways* de operadora.

3.1.3 Telefonia móvel

A telefonia móvel está em constante evolução. Atualmente, no Brasil, está sendo implantado o 5G e, paralelamente, já se fala em 6G ao redor do mundo, com estudos avançados e grandes investimentos do setor privado. Essa é uma das áreas mais dinâmicas e inovadoras das telecomunicações, transformando nossa forma de comunicar e interagir, além de pressionar outros mercados, como a fibra óptica, a evoluir para atender às crescentes demandas de dados móveis. Muitos usuários já abandonam a internet fixa, satisfazendo-se com a conectividade móvel, cuja flexibilidade permite estar sempre conectado, mesmo em movimento, e oferece muito mais do que voz: mensagens, acesso à internet, streaming de mídia e serviços na nuvem.

A telefonia móvel digital começou a se popularizar com o padrão GSM (*Global System for Mobile Communications*) no início da década de 1990. Nesse sistema, as chamadas de voz eram realizadas por comutação de circuitos, ou seja, cada ligação reservava um canal de rádio dedicado entre o celular e a rede durante toda a chamada.

Embora a voz fosse digitalizada, o princípio era similar ao da telefonia fixa: abrir um “circuito” exclusivo até o destino e mantê-lo ativo o tempo todo.

Além do aspecto tecnológico, também houve uma importante mudança regulatória: a migração do modelo do Serviço Telefônico Fixo Comutado (STFC) para o Serviço de Comunicação Multimídia (SCM). O STFC era regulado como serviço público, com exigências rigorosas de universalização e numerosa infraestrutura. Em contraste, o SCM, operando em regime privado, oferece voz (VoIP), dados e multimídia em uma estrutura convergente e mais flexível.

A Anatel tem avançado na harmonização regulatória. O plano de numeração do SCM já foi aprovado, integrando-se ao esquema da telefonia fixa, permitindo portabilidade entre STFC e SCM, mesmo que sua efetivação esteja prevista apenas para 2027, conforme cronograma aprovado pela agência. Essa integração facilitará a adoção da voz sobre IP como serviço fixo e estimulará um único modelo de serviço fixo, reduzindo barreiras operacionais e legais.

Essas transformações, tecnológicas e regulatórias, ilustram como o setor móvel não apenas avança em velocidade e capacidade, mas também contribui para o ajuste do ecossistema de telecomunicações brasileiro.

Esse modelo mostrou-se eficaz para garantir qualidade estável nas conversas, mas apresentava limitações significativas para o transporte de dados. Como cada canal era fixo e destinado apenas à voz, a rede não era eficiente para lidar com o tráfego de dados. Por conta disso, a internet móvel naquela época era extremamente lenta e restrita (GeeksforGeeks, 2025).

Com o avanço da demanda por internet, surgiu o 3G (UMTS no Brasil). Ele trouxe a ideia de separar a rede em dois domínios: um para voz (ainda em comutação de circuitos) e outro para dados (comutação por pacotes). Dessa forma, quando alguém fazia uma ligação, a rede reservava um canal dedicado, como no GSM. Mas quando navegava na internet, os dados eram enviados em pacotes, de forma mais eficiente, semelhante ao que já era feito na internet fixa. Nesse período, já começavam a surgir aplicativos de voz baseados em IP (como *Skype*), mas a voz oficial da operadora ainda era feita pelo caminho tradicional de circuitos.

O 4G LTE marcou uma mudança importante: ele foi projetado apenas para dados em pacotes. Isso significa que, em sua concepção, não existia mais um domínio dedicado para voz. Logo surgiu o VoLTE (*Voice over LTE*), que permitiu que a chamada fosse transmitida diretamente pela rede de dados do 4G, usando a tecnologia VoIP (*Voice over IP*). A diferença em relação a aplicativos como *WhatsApp* é que, no VoLTE, a operadora controla a chamada, garantindo qualidade de serviço, prioridade e estabilidade, mesmo em redes congestionadas (Jain, C.S., 2014).

Uma das características distintivas da telefonia móvel é a sua capacidade de fornecer comunicação sem fio através de uma rede de infraestrutura celular, em que as operadoras possuem estações de rádio base (ERB), também conhecidas como torres de celular, que são projetadas e distribuídas geograficamente para fornecer cobertura da área desejada. São muitos os aspectos levados em consideração para implantação de uma torre: altura, localização, qual tipo de rádio e antena será utilizado para que se tenha a maior eficiência possível. A ERB (Estação Rádio-Base) é o elemento fundamental da infraestrutura da telefonia móvel. É composta por antenas transmissoras e receptoras, sistemas de amplificação, processamento de sinais e equipamentos de controle.

A função principal da ERB é enviar e receber sinais de rádio para os terminais móveis (*smartphones*, modems 4G/5G, etc.) dentro de sua área de cobertura. Cada ERB está conectada a uma rede de transporte que leva o tráfego até a central da operadora.

Segundo a Resolução ANATEL nº 778/2025, as frequências destinadas a sistemas IMT no Brasil contemplam o espectro entre 700 MHz e 3,8 GHz, operando em faixas como 700 MHz, 850 MHz, 1800 MHz, 2600 MHz e, mais recentemente, 3,5 GHz (Anatel, 2025). Vale destacar, ainda, que a faixa de 700 MHz foi devolvida ao final de 2023 pela Winity, cuja prioridade original era conectar vilarejos e rodovias. Essa devolução abriu caminho para um edital previsto para o final de 2025, com foco em pequenas operadoras regionais e exigência de rede própria para evitar repetição de conflitos anteriores (DPL News, 2024). Em contrapartida, a faixa de 26 GHz, voltada ao 5G de alta capacidade (mmWave), permanece em uso pelas operadoras que a arremataram em 2021 (ANATEL, 2022).

Os dispositivos móveis se conectam às ERBs em diferentes células ao se movimentarem, tudo de forma quase imperceptível para o usuário. Paralelamente, a infraestrutura 5G brasileiro vem demonstrando performance notável em termos de download: segundo estudo da Opensignal, as velocidades médias estão em torno de 350 Mbps, muito abaixo do potencial aspirado de 1 Gbps (Opensignal, 2024). Essa discrepância indica o caminho ainda a ser percorrido para alcançar o máximo desempenho previsto para o 5G.

Como dito anteriormente, a telefonia móvel tem sido impulsionada por inovações como *beamforming*, maior largura de canal, antenas avançadas e modulações robustas, além de melhorias no *throughput* e redução da latência. Essas evoluções permitiram aplicações disruptivas como realidade aumentada, cirurgias remotas e IoT massiva, com o 5G propondo um "tripé" de alta velocidade, até 10 Gbps, latência de até 1 ms e suporte a até 1 milhão de dispositivos/km², conforme ilustrado na Figura 4.

são feitas usando a conexão de internet em vez de linhas telefônicas convencionais, proporcionando maior flexibilidade, recursos avançados e redução de custos, já que a infraestrutura utilizada vai ser a mesma da de dados, além do que, como as chamadas VoIP são transmitidas pela internet, o custo é praticamente nulo se comparado com a telefonia convencional para ligações a longa distância.

O VoIP está no dia a dia dos usuários há um bom tempo, justamente pelo fato de oferecer uma série de recursos avançados que não estão disponíveis na telefonia tradicional. Além de ser indiscutivelmente mais barato do que a telefonia convencional, tem outros diferenciais como encaminhamento de chamadas, identificador de chamadas, correio de voz visual, conferências telefônicas, dentre outros (WALLINGFORD, 2005). Esses recursos aumentam a produtividade, melhoram a experiência do usuário e aproximam as pessoas de todas as classes sociais. São esses benefícios que fazem total diferença para a implantação do VoIP no mercado privado e em diversas instituições que precisam de um serviço exclusivo.

O VoIP pode tanto substituir a telefonia convencional quanto agregar valor. Com a popularização da internet, o VoIP teve espaço para crescer. Grande parte dos usuários já utilizou um serviço VoIP até mesmo sem saber. Durante a pandemia, muitas empresas adotaram o *home office*, onde puderam continuar trabalhando e fazendo reuniões, entretanto não mais fisicamente em um escritório e sim em algum *software* que utiliza o serviço VoIP.

3.1.4.1 Protocolos de uma chamada VoIP

3.1.4.1.1 Camada Física (L1)

A camada física do modelo OSI é responsável pela transmissão dos sinais elétricos, ópticos ou de radiofrequência que representam os bits que trafegam entre dispositivos de rede. No contexto do VoIP, ela engloba o meio físico e as características do sinal que transporta as informações de voz.

Os principais meios utilizados incluem:

- *Ethernet* cabeada (100BASE-T, 1000BASE-T) – usa cabo par trançado UTP ou STP.
- Fibra óptica (1000BASE-SX, 1000BASE-LX, 10GBASE-LR) – usada para enlaces de longa distância e alta capacidade.
- *Wi-Fi (IEEE 802.11)* – transmissão sem fio em 2,4 GHz e 5 GHz.
- *xDSL* – tecnologia de banda larga via par trançado de cobre.
- Rádios ponto-a-ponto – enlaces de micro-ondas para interligar localidades.

Problemas comuns nessa camada afetam diretamente a qualidade de uma chamada VoIP, como taxa efetiva reduzida, perdas de pacotes e *jitter* causado por erros físicos. Exemplos de falhas incluem:

- Cabos defeituosos ou mal crimpados.
- Módulos *SFP* inadequados para o tipo de fibra.
- Sinal *Wi-Fi* baixo.

3.1.4.1.2 Camada de Enlace (L2)

A camada de enlace tem como função organizar e controlar o tráfego de dados entre dois dispositivos diretamente conectados, fornecendo detecção de erros e controle de fluxo.

No VoIP, protocolos comuns da camada 2 incluem:

- *IEEE 802.3 (Ethernet)* – define a comunicação em redes cabeadas.
- *VLAN 802.1Q* – adiciona uma *tag* para identificar VLANs, permitindo a separação de tráfego de voz e dados.

O cabeçalho *Ethernet* é composto por:

- *Dest MAC / Src MAC / EtherType / Tag 802.1Q (opcional) / Payload / FCS*

Campos relevantes na *tag VLAN (802.1Q)*:

- VID – VLAN ID (0–4095).
- PCP – Prioridade (0–7).
- DEI – *Drop Eligible Indicator*.

Na prática, o VoIP utiliza VLANs dedicadas para voz e marcação de prioridade PCP 5 ou 6 para pacotes RTP. Essa separação ajuda a evitar que tráfego em *broadcast* ou picos de dados prejudiquem a qualidade da chamada.

3.1.4.1.3 Camada de Rede (L3)

A camada de rede é responsável pelo endereçamento e roteamento dos pacotes entre redes distintas.

Protocolos típicos:

- *IPv4* – endereçamento de 32 bits.
- *IPv6* – endereçamento de 128 bits.
- *ICMP* – mensagens de controle e diagnóstico.

3.1.4.1.4 Camada de Transporte (L4)

A camada de transporte é responsável por garantir a entrega dos dados entre as aplicações de origem e destino.

Protocolos principais:

- *UDP* – usado para transmissões rápidas, sem confirmação de entrega, logo, é usado para RTP devido à baixa latência.
- *TCP* – usado quando é importante garantir que todos os pacotes cheguem e na ordem certa, logo, é usado para SIP quando é necessária maior confiabilidade.
- *TLS* sobre *TCP* – usado para sinalização SIP segura.

Portas comuns:

- SIP: 5060/*UDP*, 5061/*TCP (TLS)*.
- RTP/RTCP: geralmente são utilizadas as portas 10000 a 20000. RTP usa porta N, RTCP usa N+1.

3.1.4.1.5 Camada de Sessão (L5)

Responsável por iniciar, gerenciar e encerrar sessões de comunicação. No VoIP, o protocolo *SIP (RFC 3261)* é o mais usado para sinalização, definindo como e para onde a mídia será enviada.

Principais mensagens SIP:

- *REGISTER* – registro da extensão no servidor.
- *INVITE* – início de chamada.
- *ACK* – confirmação de resposta 200 OK.

Além do SIP, nesta camada também entra o *RTP (Real-time Transport Protocol)*, que é o protocolo responsável por transportar a mídia (áudio/vídeo) em tempo real. O RTP contém informações de temporização, sequência e tipo de mídia, permitindo que os pacotes de áudio/vídeo sejam reproduzidos na ordem e no tempo corretos no destino.

E como dito anteriormente, enquanto o SIP estabelece e gerencia a sessão, o RTP carrega efetivamente a voz ou vídeo usando o *codec* negociado na sinalização (por exemplo, *G.711*, *G.729*, *Opus*). O *RTCP* (*Real-time Transport Control Protocol*), que acompanha o RTP, é usado para controle e estatísticas de qualidade, como *jitter*, perda de pacotes e atraso.

O *SIP* (*Session Initiation Protocol*) gerencia sessões multimídia, com mensagens como *INVITE* e *BYE* para *setup* e término de chamadas. O *RTP* (*Real-time Transport Protocol*) transporta mídia em tempo real, com *RTCP* monitorando *QoS*. Esses protocolos garantem interoperabilidade em VoIP, essenciais para integração em redes legadas.

3.1.4.1.6 Camada de Apresentação (L6)

Trata da formatação e codificação dos dados, compressão e criptografia. No VoIP, corresponde à codificação de áudio/vídeo por *codecs*:

- **G.711** – *PCM* não comprimido.
- **G.729** – Comprimido com 8 kbps.
- **Opus** – *Codec* versátil, alta qualidade.

3.1.4.1.7 Camada de Aplicação (L7)

Onde a aplicação VoIP opera, combinando sinalização, descrição de sessão, transporte de mídia e segurança. Principais componentes:

- **SIP** – Sinalização.
- **SDP** – Descrição da sessão (*codec*, IP, portas).
- **RTP/RTCP** – Transporte da mídia em tempo real.

3.2 Portas físicas FXS e FXO

Como mostrado, com o avanço das tecnologias/novas gerações, vários *hardwares* vão ficando ultrapassados, entretanto, para evitar que sejam descartados e seja necessário mudar toda a infraestrutura existente, alguns *hardwares* são criados para fazer o papel de ponte, onde os equipamentos mais antigos, conhecidos como equipamentos legados, possam ser utilizados com as novas tecnologias.

Na telefonia, as portas FXS (*Foreign Exchange Subscriber*) e FXO (*Foreign Exchange Office*) desempenham papéis cruciais na implementação de sistemas de telefonia,

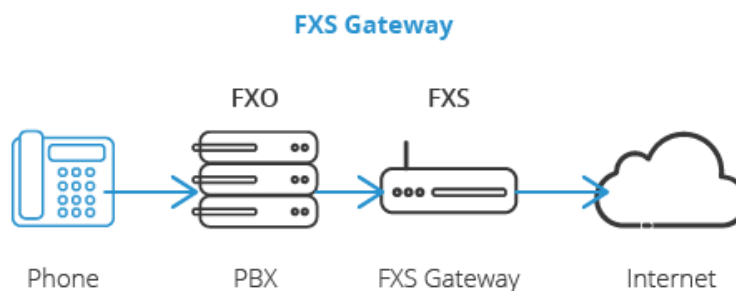
especialmente em ambientes de comunicação digital. Elas são componentes essenciais para conectar dispositivos de telefonia analógica à infraestrutura de telefonia digital, como redes VoIP ou sistemas de telefonia baseados em IP.

3.2.1 Porta FXS (*Foreign Exchange Station*)

A porta FXS é utilizada para conectar dispositivos de telefonia (telefones, *modems*, etc.) com a rede de telefonia digital.

Ela fornece a interface necessária para que esses dispositivos possam se comunicar com a rede telefônica digital, convertendo os sinais analógicos em sinais digitais. Dessa forma, dispositivos analógicos podem ser conectados a uma rede digital. Em outras palavras, o FXS é o lado da conexão que “fala” com o telefone analógico (WALLINGFORD, 2005), como pode ser observado na Figura 5, que ilustra o processo de conversão realizado pelo *FXS Gateway*.

Figura 5 – Conexão FXS.



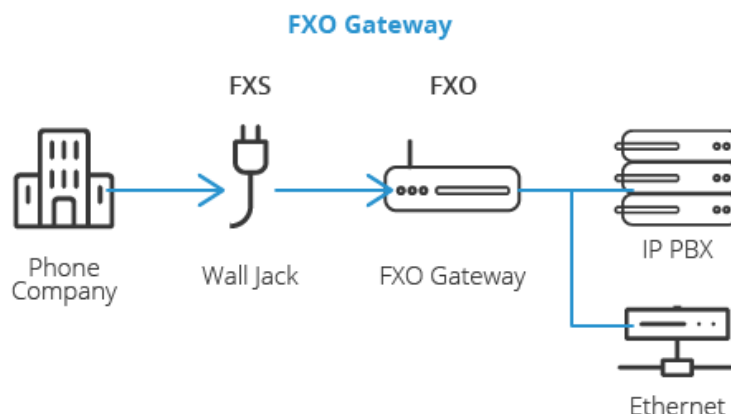
Fonte: (3CX, 2025)

3.2.2 Porta FXO (*Foreign Exchange Office*)

Por outro lado, a porta FXO é utilizada para conectar à rede telefônica digital a dispositivos externos, como linhas telefônicas tradicionais ou sistemas PBX (*Private Branch Exchange*). Ela se comporta como um assinante da comutação *Central Office* e é responsável por enviar e receber chamadas. Resumindo, o FXO é o lado da conexão que “ouve” a comutação, como ilustrado na Figura 6.

Ela fornece a interface necessária para que esses dispositivos externos possam se conectar à rede telefônica digital, convertendo os sinais analógicos recebidos das linhas telefônicas em sinais digitais compreensíveis pela rede digital.

Figura 6 – Conexão FXO.



Fonte: (3CX, 2025)

As portas FXS e FXO desempenham papéis complementares em sistemas de telefonia, permitindo a conexão de dispositivos analógicos à rede digital e a conexão de linhas telefônicas tradicionais à rede digital, respectivamente.

3.3 Firewall e Configuração para VoIP

Um *firewall* bem configurado desempenha um papel fundamental para a qualidade e a segurança no funcionamento do VoIP. Isso acontece porque a comunicação por voz sobre IP depende de protocolos em tempo real, baixa latência e disponibilidade de portas específicas. Quando o *firewall* não está corretamente ajustado, podem surgir problemas clássicos, como chamadas sem áudio, quedas inesperadas e até falhas de registro de ramais.

O *pfSense* é um *firewall open-source* baseado no sistema operacional *FreeBSD*, projetado para oferecer proteção avançada de rede com recursos como inspeção *stateful* de pacotes, NAT (*Network Address Translation*), VPNs, balanceamento de carga e QoS (*Quality of Service*), tornando-o ideal para ambientes empresariais que demandam segurança e otimização de tráfego. O *pfSense* permite regras granulares baseadas em IP, porta, protocolo e estado de conexão, o que minimiza riscos como ataques DDoS ou intrusões enquanto mantém alta performance (Netgate, 2025). Em cenários VoIP, o *pfSense* é particularmente valioso por sua capacidade de lidar com tráfego sensível à latência, configurando regras para priorizar pacotes de voz e resolver problemas comuns como *one-way audio* causados por NAT assimétrico. Sua interface web intuitiva facilita a gestão, com suporte a *plugins* como Snort para IDS/IPS e Squid para *proxy*, sendo amplamente usado em integrações híbridas, como conectar PABX legados a troncos SIP, garantindo que chamadas fluam sem interrupções em redes com múltiplos links.

Para suportar VoIP de forma eficaz no *pfSense*, é essencial liberar portas específicas

para sinalização e transmissão de mídia, configurando regras de *firewall* no menu **Firewall** > **Rules** (geralmente na aba WAN ou LAN, dependendo do *setup*). O protocolo SIP usa tipicamente as portas TCP/UDP 5060 para sinalização não segura e TCP/UDP 5061 para SIP sobre TLS (*SIPS*), que devem ser liberadas bidirecionalmente para permitir o estabelecimento de sessões. Já o RTP, responsável pelo transporte de áudio/vídeo em tempo real, opera em faixas dinâmicas de portas UDP, comumente 10000–20000. Se o *firewall* bloquear ou manipular mal esse tráfego, a chamada até pode ser completada, mas não haverá áudio de um ou dos dois lados.

A segurança também é uma preocupação central. O VoIP é alvo de ataques recorrentes, como varreduras de SIP para tentar registrar ramais falsos, ataques de negação de serviço (DoS/DDoS) que congestionam as portas UDP e até sequestro de sessões para redirecionar chamadas. Um *firewall* robusto, com regras de acesso bem definidas, uso de listas de controle (ACLs), limites de tentativas de conexão e até integração com mecanismos de detecção de intrusão (IDS/IPS), é indispensável para mitigar esses riscos.

Além da segurança, há o fator da qualidade. Para que uma chamada VoIP seja satisfatória, é necessário que a rede mantenha latência baixa (idealmente abaixo de 150 ms), *jitter* controlado (baixa variação de atraso) e perda de pacotes mínima (menor que 1 a 2%). O *firewall* pode contribuir para isso aplicando regras de QoS, que priorizam o tráfego de voz em relação a outros tipos de dados, como downloads ou *streaming* de vídeo. Dessa forma, a voz tem sempre prioridade na fila de transmissão.

O *firewall* não é apenas uma barreira de proteção: ele é um elemento vital que garante a estabilidade, a segurança e a qualidade das comunicações VoIP. Uma configuração mal feita pode inviabilizar o sistema, enquanto um ajuste adequado assegura que as chamadas ocorram com clareza, sem cortes e sem vulnerabilidades de segurança.

3.4 Fibra óptica

A fibra óptica representa uma das inovações mais transformadoras na história das comunicações, servindo como o *backbone* essencial para evolução de tecnologias como o VoIP, ao proporcionar transmissão de dados em velocidades altíssimas com mínima perda e interferência. Essa tecnologia, baseada na propagação de sinais luminosos através de fios finos de vidro, revolucionou não apenas a telecomunicação, mas também o *backhaul* de redes, o segmento que conecta acessos locais a núcleos centrais, permitindo que o VoIP funcione com baixa latência e alta qualidade de serviço (QoS), elementos cruciais para chamadas claras e sem interrupções. Em ambientes como *data centers*, a fibra óptica otimiza a interconexão de servidores, suportando volumes massivos de tráfego de voz e dados, enquanto em redes de acesso, ela evoluiu para padrões como GPON (*Gigabit Passive Optical Network*), que integram VoIP de forma eficiente, reduzindo custos operacionais e

melhorando a escalabilidade. A dependência do VoIP na infraestrutura óptica é evidente: sem uma rede de fibra robusta, problemas como *jitter*, perda de pacotes e alta latência comprometem a qualidade da voz, tornando a fibra não apenas uma opção, mas uma necessidade para o desempenho otimizado em aplicações empresariais e residenciais.

O funcionamento da fibra óptica baseia-se no fenômeno da reflexão interna total. Ao entrar no núcleo com um ângulo adequado, o feixe de luz é refletido continuamente pelas paredes do revestimento, propagando-se ao longo de grandes distâncias sem escapar. Essa característica garante baixíssima atenuação (perda de sinal), possibilitando a transmissão por dezenas ou até centenas de quilômetros sem regeneração.

A propagação da luz em uma fibra óptica pode ser compreendida a partir das equações de Maxwell na forma temporal:

$$\nabla \times \vec{h} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{e} = -\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{d} = \rho \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{b} = 0 \quad (3.4)$$

Essas quatro equações descrevem o comportamento dos campos elétricos e magnéticos em qualquer meio eletromagnético. Quando aplicadas a um meio dielétrico com simetria cilíndrica, como o núcleo de uma fibra óptica, elas resultam em equações diferenciais que possuem como solução funções de Bessel. Nesse contexto, a componente longitudinal do campo elétrico pode ser expressa como:

$$E_z(r, \phi, z) = J_n(k_c r) [A_n \cos(n\phi) + B_n \sin(n\phi)] e^{-\gamma z} \quad (3.5)$$

onde J_n é a função de Bessel de primeira espécie, k_c é a constante de propagação transversal e $\gamma = \alpha + j\beta$ é a constante de propagação longitudinal, contendo a parte real associada à atenuação (α) e a parte imaginária associada à fase (β). A escolha de J_n decorre da necessidade de os campos permanecerem finitos no centro da fibra ($r = 0$).

A partir das condições de contorno na interface núcleo-revestimento ($r = a$), obtêm-se as frequências de corte que determinam os modos suportados pela fibra. Para fibras de índice degrau, a condição de existência de apenas um modo (monomodo) está associada à raiz da função de Bessel de ordem zero:

$$\lambda_0 > \frac{2\pi a}{k_{01}} \sqrt{n_f^2 - n_c^2} \quad (3.6)$$

onde a é o raio do núcleo, n_f é o índice de refração do núcleo, n_c é o índice da casca e $k_{01} \approx 2,405$ é a primeira raiz de J_0 . Essa expressão estabelece o limite entre operação monomodo e multimodo: fibras com núcleo pequeno ou com pequena diferença de índices tendem a operar apenas no modo fundamental HE_{11} .

No caso de fibras multimodo com índice degrau, o número aproximado de modos suportados pode ser obtido por:

$$N \approx 2 \left(\frac{\pi a}{\lambda_0} \right)^2 (n_f^2 - n_c^2) \quad (3.7)$$

Essa expressão evidencia que o aumento do raio do núcleo e/ou da diferença de índices eleva o número de modos suportados, o que é característico de fibras multimodo. Assim, a aplicação das equações de Maxwell a estruturas dielétricas cilíndricas demonstra que a fibra óptica se comporta como um guia de onda circular, no qual os padrões modais e a eficiência de transmissão estão diretamente ligados às soluções matemáticas baseadas em funções de Bessel e às condições de contorno eletromagnéticas.

Essa abordagem, que mescla as equações de Maxwell com a teoria de guias de onda cilíndricos, é detalhada em livros como *Eletromagnetismo Aplicado*, de STUART M. WENTWORTH (WENTWORTH, 2013).

A implantação de redes de fibra óptica pode ocorrer de duas formas principais: por meio de cabos aéreos ou subterrâneos. Embora ambas utilizem o mesmo princípio de transmissão da luz como portadora de dados em fibras de vidro ou plástico de altíssima pureza, a forma de instalação, o tipo de proteção do cabo, o custo e a durabilidade da rede variam bastante, o que faz com que cada solução seja escolhida de acordo com a necessidade do projeto.

A fibra óptica aérea é instalada em postes, compartilhando infraestrutura com cabos de energia e telecomunicações. Por estar exposta ao ambiente, precisa de proteções adicionais que garantam resistência mecânica e tolerância às intempéries. O cabo mais comum nesse cenário é o AS (Auto Sustentado), projetado para suportar tensões de tração e não ter partes metálicas, o que o torna imune a descargas elétricas e interferências de campos eletromagnéticos. A principal vantagem da instalação aérea está no baixo custo e na rapidez de implantação, já que não exige escavação. Além disso, a manutenção é relativamente simples, permitindo substituição e expansão da rede de forma ágil. Por outro lado, a rede aérea sofre com a exposição a impactos físicos, raios, quedas de árvores, queima de postes e até vandalismo, o que aumenta o risco de rompimentos e pode afetar a continuidade do serviço. Há ainda o aspecto estético, pois grandes quantidades de

cabos suspensos geram poluição visual e além disso há custo mensal que é pago para a concessionária pela utilização dos postes.

A fibra óptica subterrânea, por sua vez, é instalada em dutos enterrados ou galerias técnicas. O cabo precisa ter características diferentes do usado em redes aéreas: é comum o uso de cabos *loose tube* ou dielétricos com blindagem, que possuem camadas de proteção contra umidade, pressão do solo, ataque de roedores e variações de temperatura. Em instalações urbanas de grande porte, é normal utilizar cabos com proteção contra esmagamento, muitas vezes com reforço de aramida ou mesmo tubos de aço corrugado para assegurar maior resistência. O custo de implantação é consideravelmente mais alto, uma vez que envolve obras civis, licenciamento e escavações, mas em contrapartida o resultado é uma rede muito mais protegida contra intempéries, furtos e acidentes externos. Outra vantagem é a preservação estética, já que não há cabos visíveis, além da maior confiabilidade para aplicações críticas como *backbones* de operadoras e interligações de *data centers*. A manutenção, no entanto, tende a ser mais complexa e demorada, pois exige abertura de poços ou galerias para acessar o cabo.

Em termos de aplicação prática, as operadoras geralmente optam por um modelo híbrido: a fibra subterrânea é usada em locais onde não existe infraestrutura aérea ou em locais de alto risco de rompimento para *backbones* e rotas troncais de alta capacidade, onde a confiabilidade é essencial, enquanto a fibra aérea é amplamente utilizada na chamada última milha, que leva a conexão até residências e empresas, equilibrando custo e qualidade. A escolha entre uma ou outra forma de instalação, portanto, depende de fatores como densidade urbana, orçamento do projeto, exigências regulatórias e nível de confiabilidade esperado.

Assim, pode-se afirmar que tanto a fibra óptica aérea quanto a subterrânea desempenham papéis fundamentais na infraestrutura moderna de telecomunicações. A primeira garante viabilidade econômica e agilidade na expansão, enquanto a segunda assegura robustez, longevidade e confiabilidade em pontos estratégicos da rede. A coexistência dessas duas modalidades é o que permite a entrega de serviços de internet em alta velocidade, telefonia e transmissão de dados de forma massiva e eficiente em praticamente todos os cenários.

3.4.1 Topologias

As topologias de rede em fibra óptica representam diferentes formas de organizar os enlaces entre os nós de uma rede, cada uma com características próprias de desempenho, custo e confiabilidade. A topologia ponto a ponto é a mais simples e direta: estabelece um enlace exclusivo entre dois equipamentos ou locais distintos. É amplamente utilizada em conexões críticas, como interligação de *data centers* ou *backhaul* de provedores, pois garante baixa latência, alta previsibilidade e segurança. Entretanto, não é escalável quando

o número de pontos interconectados cresce, pois exige um enlace dedicado para cada par de nós.

Nesse contexto, uma das tecnologias que potencializou a eficiência da topologia ponto a ponto foi o *DWDM* (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). Com ele, diversos sinais ópticos podem ser transmitidos simultaneamente pela mesma fibra, cada um em um comprimento de onda diferente, funcionando como se fossem canais independentes. Isso permite multiplicar a capacidade de uma única infraestrutura sem a necessidade de lançar novos cabos, aproveitando ao máximo os enlaces já instalados. Cada comprimento de onda pode transportar tráfego em altíssimas velocidades, chegando a centenas de gigabits por segundo.

Na prática, o *DWDM* transformou os enlaces ponto a ponto em verdadeiros corredores de alta capacidade, tornando-se indispensável na interligação de *backbones* nacionais e internacionais, bem como na conexão entre grandes centros urbanos e *data centers* estratégicos. Ele também trouxe escalabilidade: quando há aumento na demanda, basta adicionar novos comprimentos de onda ao enlace já existente, reduzindo custos e tempo de implantação. Assim, a combinação entre a simplicidade da topologia ponto a ponto e a alta capacidade do *DWDM* representa um dos pilares da infraestrutura moderna de telecomunicações, garantindo não apenas desempenho, mas também longevidade e eficiência para as redes ópticas (ANTIL; PINKI; BENIWAL, 2012).

Já a topologia em anel é bastante difundida em redes metropolitanas (*MANs*). Nela, os enlaces formam um circuito fechado entre os nós, garantindo redundância. Se houver falha em um trecho da fibra, o tráfego pode ser redirecionado no sentido oposto do anel, assegurando continuidade do serviço. Essa característica faz do anel uma das arquiteturas mais confiáveis e custo-eficientes para redes de grande porte.

Outra topologia importante é a em estrela, onde vários nós se conectam a um ponto central, geralmente um *switch* óptico ou roteador de núcleo. Esse modelo é comum em redes corporativas ou de acesso, pois simplifica a gestão e o controle de tráfego. No entanto, apresenta uma vulnerabilidade: caso o nó central falhe, todos os enlaces dependentes também ficam indisponíveis.

Por fim, existe a topologia em malha, que conecta múltiplos nós de forma redundante, permitindo vários caminhos alternativos para o tráfego. Essa estrutura é típica de grandes *backbones* nacionais e internacionais, onde a confiabilidade precisa ser máxima e a rota mais eficiente pode ser escolhida dinamicamente pelos protocolos de roteamento. Embora seja a mais robusta, a malha completa é também a mais cara de implementar, sendo mais comum o uso de malhas parciais.

3.4.2 Enlaces

3.4.2.1 Enlaces Submarinos de Fibra Óptica

A comunicação global depende fortemente das redes de fibra óptica submarinas, responsáveis por transportar mais de 99% do tráfego internacional de dados. Esses enlaces são compostos por cabos ópticos instalados no fundo do mar, conectando continentes e grandes regiões geográficas. Diferente das fibras terrestres, que ficam sujeitas a intempéries, obras civis e vandalismo, os cabos submarinos precisam de um design extremamente robusto: são protegidos por várias camadas, incluindo aço, polietileno e barreiras contra umidade, de forma a resistir à pressão oceânica, corrosão e até mordidas de animais marinhos (International Telecommunication Union, 2025).

Um cabo submarino não é apenas uma “fibra longa”, mas sim uma infraestrutura complexa com repetidores ópticos a cada 50–100 km. Esses repetidores são dispositivos alimentados por corrente elétrica transmitida pelo próprio cabo e servem para regenerar e amplificar o sinal óptico, garantindo que os dados possam percorrer milhares de quilômetros sem perda significativa. A tecnologia *DWDM* (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) é largamente utilizada nesses enlaces, pois permite multiplicar a capacidade sem necessidade de instalar cabos adicionais: cada par de fibras pode carregar dezenas ou centenas de comprimentos de onda diferentes, alcançando taxas de transmissão da ordem de terabits por segundo.

A implantação desses cabos exige navios especializados, que “deitam” a fibra no fundo do mar, mapeando previamente o relevo oceânico e desviando de zonas de risco, como áreas vulcânicas ou com movimentação sísmica. O custo é elevadíssimo: cada cabo submarino pode custar centenas de milhões de dólares, mas seu impacto é vital para o funcionamento da economia digital. Graças a eles, é possível fazer uma chamada internacional, assistir a um vídeo em *streaming* de outro continente ou mesmo interligar *data centers* globais de provedores como Google, Meta e Microsoft.

3.4.2.2 PTTs (Pontos de Troca de Tráfego)

Já em nível local e nacional, o tráfego de internet é otimizado através dos PTTs (Pontos de Troca de Tráfego), também conhecidos como *IXPs* (*Internet Exchange Points*). Estes pontos funcionam como “praças públicas” de interconexão, onde diferentes provedores de acesso (*ISPs*), operadoras e grandes empresas de conteúdo conectam suas redes diretamente.

Sem os PTTs, cada provedor teria que encaminhar todo o tráfego por links internacionais ou acordos bilaterais com outras operadoras, o que seria ineficiente e caro. Nos PTTs, a troca de pacotes ocorre localmente, reduzindo a latência, melhorando a qualidade e diminuindo custos. No Brasil, por exemplo, a rede de PTTs é coordenada pelo

NIC.br, e São Paulo possui um dos maiores *IXPs* do mundo em volume de tráfego, com picos acima de 20 Tbps (NIC.br, 2025).

Em termos técnicos, os PTTs são estruturados em *data centers* altamente redundantes, com *switches* de alta capacidade que permitem o *peering* entre dezenas ou centenas de redes. Isso significa que, se um cliente de um provedor X acessa um serviço hospedado no provedor Y, o tráfego pode fluir diretamente no PTT, sem necessidade de atravessar a infraestrutura internacional. Essa descentralização torna a internet mais resiliente e menos dependente de enlaces caros e congestionados.

3.5 Trabalhos Correlacionados

Existem vários trabalhos na linha de soluções VoIP, é um estudo que vem sendo realizado desde muitos anos e trouxe muitos benefícios desde a sua implantação até os dias de hoje. Os trabalhos correlacionados encontrados foram de grande valia para a implantação do VoIP em um ambiente empresarial, em que necessitava de um *software* modular e personalizado.

O trabalho **Telefonia de Baixo Custo (TBC) baseada no protocolo IP para a UEMA e secretarias do governo do estado (projeto VoIP UEMA)** (OLIVEIRA; RIPARDO; MORAES, 2021), mostra que a migração da telefonia convencional para o VoIP trouxe uma economia de mais 97%.

O trabalho **Design and Implementation of VoIP Based PABX Exchange through Existing Network** (SULTAN et al., 2005), traz a integração do VoIP com o PABX, mostrando a diminuição dos custos e, também, a possibilidade de utilizar o VoIP com a rede legada, trazendo uma atualização para a tecnologia.

No trabalho **Uma arquitetura modular de hardware e software para PABX VoIP baseado em Asterisk** (CUNHA et al., 2012), remetendo a outras possibilidades de atendimentos personalizados, mostra-se o desenvolvimento de uma central modular PABX VoIP baseada em Asterisk, corroborando com a ideia do projeto de uma configuração personalizada de acordo com a necessidade do cliente.

4 Desenvolvimento

No projeto de implementação da telefonia *VoIP* no posto de combustível, a primeira etapa consistiu em um levantamento minucioso da infraestrutura existente e na análise detalhada dos requisitos apresentados pela contratante. Esse processo inicial foi decisivo para compreender as reais necessidades de comunicação do empreendimento e, ao mesmo tempo, identificar os recursos tecnológicos já disponíveis que poderiam ser aproveitados. Trata-se de uma etapa essencial em qualquer projeto de telecomunicações, pois garante que a solução proposta seja construída sobre bases sólidas, evitando desperdícios e assegurando alinhamento entre a expectativa do cliente e as possibilidades técnicas.

A partir desse diagnóstico, foi possível propor a adoção de uma solução baseada em *PABX IP*, tecnologia que se mostrou a mais adequada para o contexto do posto. Essa escolha não se restringiu apenas à modernização tecnológica, mas também levou em consideração fatores como a escalabilidade, a compatibilidade com padrões atuais de comunicação, como o *SIP Trunking*, e a capacidade de oferecer recursos avançados que não estariam disponíveis em uma central analógica convencional. Com o *PABX IP*, o estabelecimento ganhou a possibilidade de integrar voz e dados em uma única plataforma, permitindo a expansão do sistema de forma modular, sem a necessidade de investimentos pesados em substituições futuras.

Outro aspecto relevante foi a questão financeira. A telefonia *VoIP* não apenas contribui para a redução dos custos operacionais com chamadas locais e de longa distância, como também melhora a eficiência na gestão das comunicações internas. Além disso, o *VoIP* elimina a dependência de soluções proprietárias das operadoras, trazendo maior autonomia para o cliente e liberdade de escolha em futuras expansões ou mudanças de fornecedor.

Durante o levantamento, foram catalogados os equipamentos já em operação no posto, incluindo servidores, *switches*, roteadores e demais ativos de rede. Esse mapeamento revelou que grande parte da infraestrutura poderia ser reaproveitada no novo projeto, reduzindo de forma significativa o custo de implantação. A estratégia de reutilizar os recursos existentes também teve impacto direto no tempo de execução, já que evitou alterações estruturais complexas e diminuiu a indisponibilidade dos serviços durante a transição.

Com base nesse estudo inicial, o projeto avançou com um planejamento detalhado, pautado em escolhas técnicas fundamentadas e em uma visão de continuidade operacional. Esse cuidado assegurou que a migração para a telefonia *VoIP* pudesse ocorrer de forma segura, eficiente e com impacto mínimo na rotina do posto, ao mesmo tempo em que

estabeleceu uma base tecnológica robusta para sustentar futuras evoluções no sistema de comunicação.

4.1 Posto de Combustível

Com o intuito de preservar a identidade da empresa analisada, neste trabalho será adotada a denominação genérica “Posto de Combustível”. Trata-se de um dos maiores complexos do gênero no Brasil, com papel estratégico não apenas no abastecimento de veículos, mas também na oferta de serviços integrados a milhares de motoristas e clientes que circulam diariamente por suas instalações. O posto se destaca pela capacidade de atender simultaneamente mais de mil caminhoneiros, funcionando como um verdadeiro polo de apoio logístico para o transporte rodoviário de cargas no país.

Sua estrutura não está limitada ao fornecimento de combustíveis. Pelo contrário, o local foi concebido como um espaço multifuncional, com características que o aproximam de um *shopping center*, oferecendo comodidade, conforto e soluções diversificadas para diferentes perfis de usuários. Entre os serviços disponibilizados, destacam-se o serviço de triagem, onde os caminhoneiros aguardam a autorização para carga e/ou descarga, onde se é feito, também, a limpeza do caminhão, pois é obrigado que esteja limpo para que possa ser recarregado. Enquanto aguardam o tempo de autorização que pode chegar a dias, o caminhoneiro pode aproveitar várias atividades no complexo, como: supermercado, o amplo pátio de estacionamento para veículos de grande porte, áreas de lazer, barbearia, oficina mecânica e uma variedade de restaurantes.

Essa diversidade de serviços, associada à elevada demanda de usuários, reforça a necessidade de uma infraestrutura de telecomunicações moderna, eficiente e escalável. Em locais dessa dimensão, onde circulam diariamente milhares de pessoas e onde atuam diversas empresas parceiras, a comunicação ágil e confiável é um fator crítico para a coordenação das atividades. Nesse sentido, a implantação de um sistema de telefonia *VoIP* surge como solução estratégica para integrar setores, reduzir custos e assegurar qualidade no atendimento, tanto para colaboradores internos quanto para clientes e fornecedores.

4.2 Projeto de implantação

No local, como mencionado, existem várias empresas, e um *data center* é responsável pela comunicação entre elas. No *data center*, foi feita a implantação de um *rack* de servidores e instalado um servidor Dell PowerEdge R710 com SSD de 500 GB e 32 GB de memória RAM para criar máquinas virtuais. Uma das máquinas criadas foi para a implantação do *VoIP*, outra para o *firewall* e outra para o *Zabbix*. O *Zabbix* é muito importante para a visualização dos links de internet que é um fator crucial para o funcionamento do *VoIP*.

No complexo em questão, além das atividades comerciais e de serviços já descritas, existem diversas empresas do grupo que compartilham a mesma estrutura física, o que torna a internet um fator essencial para a operação eficiente do ambiente. Para atender a essa demanda, foi estruturado um *data center* centralizado, responsável por gerenciar e interligar os sistemas de tecnologia da informação e telecomunicações utilizados por todas as unidades do posto.

Neste *data center*, foi implantado um *rack* de servidores dedicado, onde foi colocado o servidor Dell PowerEdge R710. Esse equipamento foi escolhido por sua robustez e confiabilidade, além de oferecer a capacidade necessária para suportar múltiplas máquinas virtuais, otimizando a utilização dos recursos de *hardware* disponíveis.

Foram criadas máquinas virtuais específicas para funções críticas da operação. Uma delas foi destinada ao sistema de *VoIP*, núcleo da comunicação digital que garante a integração entre ramais internos e o tráfego externo por meio do *SIP Trunk*. A outra máquina foi configurada para o *firewall*, elemento indispensável para a proteção do ambiente de rede, responsável por controlar o tráfego, estabelecer políticas de segurança e assegurar a integridade dos dados transmitidos. Por fim, uma máquina foi implementada com o *Zabbix*, uma plataforma de monitoramento de redes e serviços.

A utilização do *Zabbix* assume um papel estratégico, pois possibilita o acompanhamento em tempo real dos links de internet utilizados pelo posto de combustível. Considerando que a estabilidade e a disponibilidade da conexão são fatores determinantes para o bom funcionamento da telefonia *VoIP*, o monitoramento contínuo permite a identificação imediata de falhas ou degradação do serviço. Dessa forma, é possível agir de forma proativa, garantindo que o sistema de comunicação mantenha a qualidade necessária para atender às altas demandas do complexo, mesmo em cenários de sobrecarga ou falhas em determinados provedores, pois como pode ser observado na Figura 7, há uma grande quantidade de racks e equipamentos no complexo.

Essa arquitetura modular e baseada em virtualização não apenas garante eficiência no uso dos recursos, como também aumenta a flexibilidade da infraestrutura, permitindo futuras expansões ou adaptações conforme novas necessidades surjam.

Figura 7 – Rack de telecomunicações.



Fonte: Autor.

No início do projeto, foi realizado um levantamento de requisitos técnicos e operacionais que evidenciou a necessidade de uma arquitetura de rede robusta e adaptável. A análise mostrou que seria indispensável a implantação de uma rede em anel com abordagem dupla, de forma a oferecer redundância física e lógica, minimizando o risco de falhas de comunicação em caso de rompimento de cabos ou problemas em equipamentos no meio do percurso. Esse tipo de topologia garante que, mesmo diante de uma interrupção em um ponto da rede, o tráfego possa ser redirecionado automaticamente pelo caminho alternativo, preservando a continuidade dos serviços. Além disso, constatou-se a importância da utilização de múltiplas conexões de internet, não apenas para ampliar a capacidade de tráfego, mas também para viabilizar estratégias de *balanceamento de carga* e recuperação rápida em situações de falha de um ou mais provedores.

Esse aspecto é particularmente relevante porque a qualidade da internet se consolidou como elemento central para o pleno funcionamento dos serviços atuais, especialmente no

caso da telefonia *VoIP* (*Voice over Internet Protocol*). Ao contrário da telefonia tradicional, que se apoia em circuitos dedicados para cada chamada, o *VoIP* transmite a voz em forma de pacotes de dados por meio de redes *IP*. Isso proporciona flexibilidade e redução de custos, mas exige que a rede seja estável, com baixa latência, *jitter* controlado e mínima perda de pacotes. Quando a conexão não apresenta esses requisitos, os efeitos são perceptíveis de imediato pelos usuários, na forma de atrasos, ecos, cortes ou até mesmo quedas nas ligações, o que compromete diretamente a experiência e a confiabilidade do sistema.

Diante disso, ficou claro que, para atender às demandas de um ambiente empresarial de grande porte e de uso intenso como o analisado, não bastava apenas contar com um único *link* de internet de alta velocidade. Era essencial estruturar um conjunto de soluções de ponta, combinando redundância de enlaces, balanceamento inteligente e monitoramento constante, de forma a evitar interrupções que poderiam impactar negativamente não apenas a telefonia, mas também outros serviços críticos dependentes da conectividade, na Figura 8, pode ser visto o funcionamento dos 3 *links* de internet, se está tendo perda de pacote e também a utilização de banda dos *links*.

Figura 8 – Monitoramento dos *links*.



Fonte: Autor.

É amplamente sabido no setor de telecomunicações que existem inúmeras variáveis capazes de interferir no bom desempenho de uma infraestrutura de rede: desde falhas físicas nos cabos até problemas de configuração, sobrecarga em equipamentos ou incidentes externos relacionados a fornecedores de internet.

Por essa razão, cada etapa do projeto foi planejada, junto aos gestores do posto, com o objetivo de mitigar riscos e reduzir ao máximo as chances de indisponibilidade. O resultado foi uma abordagem sistemática e organizada, em que o levantamento inicial, a definição das soluções técnicas e a execução prática seguiram uma ordem cronológica cuidadosamente desenhada para garantir eficiência e confiabilidade em todas as fases da implantação.

Toda essa configuração e ajustes foram feitos durante a operação em total funcionamento,

então foi muito importante a organização, sendo requisitadas janelas de manutenção, avisos para os colaboradores que repassavam para os clientes. Todo esse zelo e utilização de boas práticas fez com que cada etapa fosse sendo concluída de forma satisfatória.

4.2.1 Planejamento e análise de necessidades

Inicialmente, conduzimos uma análise detalhada das necessidades de comunicação do posto de combustível, considerando o tamanho do complexo, o número de funcionários, as áreas de serviço e as demandas de tráfego de voz e dados. No projeto de implantação do VoIP no posto de combustível, adotamos uma abordagem estruturada e cronológica, começando pelo levantamento inicial e avançando para configurações técnicas avançadas, garantindo minimização de indisponibilidades e máxima utilização da infraestrutura existente. Com base nas demandas identificadas, como comunicação interna entre mais de 100 colaboradores dispersos em áreas como abastecimento, hotel e manutenção, e externas via SIP Trunking para chamadas com fornecedores, priorizamos soluções híbridas que integram o PABX legado (Intelbras Impacta 220) ao novo sistema VoIP, reduzindo custos em até 60% e melhorando a escalabilidade. Essa estratégia segue melhores práticas de migração gradual, evitando indisponibilidade total. Foi verificado todos os ativos e passivos da empresa com o intuito de elaborar um modelo específico e modular para o cliente.

4.2.2 Projeto de infraestrutura de fibra óptica

Com base nas necessidades identificadas, foi projetada uma infraestrutura de fibra óptica para fornecer conectividade de alta velocidade e confiabilidade em todo o complexo do posto de combustível.

O projeto de implantação da infraestrutura de fibra óptica teve início com o lançamento de um cabo de 48 fibras a partir do *data center* principal, onde foi instalado um DIO (distribuidor interno óptico) de mesma capacidade, permitindo a adequada organização e terminação dos enlaces. A saída do cabo do *data center* foi realizada através de um percurso subterrâneo, garantindo maior proteção e segurança nessa primeira etapa crítica.

Após o trecho subterrâneo, o cabo seguiu até um poste, onde nele possui uma tubulação de aço galvanizado, formando uma subida lateral que assegura tanto a proteção mecânica do enlace quanto a conformidade com normas de segurança para instalações expostas. Neste mesmo poste foi posicionada uma Caixa de Emenda Óptica (CEO) de distribuição, que se tornou o ponto estratégico para ramificação e continuidade da rede.

sempre atualizado. Ele indica a capacidade disponível por bandeja e por porta, ajuda a decidir onde ligar novos clientes, onde criar redundância e quando será preciso ampliar a caixa ou lançar mais cabo. Também facilita a vida do time de *backoffice*: o desenho vira documentação oficial (*as-built*), conversa com o inventário e com os sistemas de gestão, e registra o histórico de mudanças. Resultado: mais organização, mais previsibilidade e uma rede que cresce sem virar um labirinto.

A partir da CEO, foram lançados trechos de cabo em modalidades tanto subterrâneas quanto aéreas, compondo o anel óptico planejado. Essa combinação de abordagens garante maior versatilidade, aproveitando a infraestrutura já existente em alguns trechos e reforçando a proteção em áreas críticas.

Cada ponto de distribuição da rede foi equipado com equipamentos Mikrotik, cada um deles dispondo de cinco portas SFP, de modo a possibilitar conexões redundantes. Com isso, assegurou-se que cada ponto fosse atendido por no mínimo duas abordagens distintas, resultando em uma topologia de dupla abordagem real. Essa configuração proporciona maior resiliência, uma vez que, em caso de falha em um dos caminhos, o tráfego é automaticamente redirecionado pelo enlace alternativo.

No *data center*, foram contratados três *links* dedicados de diferentes empresas, devidamente configurados em *failover*, o que elimina a dependência de um único provedor e reduz drasticamente o risco de indisponibilidade. Da mesma forma, as empresas integrantes do anel recebem conectividade a partir de diferentes rotas físicas, o que consolida a confiabilidade da solução implantada.

Esse desenho de rede, aliado ao uso de fibras ópticas de alta capacidade e à correta distribuição de pontos de redundância, garante não apenas disponibilidade e estabilidade, mas também condições adequadas para o tráfego de serviços críticos, como o VoIP, que exige baixa latência e alta qualidade de transmissão.

Figura 10 – Anel óptico.



Fonte: Autor.

Conforme a Figura 10, pode-se observar o desenho do anel de fibra óptica que conecta todos os pontos chave do posto, garantindo redundância e capacidade de recuperação em

caso de falha em qualquer segmento da rede.

4.2.3 Implementação de banco de bateria

Devido à importância da continuidade do serviço, uma etapa muito importante da implantação da infraestrutura foi a adição da retificadora e dos bancos de bateria, que fornecem um *backup* para o fornecimento de energia. Essa solução foi concebida com o objetivo de evitar que eventuais quedas no fornecimento de energia elétrica comprometessem a operação dos serviços essenciais, em especial o travamento de *switches* ou até mesmo a possibilidade de danificar permanentemente equipamentos críticos que compõem a infraestrutura do *data center*, o que acarretaria em indisponibilidade em todos os pontos importantes para o bom funcionamento do complexo, como o VoIP e a internet.

A decisão por incluir esse recurso partiu da compreensão de que, em ambientes empresariais com elevado fluxo de comunicação e dependência tecnológica, mesmo curtos períodos de indisponibilidade podem acarretar prejuízos significativos tanto no aspecto financeiro quanto na qualidade percebida pelo cliente.

O banco de baterias foi dimensionado de forma a oferecer uma autonomia adequada, garantindo suporte ao funcionamento dos equipamentos durante períodos prolongados de falta de energia. Para isso, foram escolhidas baterias de alta capacidade e elevada eficiência energética, aptas a entregar energia estável e confiável em situações de contingência. O processo de dimensionamento levou em conta a soma das cargas críticas que deveriam permanecer ativas, entre elas o servidor que hospeda as máquinas VoIP e *firewall*, o *switch* principal e o NVR para armazenamento das imagens das câmeras. Além disso, foi necessário calcular a margem de segurança, assegurando que as baterias não operassem em seu limite máximo e, conseqüentemente, tivessem maior durabilidade e vida útil.

Outro aspecto fundamental foi a integração desse banco de baterias com o sistema de energia ininterrupta (*UPS/No-Break*), permitindo que a comutação entre a rede elétrica principal e a fonte de *backup* ocorresse de maneira automática e imperceptível para os usuários finais. Isso assegura que, mesmo em caso de uma queda abrupta da energia comercial, as chamadas VoIP, a transmissão de dados e o funcionamento da rede não sofram interrupções.

Além da segurança operacional, a implementação do banco de baterias trouxe benefícios em termos de resiliência e confiabilidade da infraestrutura. O fato de contar com uma fonte de energia redundante amplia a disponibilidade do serviço e reduz o risco de falhas, aspecto crucial para um sistema cuja finalidade é atender milhares de clientes diariamente e interligar diversos setores de forma contínua.

Essa redundância energética foi pensada como parte de uma arquitetura mais ampla de alta disponibilidade, que também inclui múltiplos *links* de internet dedicados,

balanceamento de carga, topologia de rede em anel e equipamentos configurados com dupla abordagem.

4.2.4 Atualização da infraestrutura

Para garantir o desempenho e a confiabilidade do sistema VoIP, foi realizada a atualização dos servidores de comunicação para modelos mais robustos e eficientes.

Foram colocados novos *racks*, separando equipamentos de telecomunicação e os servidores.

Houve a configuração dos novos servidores para suportar as demandas de tráfego de voz e dados, implementando medidas de segurança e gerenciamento de rede para garantir o funcionamento adequado do sistema.

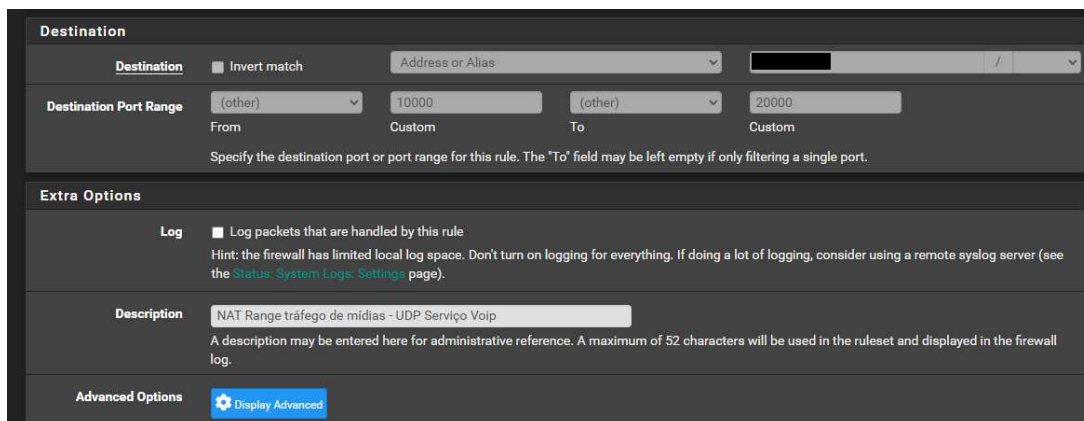
4.2.5 Configurações

Após toda a infraestrutura da rede concluída para atender às demandas da contratante e para viabilizar a implantação do VoIP, começou a configuração das máquinas virtuais, utilizando o *VMware*. Foram criadas máquinas virtuais para hospedar o sistema de PBX baseado em software de código aberto, sendo atribuídos recursos de *hardware* adequados, como CPU, RAM e armazenamento, para garantir o desempenho ideal do sistema e sua capacidade de atender à demanda de chamadas VoIP no Posto de Combustível. O sistema foi instalado na máquina virtual conforme as instruções do fornecedor e configurado de acordo com as necessidades específicas do posto de combustível.

Foram definidos os parâmetros de rede, configurando endereços IP estáticos e ajustando as configurações de rede para garantir a conectividade adequada com a infraestrutura de telecomunicações e os dispositivos VoIP.

O *firewall*, além das regras exigidas pela contratante, foi muito útil para proteger o sistema de ataques externos e garantir a segurança da rede VoIP. Foram criadas políticas de *firewall* para permitir o tráfego necessário ao VoIP, liberando as portas *SIP* (*Session Initiation Protocol*) e *RTP* (*Real-time Transport Protocol*), e bloqueando acessos não autorizados. As liberações das portas UDP podem ser observadas na Figura 11.

Figura 11 – Liberação de portas no firewall para tráfego UDP.



The screenshot shows a firewall rule configuration window. The 'Destination' section is expanded, showing 'Destination Port Range' set from 10000 to 20000. The 'Log' checkbox is checked. The 'Description' field contains 'NAT Range tráfego de mídias - UDP Serviço Voip'. The 'Advanced Options' section is collapsed.

Section	Field	Value
Destination	Destination	[Address or Alias]
	Destination Port Range	From: 10000, To: 20000
Extra Options	Log	<input checked="" type="checkbox"/> Log packets that are handled by this rule
	Description	NAT Range tráfego de mídias - UDP Serviço Voip
Advanced Options	Display Advanced	<input type="button" value="Display Advanced"/>

Fonte: Autor.

Para finalizar a configuração do VoIP, foi necessário entrar em contato com a provedora de internet que fornece o *link* dedicado para o Posto, solicitando informações essenciais, como endereços IP, credenciais de autenticação SIP e detalhes de configuração do tronco SIP para fazer a conexão entre o PBX e a rede pública de telefonia.

Figura 12 – Configuração telefone VoIP.



The screenshot shows the configuration page for an account named 'Account1'. The 'Register Status' is 'Registered' and 'Line Active' is 'Enabled'. The 'SIP Server 1' is configured with host 'sip: [redacted]' and port '50777', transport 'TLS', server expires '3600', and server retry counts '3'. The 'SIP Server 2' is configured with host '[redacted]' and port '5060', transport 'UDP', server expires '3600', and server retry counts '3'.

Field	Value
Account	Account1
Register Status	Registered
Line Active	Enabled
Label	
Display Name	Hotel
Register Name	Hotel
User Name	0000
Password	*****
SIP Server 1	
Server Host	sip: [redacted] Port 50777
Transport	TLS
Server Expires	3600
Server Retry Counts	3
SIP Server 2	
Server Host	[redacted] Port 5060
Transport	UDP
Server Expires	3600
Server Retry Counts	3

Fonte: Autor.

Inserindo os dados fornecidos pela provedora, conforme a Figura 12, o *SIP Trunk* foi configurado no PBX. Após isso, foram realizados testes de conectividade para garantir que a comunicação VoIP estivesse funcionando corretamente.

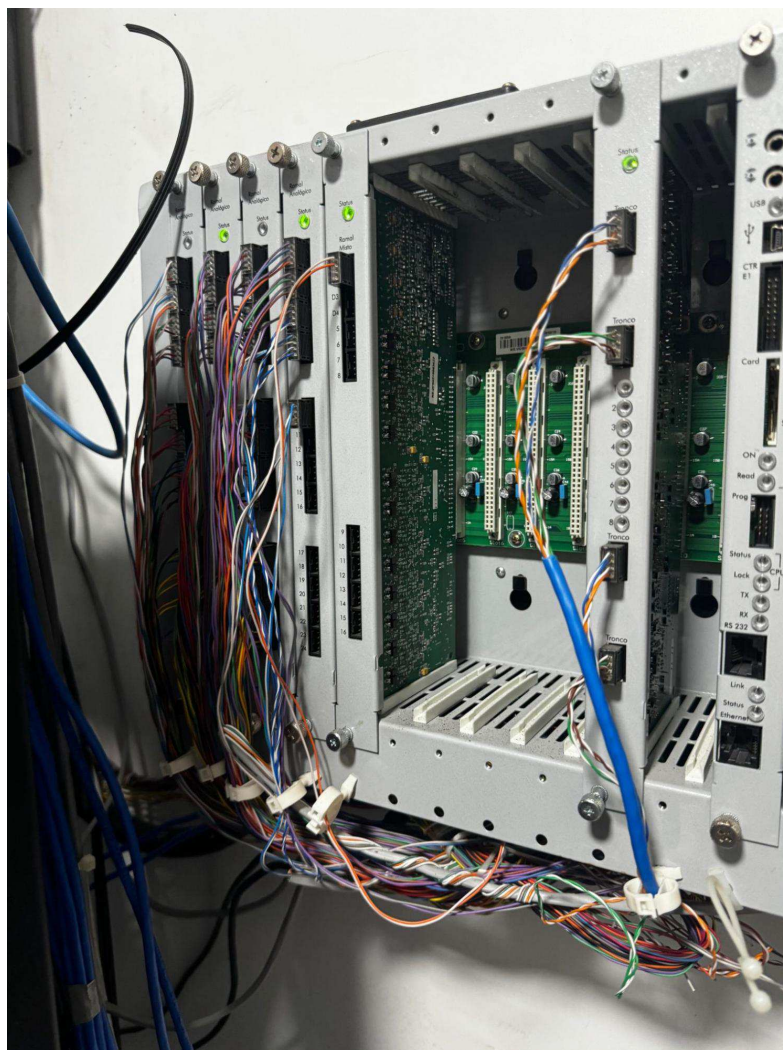
Essas etapas garantiram a configuração adequada do sistema VoIP no posto de combustível, assegurando sua funcionalidade, segurança e conectividade com a provedora de internet e a rede pública de telefonia.

4.2.6 Integração com a rede legada

Um dos grandes desafios enfrentados durante a implantação do sistema VoIP no posto de combustível foi a necessidade de integrar a nova infraestrutura digital à central telefônica analógica já existente, a *Intelbras Impacta 220*. Essa central, embora confiável e amplamente utilizada, opera em um modelo tradicional de comutação analógica, enquanto o VoIP é baseado em protocolos digitais sobre redes IP.

A solução adotada para realizar essa integração foi a utilização de um *ATA (Analog Telephone Adapter)*, responsável por fazer a ponte entre os dois mundos tecnológicos: o analógico e o digital.

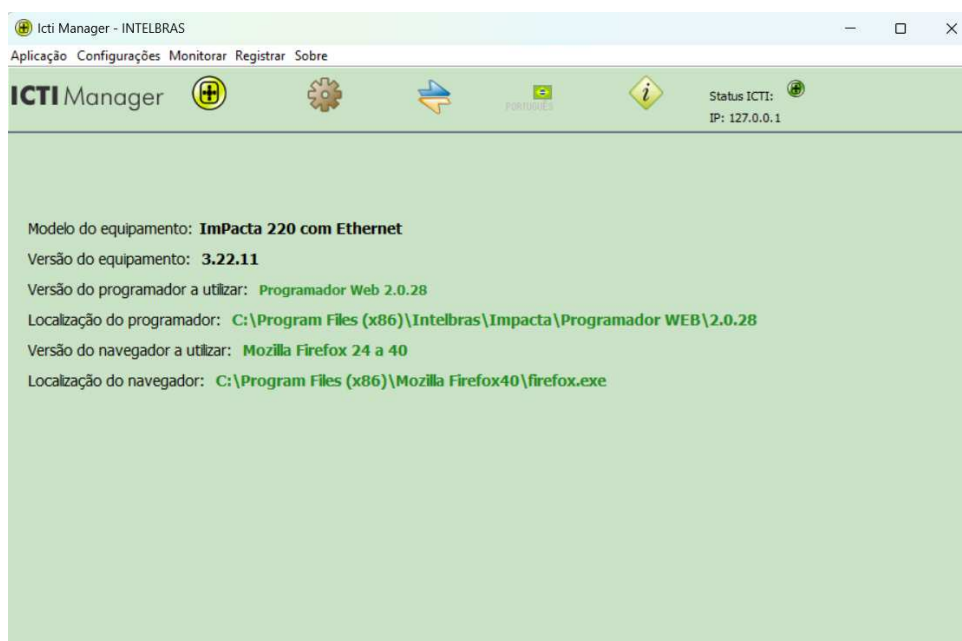
Figura 13 – Central PABX.



Fonte: Autor.

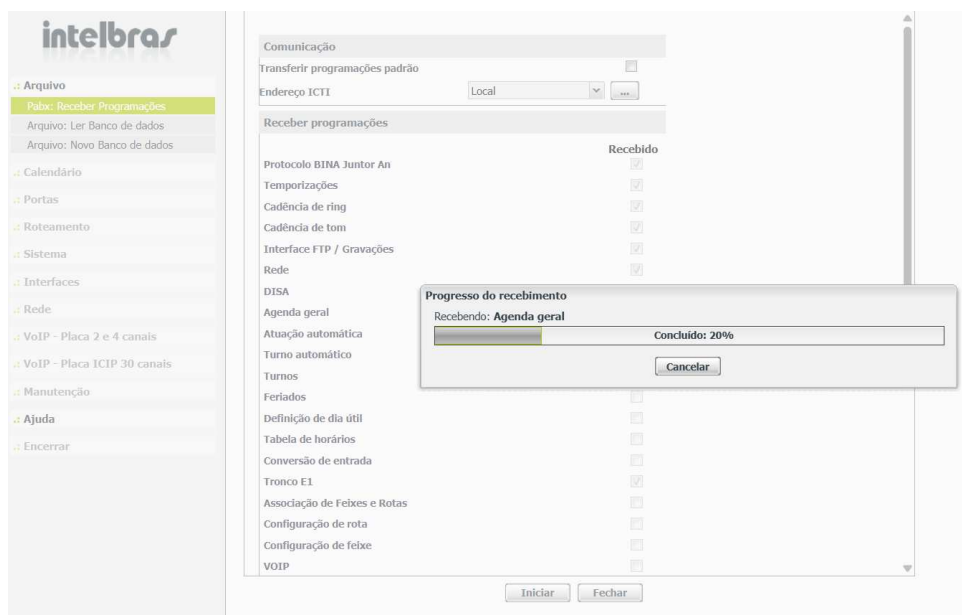
O trabalho começou pela central legada Intelbras *Impacta*, porque era ela que ditava a numeração interna, as classes de serviço e o modo como as chamadas eram encaminhadas no ambiente antes da migração. Para ter acesso administrativo à central, foi instalado o *iCTI Manager* no computador de gestão. Esse software cria a sessão local de gerenciamento e expõe a interface via navegador, acessível em <http://127.0.0.1>. Foi necessário a utilização do *Mozilla Firefox* para oferecer compatibilidade, pois se trata de uma central antiga, inclusive é necessário utilizar uma versão bem antiga do Firefox para que funcione.

Figura 14 – Configuração da central iCTI Manager.



Fonte: Autor.

Com o *iCTI Manager* instalado e a sessão aberta no *Firefox*, o primeiro cuidado foi executar um *backup*, o *download* do banco de dados da *Impacta*, como pode ser observado na Figura 15. Esse cuidado inicial garantiu ponto de retorno e serviu como base de comparação após as alterações. Em seguida, foi feita uma varredura do estado atual: lista de ramais, plano de numeração, *juntões*/linhas externas, permissões de chamada e qualquer regra de roteamento já existente. O registro do funcionamento do ambiente ajudou a decidir a topologia de integração com o *VoIP* e a evitar impactos indesejados no dia a dia do cliente.

Figura 15 – *Download* do banco de dados da central.

Fonte: Autor.

Definida a abordagem, passou-se à preparação da Impacta para conversar com o ATA. O objetivo era que a central enxergasse o ATA como “linhas” disponíveis para saída/entrada, enquanto, do outro lado, o ATA levaria essas chamadas para o PBX IP pela rede. Na prática, foram reservadas portas na Impacta para receber o “tom” do ATA, mantendo o plano de discagem e as permissões em conformidade com as políticas do cliente.

Com a Impacta preparada, seguiu-se para a ligação física do ATA, Figura 16. O equipamento foi conectado à rede de dados pela porta *Ethernet*, conectado ao switch e, no lado analógico, às portas da Impacta previamente destinadas à integração. Essa amarração é o que efetivamente cria a “ponte” analógico <-> IP: o ATA fornece linha (tom, voltagem e sinal) às interfaces da central e, ao mesmo tempo, converte o áudio analógico em pacotes RTP na rede.

Figura 16 – ATA.



Fonte: Autor.

Em seguida, abriu-se a interface web do ATA para a parametrização. Primeiro, os endereços de rede: IP estático, máscara, gateway e DNS, garantindo que o ATA enxergasse o PBX IP no *data center*. Depois, a sessão SIP para cada porta analógica (FXS) que faria a conversão para IP. Para cada porta, foi criado um perfil SIP com:

- **Servidor/Proxy SIP:** IP do PBX;
- **Porta de sinalização:** 5060 (*UDP* ou *TCP*, conforme política);
- **Credenciais (usuário/senha):** os ramais previamente criados no *Asterisk/FreePBX*;
- **Codecs:** G.711 μ -law/A-law como padrão, priorizando compatibilidade e áudio sem compressão;
- **DTMF:** configurado como *RTP Events (RFC 2833/4733)* para evitar falhas em URAs;
- **Faixa RTP:** coerente com o PBX (ex.: *UDP 10000–20000*), preservando simetria de *NAT/firewall*;

Com os perfis salvos, o registro dos ramais do ATA apareceu como *Registered* no PBX, como pode ser visto na Figura 17. A partir daí, cada porta analógica passou a representar, do ponto de vista do *Asterisk/FreePBX*, um *endpoint SIP* capaz de originar/receber chamadas e de entregar/receber tom na Impacta.

Figura 17 – Configuração do ATA.

Grandstream Device Configuration

[STATUS](#)
[BASIC SETTINGS](#)
[ADVANCED SETTINGS](#)
[PROFILE 1](#)
[PROFILE 2](#)
[FXS PORTS](#)

MAC Address: WAN -- [REDACTED] LAN -- [REDACTED] (Device MAC)

WAN IPv4 Address: [REDACTED]

WAN IPv6 Address: [REDACTED]

Product Model: HT818

Serial Number: [REDACTED]

Hardware Version: V1.4A Part Number -- 9610006114A (C1)

Software Version: Program -- 1.0.10.6 Bootloader -- 1.0.10.3 Core -- 1.0.10.4 Base -- 1.0.10.6
CPE -- 1.0.1.106

Software Status: Running Mem: 36160

System Up Time: 09:17:53 up 22 days

Network Cable Status: WAN -- Up 1000Mbps Full LAN -- Down 10Mbps Half

PPPoE Link Up: Disabled

NAT: Unknown NAT

Port Status:

Port	Hook	User ID	Registration
FXS 1	On Hook	7001	Registered
FXS 2	On Hook	7002	Registered
FXS 3	On Hook	7003	Registered
FXS 4	On Hook	7004	Registered
FXS 5	On Hook	7005	Registered
FXS 6	On Hook	7006	Registered
FXS 7	On Hook		Not Registered
FXS 8	On Hook		Not Registered

Port Options:

Port	DND	Forward	Busy Forward	Delayed Forward
FXS 1	No			
FXS 2	No			
FXS 3	No			
FXS 4	No			
FXS 5	No			
FXS 6	No			
FXS 7	No			
FXS 8	No			

Provision: Not running, Last status : Downloading file from url.

Core Dump: Clean

All Rights Reserved Grandstream Networks, Inc, 2006-2018

Fonte: Autor.

Após a configuração, os testes de chamadas puderam ser realizados para confirmação e validação das alterações realizadas. Os arquivos de *log* ajudaram muito na identificação de problemas envolvendo *NAT*, liberação de portas, etc. Com esses testes concluídos, a integração ficou operacional e estável: a Impacta manteve a lógica de ramais e permissões já conhecidas pelos usuários, enquanto o ATA e o PBX IP passaram a providenciar o caminho de saída/entrada via *VoIP*, com todos os benefícios de roteamento inteligente, registro e tarifação, e possibilidade de expansão futura. Foi adotada a estratégia de manter dois telefones instalados na recepção, uma vez que o posto dispõe de dois atendentes no mesmo turno. Essa configuração permite otimizar o tempo de resposta, reduzir filas de atendimento e evitar congestionamentos em horários de maior movimento. Optou-se por utilizar um telefone analógico, vinculado à central legada, e um telefone IP, conectado

diretamente ao sistema *VoIP*. Essa escolha mostrou, na prática, a eficiência do roteamento de chamadas e a integração entre os sistemas analógico e digital, demonstrando como ambas as tecnologias podem coexistir de maneira harmônica, garantindo continuidade operacional.

4.3 Modelo de negócio

No modelo de negócio de licenciamento de *software*, a contratante irá realizar o pagamento pela implantação e pelos *hardwares* necessários, como os telefones IP, enquanto a contratada fornecerá o *software* de telefonia *VoIP* por meio de licenciamento. Esse modelo oferece flexibilidade e controle para a contratante, permitindo que ela possa escolher os equipamentos de *hardware* e a infraestrutura mais adequados às suas necessidades específicas orientados pela contratada, ao mesmo tempo em que acessa uma solução de *software* robusta e confiável para gerenciar suas comunicações telefônicas.

O licenciamento do *software* inclui acesso à plataforma, que pode ser hospedada em servidores próprios da contratante ou em servidores na nuvem, os valores serão repassados à contratante, e ela fará a escolha do que melhor atende as necessidades dela. Além disso, o licenciamento garante acesso a atualizações regulares do *software* e suporte técnico contínuo para garantir o funcionamento adequado do sistema.

No momento da implantação, a contratante realiza o pagamento pelos serviços de consultoria, instalação e configuração da plataforma de telefonia *VoIP*, assim como pela aquisição dos telefones IP necessários para os usuários, sendo deixado explícito a não necessidade de comprar telefones IP por conta da existência de *softphones* gratuitos no mercado. A empresa de telecomunicações fornece todo o suporte necessário durante o processo de implantação, garantindo que o sistema esteja configurado corretamente e pronto para uso.

Após a implantação, a contratante paga uma taxa de licenciamento recorrente pelo uso contínuo do *software* de telefonia *VoIP*. Essa taxa pode ser calculada com base no número de usuários, nas funcionalidades adicionais necessárias ou em outros critérios acordados entre as partes. A contratada continua a oferecer suporte técnico, atualizações de *software* e assistência adicional conforme necessário, garantindo a satisfação contínua da contratante com o sistema de telefonia *VoIP*.

5 Conclusão

A implantação do sistema de telefonia VoIP no posto de combustível demonstrou, de forma prática, como a modernização das infraestruturas de comunicação pode gerar benefícios diretos em eficiência, segurança e redução de custos. O projeto conciliou o aproveitamento de recursos já existentes — como a central analógica Impacta 220 e a infraestrutura de rede disponível — com a adoção de tecnologias atuais, como *SIP Trunking*, servidores virtualizados, firewall dedicado, monitoramento com *Zabbix* e redundância de enlaces de internet. Essa estratégia híbrida garantiu a continuidade dos serviços, minimizou riscos de indisponibilidade e assegurou uma transição estável entre o legado analógico e a nova arquitetura digital.

A utilização de fibra óptica em topologia de anel, associada a equipamentos redundantes, consolidou uma base sólida para suportar não apenas a telefonia, mas também outros serviços críticos do complexo, como sistemas de gestão, segurança e conectividade corporativa. Da mesma forma, a integração com a central analógica por meio de ATA possibilitou a convivência harmônica entre os dois mundos tecnológicos, provando que a evolução pode ocorrer de forma gradual, sem perda de investimentos anteriores.

Sob a ótica empresarial, a solução trouxe ganhos significativos de autonomia, escalabilidade e flexibilidade. O modelo de licenciamento do *software* de telefonia oferece à contratante liberdade de escolha em relação ao hardware, além de suporte contínuo e atualizações regulares. Esse modelo garante que o sistema se mantenha alinhado às demandas atuais e preparado para futuras expansões.

Concluindo, o projeto evidenciou que a convergência entre voz e dados em uma infraestrutura única não apenas melhora a comunicação, mas também sustenta a evolução tecnológica de maneira segura e sustentável. A adoção do VoIP representou um passo estratégico para o posto de combustível, criando condições para que ele continue a crescer e se modernizar, acompanhando as exigências de um mercado cada vez mais competitivo e conectado.

6 Trabalhos Futuros

Como perspectiva de continuidade, destaca-se a possibilidade de realizar a customização (*white label*) do aplicativo VoIP já existente, adaptando-o ao posto de combustível por meio de ajustes visuais e funcionais. Essa abordagem permitiria que a empresa tivesse um aplicativo próprio, reforçando sua identidade corporativa e oferecendo uma ferramenta adicional para melhorar a produtividade e a integração entre colaboradores. Além disso, pode-se considerar a ampliação das funcionalidades para incluir recursos voltados ao relacionamento com clientes e motoristas, criando um canal direto e mais eficiente de comunicação e atendimento.

Referências

3CX. *O que significam os termos FXS e FXO?* 2025. Última atualização em 23 de julho de 2025. Acesso em: 22 de agosto de 2024. Disponível em: <<https://www.3cx.com.br/voip-sip/fxs-fxo/>>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

Agência Nacional de Telecomunicações. *Painel de Acessos – Histórico*. 2024. <<https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/acessos/historico>>. Acesso em 27 de abril de 2024. Citado na página 15.

ANATEL. *Resolução nº 765, de 5 de abril de 2022 — Dispõe sobre o uso das faixas de 3,5 GHz e 26 GHz para sistemas IMT*. 2022. Agência Nacional de Telecomunicações. Publicada em 05 abril 2022; acesso em: 30 agosto 2025. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2022/765-resolucao-765>>. Citado na página 30.

Anatel. *Resolução Anatel nº 778, de 28 de abril de 2025*. Brasília, 2025. Publicado em 30 de abril de 2025; última atualização em 7 de agosto de 2025. Acesso em: 11 de julho de 2025. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2025/2027-resolucao-778>>. Citado na página 30.

ANTIL, R.; PINKI, S. B.; BENIWAL, S. An overview of dwdm technology & network. *Int. J. Sci. Technol. Res*, v. 1, n. 11, p. 43–46, 2012. Citado na página 42.

BELLAMY, J. C. *Digital Telephony*. 3. ed. New York: Wiley, 2000. Citado na página 24.

Cisco Systems. *Modify Bandwidth Consumption Calculation for Voice Calls*. San Jose, CA, 2023. Acesso em: 14 de maio de 2025. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/7934-bwidth-consume.html>>. Citado na página 27.

CUNHA, M. A. P.; SILVA, K. S.; MOTA, D. F. M.; VASCONCELLOS, A. A. Uma arquitetura modular de hardware e software para pabx voip baseado em asterisk. In: *Anais do XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*. Brasília, DF: [s.n.], 2012. Apresentado no XXX SBrT. Citado na página 44.

DPL News. *Próximas ações da anatel serão leilão dos 700 mhz e retomada dos 850 mhz*. 2024. Publicado em 7 novembro 2024; acesso em: 30 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://dplnews.com/proximas-acoes-anatel-leilao-700-mhz-retomada-850-mhz/>>. Citado na página 30.

FREEMAN, R. L. *Fundamentals of Telecommunications*. 2. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2008. (Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing). Kindle edition. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 23.

GeeksforGeeks. *GSM in Wireless Communication*. 2025. Última atualização em 23 de julho de 2025. Acesso em: 08 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/gsm-in-wireless-communication/>>. Citado na página 29.

Huawei Technologies Co. *5G Wireless Network Planning Solution*. [S.l.], 2018. Accessed: 2024-03-02. Disponível em: <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/white%20paper/2018/5g_wireless_network_planing_solution_en_v2.pdf>. Citado na página 31.

International Telecommunication Union. *International summit outlines steps to improve resilience of submarine telecommunications cables worldwide*. 2025. Press release de 27 de fevereiro de 2025; acesso em: 24 de maio de 2025. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR-2025-02-27-submarine-cables-summit-nigeria.aspx>>. Citado na página 43.

ITU-T. *G.711: Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies*. Geneva, 1988. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.711/en>>. Acesso em: 27 abr. 2024. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.711/en>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

ITU-T. *H.264: Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services*. Geneva, 2003. (ITU-T H-Series). Acesso em: 15 de janeiro de 2025. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-H.264>>. Citado na página 26.

ITU-T. *G.729: Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear-prediction (CS-ACELP)*. Geneva, 2007. Acesso em: 14 de maio de 2025. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.729/en>>. Citado na página 27.

Jain, C.S. *Voice over LTE (VoLTE)*. 2014. Downloadable PDF, Washington University in St. Louis. Acesso em: 11 de julho de 2025. Disponível em: <<https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-14/ftp/volte.pdf>>. Citado na página 29.

Netgate. *Viewing the pf ruleset*. 2025. Página acessada em: 24 de maio de 2025. Disponível em: <<https://docs.netgate.com/pfsense/en/latest/firewall/pf-ruleset.html>>. Citado na página 37.

NIC.br. *IX.br celebrates 20 years with a prominent role in improving the Internet in Brazil*. 2025. Acesso em: 24 de maio de 2025. Disponível em: <<https://cgi.br/noticia/releases/ix-br-celebrates-20-years-with-a-prominent-role-in-improving-the-internet-in-brazil/>>. Citado na página 44.

OLIVEIRA, C. H. R.; RIPARDO, L. R. S.; MORAES, M. C. Telefonia de baixo custo (tbc) baseada no protocolo ip para a uema e secretarias do governo do estado (projeto voip uema). *Brazilian Journal of Development*, jun. 2021. Disponível em: *Brazilian Journal of Development*. Acesso em: 12 jun. 2025. Citado na página 44.

OLIVEIRA, C. H. R.; RIPARDO, L. R. S.; MORAES, M. C.; TORRES, C. H. Voip university solution: Voip uema project. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*. Brasil: Sociedade Brasileira de Computação, 2024. Apresentado em 2024. Citado na página 18.

OLIVEIRA, C. H. R.; TORRES, C. H.; RIPARDO, L. R. S.; MORAES, M. C. Low-cost communication solution with voice over internet protocol. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Wireless Networks (ICWN)*. USA: [s.n.], 2025. Apresentado em 2025. Citado na página 18.

OLIVEIRA, H. M. d. *Engenharia de Telecomunicações*. 1. ed. Recife: [s.n.], 2012. 1ª edição. Citado na página 22.

Opensignal. *Benchmarking the Global 5G Experience — June 2022*. [S.l.], 2022. Acesso em: 4 setembro 2025. Disponível em: <<https://www.opensignal.com/2022/06/22/benchmarking-the-global-5g-experience-june-2022>>. Citado na página 31.

Opensignal. *5G evolution in India and Brazil – a tale of two strategies*. 2024. Opensignal Market Insights. Acesso em: 30 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://www.opensignal.com/2024/10/14/5g-evolution-in-india-and-brazil-spectrum>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

SULTAN, D. M. S.; ISLAM, C. T.; SOHAL, D. M.; BINTA, Y. Z. *Design and Implementation of VOIP Based PABX Exchange through Existing Network*. [S.l.], 2005. 1–73 p. Relatório técnico. Acesso em: 12 jun. 2025. Citado na página 44.

Teleco. *Curso Teleco: Introdução à Telefonia — Página 3*. 2004. Página referenciada para a figura "Funcionamento da telefonia analógica". Disponível em: <https://www.teleco.com.br/Curso/Cbintro/pagina_3.asp>. Citado na página 21.

VALIN, J.-M.; TERRIBERRY, T.; MAXWELL, G.; MINTER, T. B. *Definition of the Opus Audio Codec*. [S.l.], 2012. Acesso em: 16 de maio de 2025. Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6716.html>>. Citado na página 27.

WALLINGFORD, T. *Switching to VoIP: A Solutions Manual for Network Professionals*. 1. ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2005. 502 p. ISBN 9780596008680. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 36.

WENTWORTH, S. M. *Eletromagnetismo Aplicado*. 2. ed. [S.l.]: LTC, 2013. Citado na página 40.

ZAPAROLLI, D. *5G technology made in Brazil*. 2020. Revista Pesquisa FAPESP, Issue #296, outubro de 2020. Acesso em: 30 de agosto de 2025. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/en/5g-technology-made-in-brazil/>>. Citado na página 31.

Apêndices

APÊNDICE A – Cálculo de Orçamento de Potência (Link Budget) para Enlaces Ópticos

Hipóteses e parâmetros

- Módulos SFP Ubiquiti, single-mode, 1310 nm, alcance nominal até 10 km.
- Potência de transmissão mínima: $P_{TX,min} = -9$ dBm.
- Sensibilidade do receptor: $P_{RX,sens} = -20$ dBm.
- Atenuação da fibra: $\alpha = 0,35$ dB/km.
- Emendas por fusão: $N_{sp} = 5$, perda 0,1 dB (total 0,5 dB).
- Conectores: $N_{conn} = 2$, perda 0,5 dB cada (total 1,0 dB).
- Margem de segurança: $M = 3,0$ dB.

Fórmulas

Para um enlace com comprimento L (km), a perda total é:

$$L_{total} = \alpha \cdot L + N_{sp} \cdot L_{sp} + N_{conn} \cdot L_{conn} + M$$

A potência recebida (pior caso, usando $P_{TX,min}$) é:

$$P_{RX} = P_{TX,min} - L_{total}$$

A margem da sensibilidade do receptor é:

$$Folga = P_{RX} - P_{RX,sens}$$

Cenários calculados

Considerando a distância das cinco empresas em relação ao CPD: 0,8 km; 0,9 km; 1,2 km; 1,3 km; 1,5 km.

Tabela 2 – Link budget por enlace (SFP SM 1310 nm até 10 km)

Enlace	L (km)	Fibra αL	Emendas	Conns	Margem	L_{total}	P_{RX} (dBm)	Folga (dB)
Empresa 1	0,8	0,28	0,50	1,00	3,00	4,78	-13,78	+6,22
Empresa 2	0,9	0,315	0,50	1,00	3,00	4,815	-13,815	+6,185
Empresa 3	1,2	0,42	0,50	1,00	3,00	4,92	-13,92	+6,08
Empresa 4	1,3	0,455	0,50	1,00	3,00	4,955	-13,955	+6,045
Empresa 5	1,5	0,525	0,50	1,00	3,00	5,025	-14,025	+5,975

Notas: (i) perdas de conectores referem-se a pares acoplados (DIO de cada lado); (ii) folga calculada contra $P_{RX,sens} = -20$ dBm.

Discussão

Mesmo adotando $P_{TX,min} = -9$ dBm (pior caso) e uma margem de segurança de 3 dB, todos os enlaces entre 0,8 km e 1,5 km apresentam folga ≈ 6 dB sobre a sensibilidade do receptor, o que é confortável para operação estável. Caso os módulos operem próximos do valor típico de transmissão (por exemplo, -6 a -3 dBm), a folga real será ainda maior.

APÊNDICE B – Dimensionamento de Cobertura e Capacidade Wi-Fi

Hipóteses de Projeto

- **Access Point (AP):** Ubiquiti U6-Mesh-Pro (Wi-Fi 6, dual-band).
- **Parâmetros de engenharia adotados com folga:**
 - Área de cobertura por AP: $A_{AP} = 150 \text{ m}^2$ (redução em relação ao valor nominal de 185 m^2).
 - Capacidade máxima por AP: $C_{AP} = 190$ clientes (limite inferior ao valor nominal de 250).
- **Diretrizes operacionais:**
 - Nível de sinal mínimo para associação estável: $\text{RSSI} \geq -65 \text{ dBm}$.
 - Relação sinal-ruído (SNR) mínima para modulação intermediária: $\geq 25 \text{ dB}$.
 - Uso prioritário da banda de 5 GHz, com ajuste dinâmico de potência e reuso controlado de canais.
 - Ativação de *band steering* para direcionar clientes à faixa de 5 GHz.

Dimensionamento — Fórmulas

Sejam:

$$A_{\text{site}} = \text{área total (m}^2\text{)}, \quad U = \text{número de usuários simultâneos.}$$

Número de APs por **cobertura de área**:

$$N_{\text{area}} = \left\lceil \frac{A_{\text{site}}}{A_{AP}} \right\rceil$$

Número de APs por **capacidade de clientes**:

$$N_{\text{cap}} = \left\lceil \frac{U}{C_{AP}} \right\rceil$$

Dimensionamento final:

$$N_{AP} = \max(N_{\text{area}}, N_{\text{cap}})$$

Exemplos de Dimensionamento

Tabela 3 – Cenários de dimensionamento (150 m² e 190 clientes por AP)

Cenário	A_{site} (m ²)	U (clientes)	N_{area}	N_{cap}
A	900	300	6	2
B	1.200	500	8	3
C	3.000	1.400	20	8
D	1.500	200	10	2

Em todos os casos, adota-se $N_{\text{AP}} = \max(N_{\text{area}}, N_{\text{cap}})$. Exemplo: no cenário C, o dimensionamento por área exige 20 APs, superior ao cálculo por capacidade (8 APs).

Airtime e Capacidade

A taxa útil por AP depende da largura de canal, modulação média (MCS) e da divisão entre as bandas de 2,4 e 5 GHz. Levou-se em consideração uma prática utilizada em ambientes de densidade média:

$$T_{\text{AP}} \approx 150 \text{ a } 300 \text{ Mbps úteis por AP}$$

Diretrizes de Implantação

- Altura de instalação: 4,0–4,5 m, com linha de visada para a área de usuários (minimizando obstruções por veículos).
- Potência RF inicial reduzida (principalmente em 5 GHz), ajustada após *survey* de validação.
- Largura de canal: 20/40 MHz em 2,4 GHz (preferencialmente 20 MHz); 40/80 MHz em 5 GHz conforme densidade e espectro disponível.
- Planejamento de canais: Para evitar sobreposição; manter documentação atualizada do mapa de canais.
- Configuração de SSIDs: Foi mantido apenas os necessários; ativado *band steering*; definido taxas mínimas de 12–18 Mbps para reduzir clientes muito fracos.