

Brasil 6G

Projeto Brasil 6G

Atividade 2.1 Definição das arquiteturas física e lógica da Plataforma Brasil 6G



UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	19/07/2022	Diego Gabriel Soares Pivoto Juliano Silveira Ferreira Roberto Michio Marques Kagami Tibério Tavares Rezende Luciano Leonel Mendes	Elaboração de conteúdo
2	01/08/2022	Luciano Leonel Mendes	Revisão de texto

Lista de Figuras

1	Visão geral da infraestrutura da Plataforma Brasil 6G.	2
2	Cenário 1: Servidor Brasil 6G fora da plataforma <i>Future Internet Brazilian Environment for Experimentation</i> (FIBRE).	5
3	Diagrama simplificado da rede de acesso e exemplo de aplicações e tecnologias integradas.	6
4	Diagrama macro do <i>hardware</i> do transceptor Brasil 6G.	8
5	Diagrama de blocos do transmissor multiusuário.	12
6	Diagrama de blocos do receptor multiusuário.	12
7	Diagrama de blocos do transmissor ponto-a-ponto.	15
8	Diagrama de blocos do receptor ponto-a-ponto.	15
9	Abordagem para integração da rede satelital ao Projeto Brasil 6: visão horizontal.	20
10	Abordagem para integração da rede satelital ao Projeto Brasil 6: visão vertical.	21
11	Organização atual da rede FIBRE no Inatel/MG.	23
12	Arquitetura Non-3GPP Access - Wifi proposta.	24

Lista de Tabelas

1	Especificações iniciais do transceptor de baixa complexidade.	10
2	Especificações iniciais do transceptor de alta capacidade.	11
3	Bibliotecas de código aberto. Compilação do código fonte	16
4	Instalações de software para uso da GPU	16

Acrônimos

6G Sexta Geração

AVX *Intel Advanced Vector Extensions*

BER *Bit Error Rate*

BS *Base Station*

CDN *Content Distribution Network*

CFO *Carrier Frequency Offset*

CP *Cyclic Prefix*

CRR Centro de Referência em Radiocomunicações

DFT *Discrete Fourier Transformer*

DLT *Distributed Ledger Technology*

ERB Estação Radio Base

ETSI European Telecommunications Standards Institute

FAST-SSC *Fast Simplified Successive Cancellation*

FIBRE *Future Internet Brazilian Environment for Experimentation*

FFT *Fast Fourier Transform*

GCC *GNU Compiler Collection*

GEO *Geostationary Orbit*

GFDM *Generalized Frequency Division Multiplexing*

GPGPU *General Purpose Graphics Processing Unit*

GPU *General-Purpose Processors*

IA Inteligência Artificial

ICT Lab *Information and Communications Technologies Laboratory*

IDU *Indoor Device Unit*

IoT *Internet of Things*

IoT-RG *Internet of Things - Research Group*

IP *Internet Protocol*

LaMCAD Laboratório Multiusuário de Computação de Alto Desempenho

LEO *Low Earth Orbit*

LLR *Log-Likelihood Ratio*

MAC *Media Access Control*

MCS *Modulation Coding Scheme*

MEO *Medium Earth Orbit*

MIMO *Multiple-Input Multiple-Output*

ML *Machine Learning*

NFV *Network Function Virtualization*

NFVI *Network Functions Virtualization Infrastructure*

NSSMF *Network Slice Subnet Management Function*

ODU *Outdoor Device Unit*

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OOT *Out-of-Tree Module*

OSM *Open Source MANO*

PHY *Physical Layer*

PSS *Primary Synchronization Signal*

QAM *Quadrature Amplitude Modulation*

RF *Rádio Frequência*

RoF *Radio over Fiber*

RRH *Remote Radio Head*

SCD *Successive Cancellation Decoding*

SDR *Software Defined Radio*

SIMD *Single Instruction Multiple Data*

SINDISAT *Sindicato Nacional das Empresas de Telecomunicações por Satélite*

SISO *Single-Input Single-Output*

TVWS *TV White Space*

UE *User Equipment*

UFG *Universidade Federal de Goiás*

UHF *Ultra High Frequency*

VIM *Virtual Infrastructure Manager*

VOLK *Vector-Optimized Library of Kernels*

WOCA *Wireless and Optical Convergent Access*

XLA *Accelerated Linear Algebra*

ZC *Zadoff–Chu*

ZF *Zero Forcing*

Sumário

1	Introdução	1
2	Arquitetura da Plataforma Brasil 6G	2
2.1	Elementos Físicos da Plataforma Brasil 6G	3
2.1.1	Servidor Brasil 6G: Núcleo da Rede	3
2.1.2	Computadores para Suporte à Inteligência Artificial	4
2.2	Cenários de Integração do Núcleo da Rede	4
2.2.1	Cenário 1: Servidor Brasil 6G não integrado ao FIBRE	4
2.2.2	Cenário 2: Servidor Brasil 6G integrado ao FIBRE	5
3	Rede de Acesso de Longa Distância	6
3.1	Principais componentes de <i>hardware</i> do transceptor Brasil 6G	7
3.2	Componentes principais de <i>Software</i> do transceptor Brasil 6G	8
3.3	Versões do transceptor Brasil 6G	9
3.3.1	Transceptor Brasil 6G de complexidade reduzida	9
3.3.2	Transceptor Brasil 6G de alta capacidade	10
3.4	Descrição do sistema	11
3.4.1	Modulador e demodulador de forma de onda	12
3.4.2	Estrutura de quadro	13
3.4.3	Sincronização	13
3.4.4	Recuperação da frequência de portadora	13
3.4.5	Estimação de canal e equalização	13
3.4.6	Mapeamento e de-mapeamento	14
3.4.7	Codificação e decodificação Polar	14
3.4.8	Modificações para o transceptor de complexidade reduzida	15
3.5	Descrição de arquitetura de software do transceptor Brasil 6G	15
3.6	Análise de riscos para a implementação dos transceptores	17
3.6.1	Transceptor Brasil 6G de complexidade reduzida	17
3.6.2	Transceptor Brasil 6G de alta capacidade	18
4	Redes Complementares	19
4.1	Enlace Satelital	19
4.2	Ambiente de <i>Cloud Computing</i> (UFG)	22
4.3	Rede FIBRE	22
4.4	Definição de possível arquitetura Non-3GPP Access - Wi-fi (UFG)	24
5	Conclusão	25

1 Introdução

Luciano Leonel Mendes
luciano@inatel.br

Os trabalhos realizados no âmbito do projeto Brasil 6G mostraram que a futura rede de comunicações móveis irá agregar diversas novas funcionalidade e modos de operação que demandam inovações em todas as camadas. Além disso, ficou evidente que soluções baseadas em Inteligência Artificial (IA) serão amplamente empregadas em diversas camadas, devendo a rede em si ser um provedor de serviços relacionados à IA e *Machine Learning* (ML). Para que estas funcionalidades sejam avaliadas em ambientes reais de operação das redes móveis, de modo que seja possível verificar o atendimento dos requisitos para as diversas famílias de caso de uso, é necessário criar um ambiente de experimentação e testes que seja capaz de executar os mais avançados algoritmos e funções que formam a Rede de Sexta Geração (6G). Este ambiente de experimentação será formado pela chamada Plataforma Brasil 6G, formada por diferentes componentes responsáveis por sustentar as funcionalidades previstas para a rede móvel de próxima geração. O objetivo deste relatório consiste justamente em apresentar a arquitetura da Plataforma Brasil 6G, descrevendo os seus principais componentes físicos e lógicos, sua arquitetura e redes complementares. A concepção descrita neste documento será a base para a especificação detalhada de todos os componentes de hardware e software que serão necessários para a construção desta plataforma.

2 Arquitetura da Plataforma Brasil 6G

Diego G. S. Pivoto, Luciano L. Mendes
 diego.gabriel@inatel.br, luciano@inatel.br

O Projeto Brasil 6G tem como objetivo principal criar um ecossistema que viabilize o desenvolvimento de futuras redes móveis no Brasil, permitindo que os requisitos para os casos de uso considerados estratégicos para o país sejam atendidos durante o processo de padronização das novas redes móveis. Para atingir este objetivo, é essencial desenvolver uma plataforma que suporte as mais recentes tecnologias e permita a criação de aplicações emergentes. Para isso, este relatório apresenta uma visão geral da infraestrutura da plataforma que será utilizada na experimentação das tecnologias que serão desenvolvidas neste projeto, apresentando os elementos físicos da mesma e permitindo a integração de equipamentos e tecnologias habilitadoras para as futuras redes móveis. A Figura 1 apresenta o diagrama geral da infraestrutura que será empregada para a criação da Plataforma Brasil 6G.

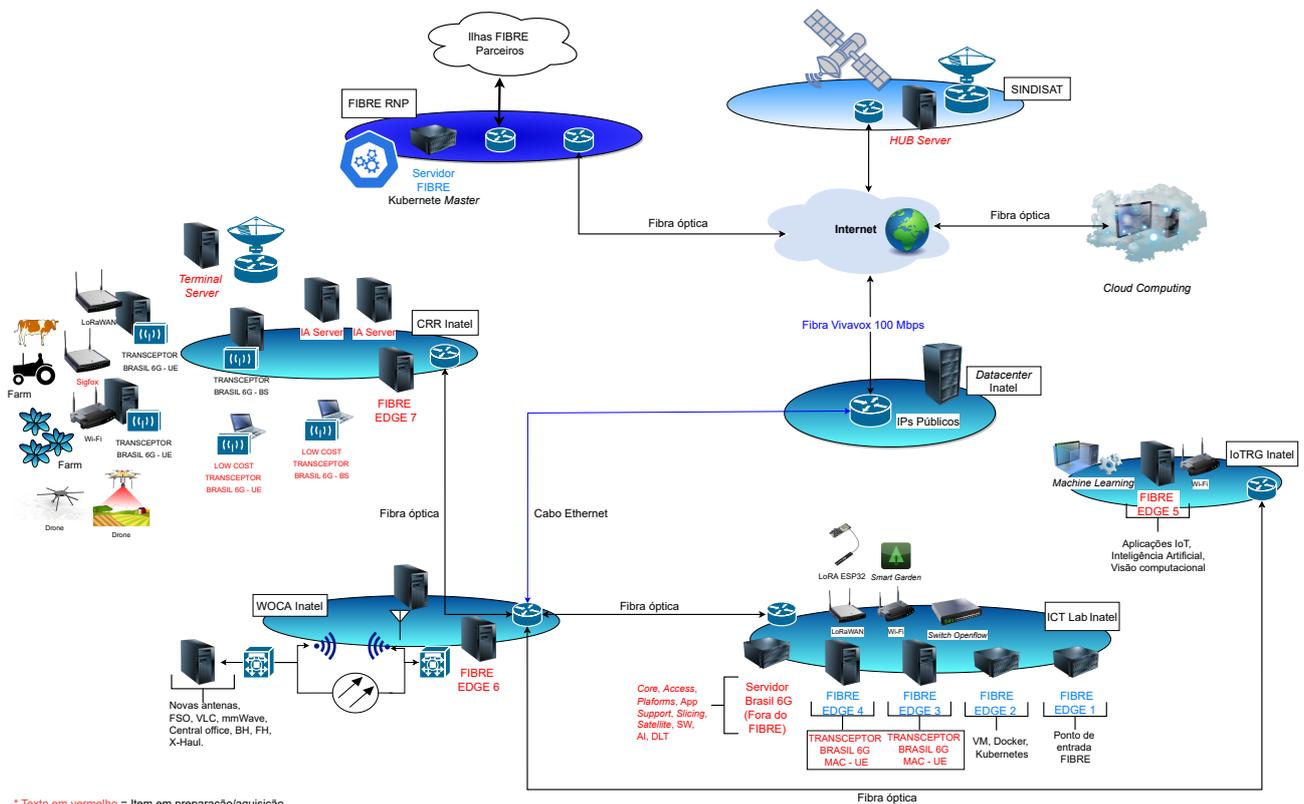


Figura 1: Visão geral da infraestrutura da Plataforma Brasil 6G.

Como pode ser observado na Figura 1, a infraestrutura consiste na integração de diversos laboratórios, atuando em diferentes áreas de especialização, para contribuir com a implementação da arquitetura 6G projetada, incluindo os laboratórios Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR), *Wireless and Optical Convergent Access* (WOCA), *Information and Communications Technologies Laboratory* (ICT Lab) e *Internet of Things - Research Group* (IoT-RG) do Inatel, além de contar com a rede satelital proveniente do Sindicato Nacional das Empresas de Telecomunicações por Satélite (SINDISAT) e do Laboratório Multiusuário de Computação de Alto Desempenho (LaMCAD) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Cada um destes

laboratórios irão contribuir com recursos complementares que permitirão avaliar o desempenho de novas tecnologias em condições reais de campo, além de demonstrar as aplicações mais promissoras para as futuras redes móveis.

De modo geral, a Plataforma Brasil 6G é composta por uma rede de acesso à longa distância para permitir conectividade para equipamentos de usuário e suporte à aplicações remotas e emergentes, um *core* para o plano de controle e de dados da rede, além de computadores para suporte à IA. A rede de acesso é composta pelos transceptores Brasil 6G desenvolvidos pelo CRR, que atuam como *Base Station* (BS) e *User Equipment* (UE) em aplicações relacionadas à conectividade para regiões remotas, como por exemplo em um cenário de *Smart Farming* para atender áreas rurais. Através da parceria entre o ICT Lab e o SINDISAT, existe ainda um cenário de uso de um enlace satelital como rede complementar ao enlace de rádio presente na arquitetura proposta.

Além do enlace satelital, há outras redes complementares, como por exemplo um ambiente de *Cloud Computing* e a rede FIBRE. O ambiente de *Cloud Computing* é suportado pelo LaMCAD¹ da UFG e consiste em uma infraestrutura de computação em nuvem que disponibiliza a criação de máquinas virtuais e contêineres aos usuários. Por outro lado, a rede FIBRE possui uma estrutura distribuída de servidores na plataforma cujo objetivo principal é a integração das instituições parceiras envolvidas no Projeto Brasil 6G, de modo que as mesmas possam desenvolver novas aplicações e testes remotamente usando contêineres.

A seguir, serão detalhados os elementos físicos da plataforma do Projeto Brasil 6G, compostos por: servidores para, respectivamente, núcleo e suporte à IA; componentes de *hardware* e *software* da rede de acesso de longa distância composta pelos transceptores Brasil 6G; e equipamentos para implementação das redes complementares para suporte à plataforma. Também serão discutidos ao longo do relatório possíveis cenários de integração do *core* com a plataforma FIBRE.

2.1 Elementos Físicos da Plataforma Brasil 6G

Conforme previamente discutido na subseção anterior, a infraestrutura do projeto é composta pelos elementos físicos do Servidor Brasil 6G para suportar o processamento de núcleo e borda, além dos computadores de suporte à IA envolvendo aplicações relacionadas aos transceptores Brasil 6G da rede de acesso. Os computadores responsáveis pelo núcleo da rede e suporte à Inteligência Artificial serão abordados a seguir, enquanto que os elementos físicos da rede de acesso e das redes complementares serão descritos com mais detalhes nas Seções 3 e 4, respectivamente.

2.1.1 Servidor Brasil 6G: Núcleo da Rede

O núcleo da rede será implementado no Servidor Brasil 6G, que será integrado ao laboratório ICT Lab do Inatel, conforme ilustrado na Figura 1. Este equipamento terá múltiplos papéis na arquitetura da Plataforma Brasil 6G, podendo operar como um servidor para *edge* ou um servidor *core* com funcionalidades para núcleo e acesso, além de oferecer suporte para *network slicing*, aplicações baseadas em IA e *Distributed Ledger Technology* (DLT).

Do ponto de vista físico da estrutura da plataforma, o núcleo da rede utiliza os planos de controle e de usuário para prover conectividade para os terminais móveis, enquanto que esses empregam os transceptores Brasil 6G como interface aérea para as redes de acesso. Desta

¹<https://lamcad.ufg.br/>

forma, o *core* é responsável pela execução das rotinas necessárias ao processo de autenticação, autorização, provisionamento de recursos de rede e conectividade.

Assim sendo, o Servidor Brasil 6G deve atender a requisitos específicos para viabilizar a operação da rede e prover capacidade de processamento e armazenamento de modo que o mesmo seja capaz de executar as tarefas necessárias de *core* e de *edge* para suportar as aplicações e demais demandas da arquitetura 6G. Esses requisitos, por sua vez, estão detalhados no relatório da atividade 2.2 do projeto, onde é apresentada a especificação técnica dos componentes da plataforma.

2.1.2 Computadores para Suporte à Inteligência Artificial

IA é considerada uma das principais tecnologias habilitadoras para a rede 6G, podendo ser adotada em suas diferentes camadas [1, 2, 3, 4]. Logo, é essencial que a Plataforma Brasil 6G tenha recursos computacionais para o desenvolvimento e testes de algoritmos baseados em IA.

A capacidade computacional para lidar com os processos relacionados à IA estão concentrados em computadores de alto desempenho especificados para este fim. Além disso, o Servidor Brasil 6G também irá contar com *General-Purpose Processors* (GPUs) que poderão ser exploradas para treinamento e execução de algoritmos baseados em IA. Tais recursos são, portanto, de suma importância para o desenvolvimento de funcionalidades inovadoras que podem atender à demandas e cenários previstos para a futura rede de comunicação móvel.

2.2 Cenários de Integração do Núcleo da Rede

Para a definição da arquitetura física da plataforma desenvolvida pelo projeto Brasil 6G, foram considerados dois cenários distintos, denominados como Cenário 1 e Cenário 2, cuja principal diferença está na integração do *core* à rede complementar do FIBRE. Esses cenários serão descritos a seguir.

2.2.1 Cenário 1: Servidor Brasil 6G não integrado ao FIBRE

A Figura 2 ilustra o Cenário 1 da infraestrutura de experimentação do Projeto Brasil 6G, no qual o núcleo da rede não é implementado dentro do ambiente do FIBRE. A principal vantagem desta abordagem é a flexibilidade para a implementação de protocolos e funcionalidades, pois não é necessário restringir a implementação de tais soluções ao requisitos estabelecidos pelo FIBRE. No entanto, é necessário criar soluções alternativas para permitir que todos os parceiros acessem este servidor. Uma das possibilidades consiste no desenvolvimento de ferramentas de integração que possam ser implementadas no ambiente de *cloud computing* disponibilizado pela UFG. Neste caso máquinas virtuais para a execução de aplicações remotas podem ser criadas, possibilitando testes e integração com o Servidor Brasil 6G através da nuvem computacional.

3 Rede de Acesso de Longa Distância

Juliano Silveira Ferreira, Roberto M M Kagami
 silveira@inatel.br, robertomk@inatel.br

O projeto Brasil 6G contempla a concepção e desenvolvimento de um ambiente ou plataforma para experimentação de soluções para a futura rede de comunicação móvel, denominada de rede 6G, com flexibilidade para permitir que diferentes tecnologias sejam testadas e comparadas. A plataforma que será desenvolvida visa a experimentação de diferentes camadas das redes de comunicações móveis, incluindo a rede de acesso, e previsão de integração desta com outras tecnologias como, por exemplo, WiFi, LoRa e Sigfox.

A rede de acesso prevista para compôr o projeto Brasil 6G encontra-se ilustrada de forma simplificada na Figura 3. Esta rede de acesso visa prover conectividade em áreas remotas e rurais, visando o suporte para aplicações da vertical de agronegócios, além de outros setores que possam se beneficiar da cobertura em regiões afastadas dos grandes centros. A necessidade de conectividade em áreas remotas é uma demanda nacional, não sendo adequadamente contemplada pelas especificações das atuais redes de comunicações móveis.

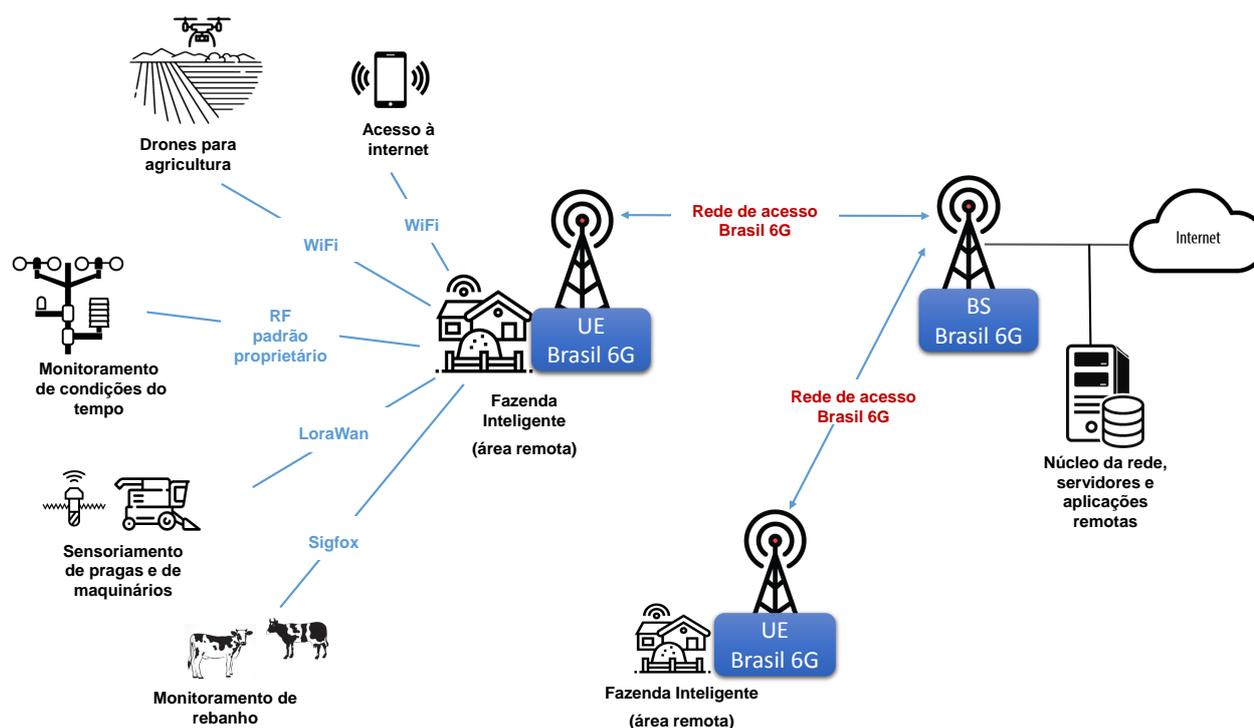


Figura 3: Diagrama simplificado da rede de acesso e exemplo de aplicações e tecnologias integradas.

A rede de acesso Brasil 6G será formada por dois dispositivos principais:

- Terminal de usuário Brasil 6G (UE Brasil 6G): atua como um ponto de acesso à rede Brasil 6G em uma área remota, prevendo a possibilidade de integração com diferentes tecnologias (ex. WiFi, Lora, Sigfox);

- Estação rádio base Brasil 6G (BS Brasil 6G): responsável por prover conectividade aos terminais móveis, viabilizando a conexão com o núcleo da rede e com a Internet. Responsável também pelo gerenciamento das UEs, incluindo o controle da alocação do espectro de frequências e de outros recursos de transmissão.

A rede de acesso para a plataforma Brasil 6G será capaz de atender as demandas de diferentes aplicações como acesso banda larga, transmissão e reprodução de vídeos e fotos, chamadas e *Internet of Things* (IoT). Para permitir que a rede de acesso possa alcançar áreas remotas, o transceptor de radiocomunicação que compõe a BS e UEs, denominados de transceptor Brasil 6G, deve considerar o uso de técnicas de codificação de canal e modulação digital de alta eficiência energética e espectral e que apresentem robustez para manter a qualidade de serviço mesmo quando o terminal móvel se encontra distante da BS. A concepção do transceptor Brasil 6G utiliza os resultados do projeto 5G-IoT, desenvolvido pelo CRR [5], que visava oferecer a taxa de dados da ordem de 100 Mbps a um terminal de usuário localizado a 50 km da BS. Este transceptor foi projetado para operar na faixa de *Ultra High Frequency* (UHF) empregando os canais ociosos do *TV White Space* (TVWS). Vale destacar que no momento da concepção do transceptor 5G-IoT não haviam normatizações ou regulamentações existentes com relação a exploração do TVWS no Brasil. Foi apenas em 2021 que a Anatel regulamentou esta forma de acesso ao espectro [6] e adequações devem ser introduzidas no transceptor para que o mesmo possa ser utilizado na Plataforma Brasil 6G. Além disso, o desenvolvimento deste novo transceptor deverá atender aos novos requisitos para suportar as aplicações previstas para as redes 6G.

A seguir, estão apresentados maiores detalhes sobre a arquitetura física e lógica inicialmente concebida para o transceptor Brasil 6G.

3.1 Principais componentes de *hardware* do transceptor Brasil 6G

O desenvolvimento do transceptor de radiocomunicação previsto pelo projeto Brasil 6G considera o emprego da filosofia de *Software Defined Radio* (SDR). Nesta abordagem, as etapas de processamento digital de sinais de toda a camada física são executadas por uma plataforma de *software* e os sinais resultantes são convertidos por uma interface de *hardware* que já possui o *front-end* de Rádio Frequência (RF). O *front-end* de RF é responsável por realizar a conversão dos sinais do domínio digital para analógico e vice-versa, bem como as conversões de RF necessárias para a comunicação sem fio usando uma frequência de canal específica. Esta plataforma foi adotada por proporcionar versatilidade inerente de soluções desenvolvidas em *software* à implementação de sistemas de radiocomunicação, permitindo que novas funcionalidades fossem facilmente integradas e que novas técnicas de processamento digital de sinais pudessem ser adotadas sem que isso causasse alterações de *hardware*.

Com relação aos dispositivos de *hardware* adotados para a plataforma do transceptor Brasil 6G, pode-se destacar a adoção do uso de computadores de uso geral para a execução das etapas de *software*, a fim de reduzir o custo da solução final, e o uso de *front-ends* de RF comerciais, que permitem acelerar a execução do projeto. A Figura 4 mostra um diagrama macro da plataforma de *hardware* adotada para o desenvolvimento do transceptor Brasil 6G.

Tal como pode ser visto na Figura 4, a arquitetura proposta para o transceptor é formada por duas unidades principais, descritas a seguir:

- *Indoor Device Unit* (IDU): corresponde a unidade interna do sistema sendo composta principalmente pelo computador de uso geral e pelo *front-end* de RF. A IDU integra

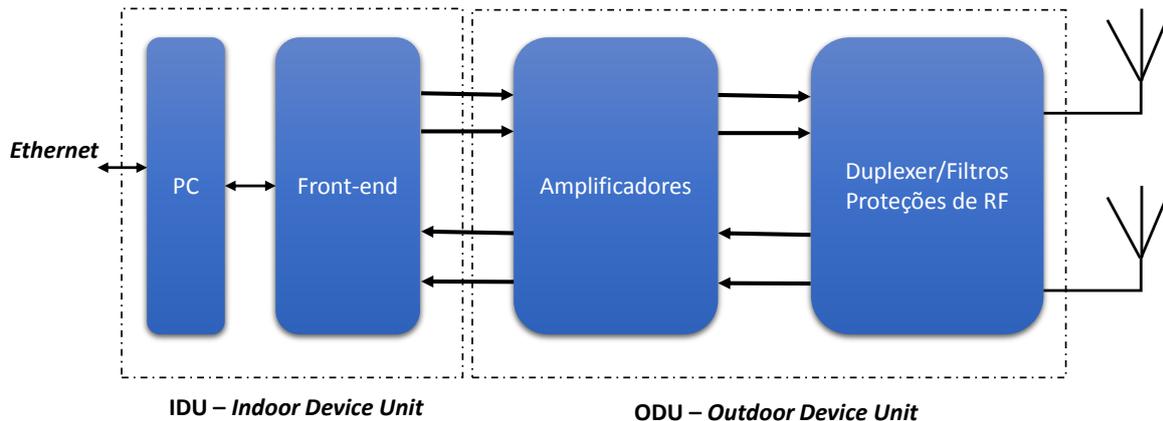


Figura 4: Diagrama macro do *hardware* do transceptor Brasil 6G.

os dispositivos mínimos para o funcionamento do transceptor, viabilizando a realização de testes e validações em laboratório, além da integração com outras tecnologias, tendo, porém, potência de transmissão de RF reduzida.

- *Outdoor Device Unit* (ODU): corresponde à unidade externa do sistema e agrega componentes de RF complementares à IDU, que proporcionam o aumento da potência de transmissão do sistema, ampliando, assim, a área de cobertura da rede. A ODU integra também dispositivos para otimização do número de antenas empregadas, filtros de RF e dispositivos de proteção da ODU.

O detalhamento dos dispositivos de *hardware* que compõe o transceptor Brasil 6G, IDU e ODU, estão apresentados no relatório da atividade 2.2 do presente projeto [7].

3.2 Componentes principais de *Software* do transceptor Brasil 6G

Conforme mencionado na seção 3.1, o transceptor Brasil 6G foi implementado em software e dentre seus componentes principais pode-se destacar o GNU Radio, que é um *framework open source* para simulação, implementação e testes dos algoritmos empregados na cadeia de comunicação, sendo executado sobre o sistema operacional Ubuntu/Linux.

O GNU radio oferece uma interface amigável, onde os processos necessários nas etapas de transmissão e recepção são organizados em blocos, cujas funções podem ser já nativas do framework ou podem ser criadas pelos programadores que implementam o sistema e integrados de forma simples e eficiente. Estes algoritmos criados pela equipe de desenvolvimento do projeto Brasil 6G, denominados de *Out-of-Tree Module* (OOT), podem ser desenvolvidos em diferentes linguagem de programação, sendo o C++ e Python as mais empregadas.

A seguir, estão apresentadas as versões de software empregadas no transceptor 5G-IoT [5] e que serão utilizados como uma plataforma base para o desenvolvimento do transceptor Brasil 6G:

- GNU Radio: versão 3.7.11;
- Sistema operacional: Ubuntu 18.04.5 LTS;
- UHD (Interface do GNU Radio com *front-ends* da empresa National Instruments): 3.010.003;

- Versão de Python: 2.7;

A seguir, estão apresentadas as versões de software a serem avaliadas durante a execução do projeto Brasil 6G e que são candidatas a compôr o transceptor Brasil 6G:

- GNU Radio: 3.9;
- Sistema operacional: Ubuntu 20.04;
- UHD (Interface do GNU Radio com SDR NI): 4.1.0.0
- Versão de Python: 3.8

3.3 Versões do transceptor Brasil 6G

O projeto Brasil 6G prevê o desenvolvimento de um transceptor a ser empregado para a realização de pesquisas, testes e demonstrações práticas da rede concebida ao longo do projeto. Visando alcançar uma diversidade de aplicações, considera-se, inicialmente, o desenvolvimento de duas versões:

- Transceptor Brasil 6G de complexidade reduzida: com suporte à comunicação ponto-a-ponto, de menor complexidade e menor número de funcionalidades e, conseqüentemente, menor custo quando comparada à versão de alta capacidade. Esta versão do transceptor pode ser utilizada para atender à demandas específicas relacionadas a conectividade em uma determinada localidade remota, a um custo de implantação mais acessível; além disso, pode ser empregada para realização de testes e avaliação da tecnologia proposta a um custo reduzido;
- Transceptor Brasil 6G de alta capacidade: com suporte a múltiplos usuários e com suporte à funcionalidades e aplicações mais avançadas especificadas para atender de maneira mais ampla e completa os requisitos do projeto Brasil 6G;

Em ambas as versões descritas, um transceptor é configurado para operar como a estação rádio base, ou BS, sendo o responsável por prover acesso à rede para o transceptor, ou transceptores, configurado para operar como terminal de usuário, UE. A seguir, estão apresentados maiores detalhes a respeito das funcionalidades e requisitos inicialmente considerados para as duas versões de transceptores citadas.

3.3.1 Transceptor Brasil 6G de complexidade reduzida

Abaixo estão apresentadas informações relativas a concepção inicial do transceptor Brasil 6G de complexidade reduzida. Vale destacar que os requisitos e parâmetros de operação apresentados foram inicialmente definidos para orientar o desenvolvimento do transceptor em questão. Alterações e ajustes podem ser realizados ao longo do projeto em função de novos requisitos identificados, bem como do resultado de testes ou de limitações de ordem prática.

Os requisitos operacionais inicialmente previstos para o transceptor de complexidade reduzida encontram-se listados na Tabela 1. Dentre os requisitos e recursos previstos, pode-se destacar a operação prevendo comunicação ponto-a-ponto, ou seja, para atender a um único terminal de usuário, com espectro de comunicação simétrico tanto para o *uplink* quanto para

o *downlink*. A largura de banda é de 6 MHz e as formas de onda são *Generalized Frequency Division Multiplexing* (GFDM) e *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), associado a mapeamento *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). A codificação Polar com taxa de codificação configurável será utilizada para prover robustez ao enlace. A definição de parâmetros de codificação de canal e modulação, *Modulation Coding Scheme* (MCS), são realizadas pela própria camada *Physical Layer* (PHY) do transceptor a partir das condições do canal de comunicação informadas pelo terminal do usuário. Esta versão do transceptor opera com *Single-Input Single-Output* (SISO), ou seja, com uma antena de transmissão e uma antena de recepção.

Tabela 1: Especificações iniciais do transceptor de baixa complexidade.

Item/Parâmetro	Especificação inicial
Tipo de comunicação suportada	usuário único (ponto-a-ponto)
Formas de onda	GFDM e OFDM
Mapemaneito	QPSK, 16 QAM, 64 QAM e 256 QAM
Codificação de canal	Polar, seleção dinâmica de MCS.
Taxa de transmissão	até 20 Mbps
Esquema de antenas	SISO
Camada de controle	realizado pelo próprio PHY
Largura de banda	6 MHz
Frequência de operação	UHF faixas consideradas: 488 a 602 MHz 620 a 758 MHz
Potência de transmissão	~1 mW ~1 W de pico (com amplificação)

3.3.2 Transceptor Brasil 6G de alta capacidade

A seguir, estão apresentadas informações a respeito da concepção inicial do transceptor de alta capacidade. As informações elencadas serão utilizadas para orientar as pesquisas e desenvolvimento do transceptor em questão. Ajustes e adequações poderão ser realizadas em relação a concepção inicial, em função de resultados de pesquisas, testes ou em função de limitações de implementação.

Os requisitos operacionais, inicialmente previstos para o transceptor de alta capacidade, encontram-se listados na Tabela 2. Dentre os recursos previstos, pode-se destacar a operação prevendo comunicação com múltiplos usuários, o que envolve o compartilhamento do espectro entre os diferentes usuários e sincronização da transmissão dos mesmos. A largura de banda máxima considerada para o sistema é de 24 MHz, tanto para o enlace de *uplink* quanto de *downlink*. Novamente, as formas de ondas implementadas são GFDM e OFDM, com mapeamento QAM, e código Polar com taxa de codificação configurável de forma dinâmica através do MCS. Neste caso, o controle da taxa de codificação e da ordem de modulação é realizado pela camada *Media Access Control* (MAC), utilizando como base as condições do canal de comunicação informado pelo terminal do usuário. Este transceptor emprega *Multiple-Input*

Multiple-Output (MIMO) 2x2 que pode ser utilizado tanto para a diversidade quanto para multiplexação espacial. O transceptor de alta capacidade prevê ainda a implementação de técnicas de sensoriamento espectral, visando identificar as transmissões de usuários primários na faixa de UHF, alocação dinâmica de recursos de transmissão dos terminais de usuários, bem como a integração de algoritmos avançados de processamento baseados em IA.

Tabela 2: Especificações iniciais do transceptor de alta capacidade.

Item/Parâmetro	Especificação inicial
Tipo de comunicação suportada	multi usuário (ponto-multiponto)
Formas de onda	GFDM e OFDM
Mapeamento	QPSK, 16 QAM, 64 QAM e 256 QAM
Codificação de canal	Polar, seleção dinâmica de MCS.
Taxa máxima de transmissão	~90 Mbps
Esquema de antenas	MIMO 2x2
Técnicas MIMO	Diversidade e multiplexação
Camada de controle	MAC simplificado
Largura de banda máxima	24 MHz
Frequência de operação	UHF faixas consideradas: 488 a 602 MHz 620 a 758 MHz
Potência de transmissão	1 W de pico
Funcionalidades adicionais	- Sensoriamento espectral - Alocação de recursos de transmissão de forma dinâmica para os usuários - Emprego de algoritmos de I.A. (ex. definição de MCS)

3.4 Descrição do sistema

Os próximos tópicos apresentam, resumidamente, os principais blocos contidos no sistema utilizado pelos transceptores, tanto de alta capacidade como também de complexidade reduzida. As Figuras 5 e 6 mostram os diagramas de transmissão e recepção, respectivamente, do transceptor 6G de alta capacidade. o transceptor 6G de complexidade reduzida basicamente utiliza um subconjunto dos blocos apresentados nas Figuras 5 e 6, conforme as restrições previstas na Tabela 1.

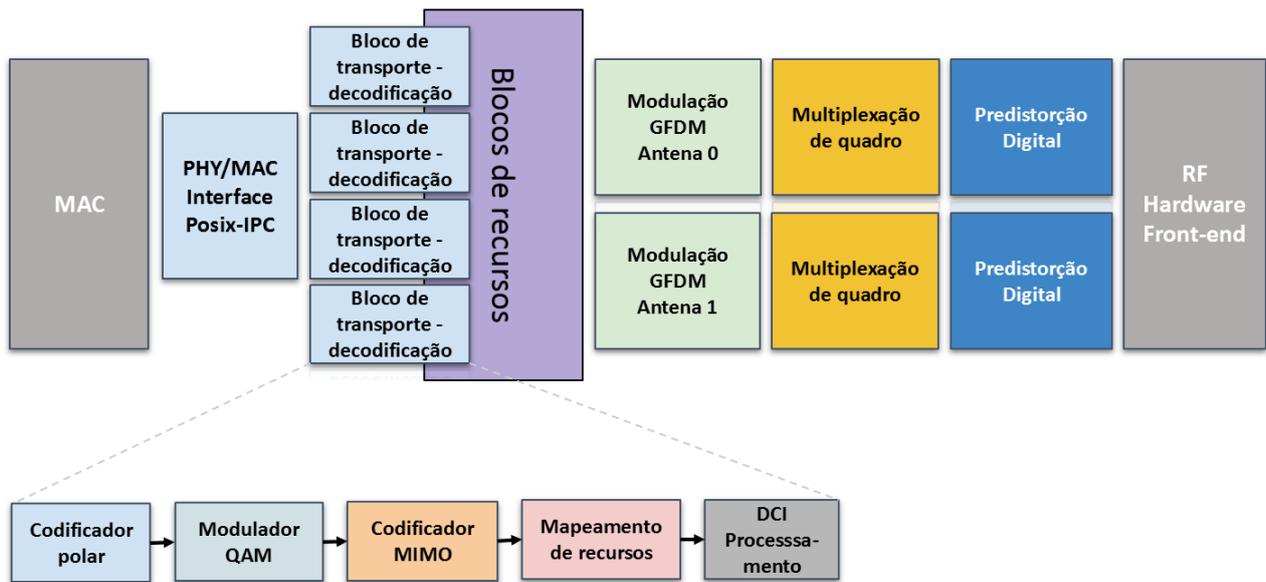


Figura 5: Diagrama de blocos do transmissor multiusuário.

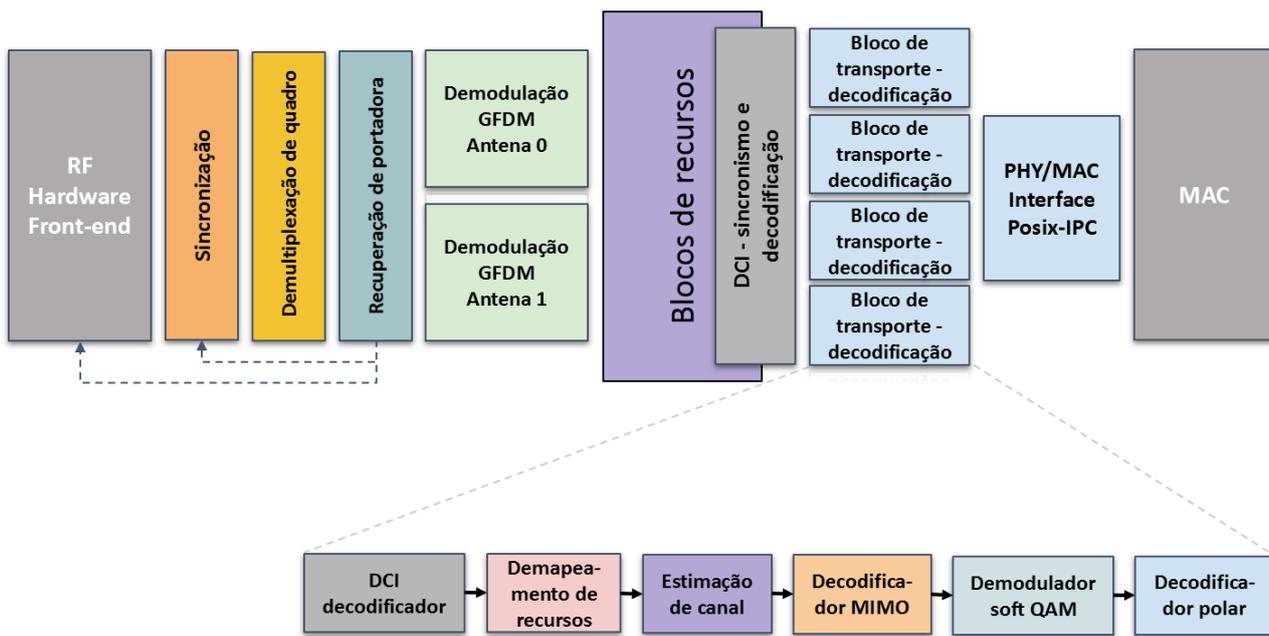


Figura 6: Diagrama de blocos do receptor multiusuário.

3.4.1 Modulador e demodulador de forma de onda

O modulador de forma de onda utiliza o GFDM [8, 9] para transportar os símbolos de dados. O GFDM pode ser parametrizado para atender aos requisitos de canal e aplicação para diferentes cenários, uma vez que esta forma de onda apresenta um maior grau de liberdade em relação ao OFDM, pois permite definir o número de subportadoras e subsímbolos do bloco, além da escolha do tipo de filtro protótipo utilizado para limitar a largura de faixa de cada subportadora do sistema. Essa flexibilidade significa que o GFDM pode ser configurado para diferentes fins, sendo que o modo de operação com baixa emissão fora da faixa é especialmente

interessante para a exploração do TVWS. A camada MAC é responsável por determinar a alocação dos dados que serão transmitidos em cada subportadora e cada subsímbolo do bloco GFDM que compõem os recursos da grade tempo-frequência. Esse processo de alocação de recursos leva em consideração a qualidade do canal observada por cada usuário, bem como as demandas individuais em termos de robustez e vazão. O modulador de forma de onda foi implementado utilizando transformada rápida de Fourier, ou *Fast Fourier Transform* (FFT). Esta abordagem reduz a complexidade para $\mathcal{O}(N \log N)$. A implementação é feita em linguagem C e utiliza também multiplicadores complexos implementados usando *Intel Advanced Vector Extensions* (AVX) [10].

3.4.2 Estrutura de quadro

O bloco que faz a marcação de quadros executa a multiplexação dos símbolos de dados com um sinal de referência denominado *Primary Synchronization Signal* (PSS), que é inserido no início de cada quadro. Este sinal gera a referência para determinar a sincronização de tempo dos símbolos. Este bloco é implementado empregando as funções disponíveis no GNU Radio.

3.4.3 Sincronização

O bloco de sincronização de tempo determina o início dos quadros no sinal recebido utilizando a correlação cruzada do mesmo com uma sequência de referência. A correlação cruzada pode ser implementada de forma eficiente utilizando FFT. Em função da variação do sinal recebido por causa das flutuações do canal, é necessário empregar um bloco que detecta o limiar a partir do qual a correlação cruzada indica o início de um bloco no sinal recebido. Essa função de detecção de limiar foi desenvolvida utilizando os blocos disponíveis no GNU Radio, sendo otimizados para a aplicação em questão. Um bloco customizado adiciona uma marca de tempo na primeira amostra do quadro de acordo com a posição do pico de correlação encontrado. Desta forma, os próximos blocos podem processar corretamente todas as amostras recebidas. Essa informação de temporização obtida pelos terminais móveis através do sinal recebido da BS é empregado para controlar a temporização e o sincronismo dos sinais enviados no *uplink*.

3.4.4 Recuperação da frequência de portadora

A estimativa de frequência de portadora, ou *Carrier Frequency Offset* (CFO), é realizada no lado da UE, sendo obtida através da fase referente ao valor máximo da correlação cruzada utilizada no sincronismo de tempo de quadro. Como o *Cyclic Prefix* (CP) é uma cópia das últimas amostras do símbolo, supõe-se que a fase da correlação cruzada entre essas porções dos sinais seja nula, mesmo quando sujeita à distorções de canal. Os sinais transmitidos pelo UE devem ser corrigidos para levando em conta o CFO percebido no downlink. Isso garante que as transmissões de todos os UEs sejam sincronizadas em frequência com o receptor da BS. A rotação de fase necessária para compensar o CFO é aplicada ao sinal usando um bloco OOT utilizando a biblioteca *Vector-Optimized Library of Kernels* (VOLK) [11], que garante o atendimento dos requisitos do projeto em relação a operação em tempo real.

3.4.5 Estimação de canal e equalização

O bloco de estimação de canal é responsável obter a resposta em frequência do canal a partir de um conjunto de portadoras pilotos introduzidas no quadro GFDM. A resposta em

frequência do canal é empregada pelos receptores no processo de equalização, combinação para obtenção dos ganhos de diversidade ou de desacoplamento das antenas para obtenção dos ganhos de multiplexação espacial. Os sinais transmitidos nas portadoras pilotos são sequências pseudo-aleatórias *Zadoff-Chu* (ZC) [12] que possuem propriedades interessantes para o processo de estimação de canal, como baixa correlação. Como as sequências são ortogonais entre si, diferentes sequências podem ser utilizadas por diferentes antenas para a realização da estimativa de canal simultânea em cenários MIMO, sem a necessidade de se empregar um maior número de portadoras piloto. Esta abordagem aumenta a eficiência espectral do sistema, permitindo o aumento de vazão para os usuários finais.

O uso de portadoras piloto permite a estimativa do canal na frequência em que essas portadoras estão alocadas. Para obter a estimativa da resposta em frequência nas portadoras empregadas para a transmissão de dados, é necessário realizar uma interpolação. Na implementação atual do transceptor, essa interpolação é realizada empregando-se a FFT. Além disso, o transceptor emprega o algoritmo *Zero Forcing* (ZF) para o desacoplamento dos sinais transmitidos pelas várias antenas do esquema MIMO para multiplexação, sendo que este algoritmo utiliza a estimação de canal para realizar a inversão da matriz do canal. Os processos de estimação e equalização de canais foram desenvolvidos utilizando *Single Instruction Multiple Data* (SIMD) através da biblioteca VOLK.

3.4.6 Mapeamento e de-mapeamento

O mapeamento de blocos de bits em símbolos QAM é feito através de uma tabela definida para cada ordem de modulação considerada na implementação do transceptor. O bloco de mapeamento implementado suporta QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM.

O bloco de de-mapeamento possui saída suave, ou seja, ele entrega a *Log-Likelihood Ratio* (LLR) para cada um dos bits dos símbolos QAM recebidos. Este é o tipo de informação requerida pelo bloco de decodificação que será descrito a seguir. A complexidade para se obter as LLRs cresce com a ordem de modulação, uma vez que seu cômputo depende da distância euclidiana do símbolo recebido em relação a todos os demais símbolos da constelação. Assim, para um melhor desempenho, foi implementado um algoritmo de cálculo aproximado da LLR onde apenas os símbolos mais próximos do símbolo recebido são considerados [13]. Desta forma, a quantidade de cálculos envolvidos é reduzida significativamente enquanto que a perda de desempenho observada na prática é desprezível.

3.4.7 Codificação e decodificação Polar

O transceptor utiliza a codificação Polar sistemática [14] com palavras-código variando de 12 a 8192 bits. Contudo, na implementação atual, o tamanho da palavra-código é limitado a 2.048 bits. O ajuste da taxa, processo conhecido como *rate matching*, utiliza um comprimento de código Polar imediatamente maior que o número de bits disponíveis na alocação e funciona a palavra de código para o número de bits disponível. A implementação do software foi desenvolvida utilizando a linguagem C++. Essa implementação usa uma biblioteca de código aberto chamada AFF3CT [15], permitindo reduzir a complexidade do decodificador *Successive Cancellation Decoding* (SCD), conhecido como *Fast Simplified Successive Cancellation* (FAST-SSC) [16]. Este método pode reduzir o número de operações matemáticas considerando o conhecimento prévio das posições dos bits congelados. Nestes blocos são também empregadas as operações do SIMD. A decodificação Polar consiste na operação que mais demanda processamento na camada física do receptor e, por isso, essa implementação de baixa complexidade é

fundamental para que o transceptor possa apresentar alta vazão durante a operação em tempo real.

3.4.8 Modificações para o transceptor de complexidade reduzida

Os diagramas simplificados do transceptor de complexidade reduzida são mostrados nas Figuras 7 e 8. Como pode ser visto, a camada MAC não está presente e o empacotamento dos dados para *Internet Protocol* (IP) é executado por um bloco de tunelamento que utiliza uma interface de rede virtual do kernel do Linux.



Figura 7: Diagrama de blocos do transmissor ponto-a-ponto.



Figura 8: Diagrama de blocos do receptor ponto-a-ponto.

3.5 Descrição de arquitetura de software do transceptor Brasil 6G

Como já mencionado, a plataforma para o desenvolvimento do transceptor será o GNU Radio, executado em um computador com o sistema operacional Linux com distribuição baseada em Debian Ubuntu versão 20.04 (*Focal Fossa*). A versão mínima de kernel deve ser a 5.13, dada a compatibilidade necessária para a placa de vídeo que será utilizada.

Os módulos do GNU radio serão implementados utilizando a linguagem Python v3.8.10 ou C/C++, *GNU Compiler Collection* (GCC), na versão 9.4.0.

A linguagem Python é uma escolha que facilita não somente a programação, como também se adequa melhor a integração com o GNU Radio, porém apresenta algumas desvantagens quanto à capacidade de processamento e de priorização de *threads*. Alguns blocos proprietários foram escritos originalmente em Python, gerando uma necessidade de aceleração para operação em tempo real. Dois procedimentos podem ser executados para este fim: utilização de bibliotecas aceleradoras, como o Numba [17], ou desenvolvimento de uma nova implementação empregando C/C++.

Para a linguagem C/C++, bibliotecas de aceleração também devem ser empregadas. No que se refere ao uso de CPU, a opção de aceleração e processamento paralelo é executada via o método SIMD. Este método baseia-se na execução de uma instrução única para processar operações vetoriais. Para tanto, duas opções são utilizadas. A primeira, é a biblioteca Volk [11] que encontra automaticamente a forma mais eficiente de realizar a operação demandada utilizando o paralelismo e alinhamento de memória de acordo com a plataforma de processamento. Inicialmente, um comando desta biblioteca (*volk_profile*) deve ser executado para que as soluções de melhor desempenho encontradas para as operações aritméticas presentes que utilizem esta biblioteca sejam apontadas e registradas. A segunda abordagem consiste em apontar para estas soluções de forma direta, ou seja, chamando as funções intrínsecas (*SIMD*

intrinsic) explicitamente. A sintaxe de chamada destas funções são específicas e dependentes do processador, tipo e dimensão das variáveis utilizadas. Como a definição de hardware do transceptor estabelece o uso de processador Intel, as instruções são então definidas pelas especificações contidas na documentação AVX [10].

Os algoritmos de FFT utilizados na implementação pertencem ao bloco do GNU radio e à biblioteca FFTW3 [18]. Esta biblioteca é flexível e permite a adaptação ao hardware para uma otimização de desempenho, podendo efetuar até mesmo operações de *Discrete Fourier Transformer* (DFT) de blocos de dados de comprimento primo com alto desempenho.

A Tabela 3 fornece os repositórios de alguns dos principais softwares que são utilizados nos transceptores.

Tabela 3: Bibliotecas de código aberto. Compilação do código fonte

Biblioteca	Versão	Repositório
GNU radio	v3.9.2	https://github.com/gnuradio/gnuradio.git
Volk	v2.5.0	https://github.com/gnuradio/volk.git
AFF3CT	v2.3.5	https://github.com/aff3ct/aff3ct.git
USRP	v4.1.0	https://github.com/EttusResearch/uhd.git
OsmoSDR	v0.1.8	https://gitea.osmocom.org/sdr/gr-osmosdr.git
Lime SDR	v19.04	https://github.com/myriadrf/LimeSuite.git

Outra possibilidade para o ambiente de implementação consiste no uso da distribuição Anaconda [19]. Neste caso, o versionamento de softwares instalados, como também os pacotes de dependência, são administrados por esta ferramenta. Uma versão de ambiente utilizando esta metodologia também foi instalada e brevemente testada e os resultados preliminares mostram que o processo de instalação das ferramentas necessárias é mais simples com esta abordagem.

Para o aumento do poder de processamento em implementações de algoritmos de inteligência artificial, o transceptor de alto desempenho inclui uma placa de vídeo GeForce RTX 3070 da Nvidia. Sua utilização como *General Purpose Graphics Processing Unit* (GPGPU) é importante para a implementação de ferramentas utilizadas em aprendizado de máquina, seja para treinamento ou inferência. Uma delas é o TensorFlow [20]. Aplicativos que facilitam seu uso podem ser agregados, como o Keras [21].

Outras ferramentas também podem servir como apoio em termos de visualização e aceleração, como o TensorBoard e o compilador *Accelerated Linear Algebra* (XLA), que otimiza os cálculos do TensorFlow. É necessário observar, porém, que este compilador pode apresentar problemas de compatibilidade com o aplicativo Keras. Para que a aceleração seja executada adequadamente, a função a ser compilada deve acessar somente elementos que pertençam diretamente ao TensorFlow. A Tabela 4 apresenta os endereços dos repositórios para os softwares necessários para o uso da GPU.

Tabela 4: Instalações de software para uso da GPU

Software	Versão	Repositório
Nvidia Driver	v510.47	https://www.nvidia.com/Download/driverResults.aspx/186156
CUDA	v11.6	https://developer.nvidia.com/cuda-downloads
cuDNN	v8.4.0	https://developer.nvidia.com/cudnn

3.6 Análise de riscos para a implementação dos transceptores

Os principais riscos mapeados para a implementação das duas versões de transceptores serão descritos nas sub-seções a seguir.

3.6.1 Transceptor Brasil 6G de complexidade reduzida

O transceptor de complexidade reduzida contempla simplificações em sua infraestrutura, em relação ao transceptor de alta capacidade. Estas simplificações propiciam não somente redução das funcionalidades suportadas, como também um desempenho mais limitado. A vantagem oferecida, em contrapartida, é a demanda por uma menor capacidade de processamento o que, conseqüentemente, requer um hardware mais acessível

A seguir estão apresentadas alguns dos riscos de implementação mapeados com relação ao transceptor de complexidade reduzida:

- Capacidade computacional reduzida: visando redução de custos da solução, considera-se inicialmente o emprego de um sistema computacional de menor capacidade, o que impacta negativamente na implementação e suporte de funcionalidades, como por exemplo, suporte a múltiplos usuários, emprego de comunicação com maior largura de banda, implementação de funcionalidades de IA, dentre outras.
- Emprego de um *front-end* de RF de menor capacidade: visando redução de custos da solução, considera-se inicialmente o emprego de um front-end de RF com menor largura de banda, conversores digitais e analógicos com resolução mais baixa, menor taxa de amostragem e menor potência de transmissão. Estas restrições podem reduzir a eficiência espectral e/ou resultar no aumento da *Bit Error Rate* (BER).
- Emprego de uma referência de *clock* de menor precisão e estabilidade: os *front-ends* de RF de menor custo empregam uma referência de *clock* de menor precisão que impacta diretamente no desempenho do sincronismo e demodulação, podendo inviabilizar a correta detecção e demodulação do sinal de RF em casos extremos.
- Alguns dos *front-ends* de RF de baixo custo são fabricados e vendidos por meio de plataformas de financiamento coletivo (*crowdfunding*) e podem ter longo prazo de entrega, o que pode impactar nas atividades do projeto.
- A falta de documentação técnica e de suporte por parte dos fabricantes dos *front-ends* de RF de baixo custo podem comprometer o desenvolvimento das atividades previstas no projeto.
- Os *front-ends* de RF considerados serão testados e avaliados ao longo do projeto, sendo possível identificar limitações ou problemas de *hardware* ou *software* que impactam nas funcionalidades do rádio, bem como no desempenho do sistema.
- Considera-se o emprego de uma versão simplificada da camada MAC, o que reduz a capacidade de gerenciamento e controle do enlace de comunicação e dos terminais envolvidos.
- Não considera o emprego de placa de vídeo avançada: inviabiliza a implementação de algoritmos de IA.

- A implementação de sensoriamento espectral depende da capacidade de processamento disponível. O uso de um processador mais limitado e resultar na interrupção temporária do enlace de comunicação caso o sensoriamento espectral seja implementado na versão mais simples do transceptor.

3.6.2 Transceptor Brasil 6G de alta capacidade

Os principais riscos de implementação do transceptor de alta capacidade estão listados a seguir.

- Capacidade computacional: os testes iniciais realizados envolvendo a camada MAC com suporte a múltiplos usuários demonstrou uma grande dependência da quantidade de recursos computacionais disponíveis. Desta forma, o número de usuários suportados pela plataforma pode ser limitada pela capacidade computacional disponível;
- Gerenciamento de recursos de transmissão: a complexidade e dependência do gerenciamento da alocação de recursos de transmissão aumenta com o aumento do número de terminais suportados, impactando no aumento de recursos de processamento e aumento da complexidade e, conseqüentemente, risco de implementação.
- Estabilidade de operação: os algoritmos que compõem o rádio demandam a execução de múltiplas *threads* em paralelo e seu gerenciamento é complexo. O gerenciamento inadequado do uso do processador pode resultar em falhas e até mesmo na inoperância do rádio.
- Sincronização de múltiplos usuários: a sincronização da transmissão do sinal dos múltiplos usuários para a estação rádio base deve ser realizada de maneira bastante precisa e dependente da distância física dos terminais. A implementação deste processo de sincronização é bastante complexo e pode ser considerado como uma etapa de alto risco para a correta operação do sistema.
- Integração do sistema com algoritmos de IA: a integração dos algoritmos baseados em IA podem demandar alterações nas etapas de processamento inicialmente previstas para o sistema e pode gerar uma maior carga computacional.

Os riscos apresentados nesta seção estão sendo continuamente avaliados pela equipe executoras e medidas para a contenção dos mesmos serão apresentadas no decorrer do desenvolvimento das duas versões do transceptor.

4 Redes Complementares

Diego G. S. Pivoto, Tibério Tavares Rezende
 diego.gabriel@inatel.br, tiberio@mtel.inatel.br

Essa seção apresenta informações relacionadas às redes complementares para suporte ao Projeto Brasil 6G. A subseção 4.1 introduz a proposta de um enlace satelital como rede complementar à rede de acesso do projeto, como possíveis cenários de integração com os transceptores Brasil 6G. Além disso, as Seções 4.2 e 4.3 descrevem as plataformas complementares para a integração entre os laboratórios do Inatel e as demais instituições parceiras, fornecendo conectividade através de um ambiente de nuvem computacional e de servidores FIBRE distribuídos pela Plataforma Brasil 6G.

4.1 Enlace Satelital

Ao longo do ano de 2018, a parceria estabelecida entre o SINDISAT e o Inatel resultou em dois projetos de pesquisa que geraram diversos relatórios para o projeto “5G Brasil”. A importância das redes satelitais no desenvolvimento e implantação das redes 5G e 6G tem alavancado o interesse acadêmico sobre este tema e novos projetos de pesquisa pertinentes a esta frente de trabalho surgiram em função desta parceria. Atualmente, o setor satelital apresenta um elevado interesse por soluções que empreguem *Low Earth Orbit* (LEO), *Medium Earth Orbit* (MEO) *Geostationary Orbit* (GEO). O SINDISAT irá contribuir com o projeto Brasil 6G fornecendo um enlace que poderá ser integrado à plataforma que está sendo desenvolvida.

Dentro deste escopo pretende-se desenhar uma arquitetura de rede 5G e 6G considerando o enlace via satélite como sendo parte inerente da rede móvel. A abordagem descrita a seguir, consiste em empregar o *Untrusted N3A* com Satélite em *Backhaul* e com o Transceptor Brasil 6G para prover conectividade em áreas remotas e rurais. Este cenário possibilita a integração de vários componentes da Plataforma Brasil 6G, tal qual ilustrado na Figura 9. Esta figura ilustra o servidor FIBRE Edge 2 suportando o European Telecommunications Standards Institute (ETSI) *Network Function Virtualization* (NFV) *Open Source MANO* (OSM) que executa como um contêiner *Docker* e é orquestrado dentro de um único *cluster* Kubernetes. Para melhor compreensão, a Figura 9 mostra um corte vertical com as pilhas de protocolos previstas nos planos de dados e controle da rede. Continuando, o *cluster* Kubernetes inclui ainda o Servidor Brasil 6G (fora do FIBRE) e um laptop que roda um emulador de UE. Esses três *Pods* do *cluster* são ilustrados como caixas cinzas na Figura 9. Repare que os programas Nginx, LEMP Stack, BIND DNS e Geo IP, necessários para a aplicação *Content Distribution Network* (CDN) são executados no servidor FIBRE Edge 2. O servidor Brasil 6G executa o *cluster master* do Kubernetes, com suporte a um multiplexador desenvolvido pela Unisinos e UFG para configuração de interface de rede dos contêineres *Docker*. Os componentes do free5GC também são executados neste servidor, além da ferramenta my5G-RAN-Tester, também desenvolvida pela Unisinos e UFG com foco na automação de testes de sinalização e fatiamento de recursos. Ainda, o servidor Brasil 6G roda a função *Network Slice Subnet Management Function* (NSSMF) para suporte ao fatiamento. A *Network Functions Virtualization Infrastructure* (NFVI) do laptop é gerenciada pelo mesmo *Virtual Infrastructure Manager* (VIM) que se encontra no FIBRE Edge 2. Nesse laptop, também existem os componentes de CDN do lado de acesso, nomeadamente: Nginx e Vanish cache (para avaliação de cache CDN no lado remoto do *fronthaul*).

Um dos desafios de se levar cobertura em áreas remotas consiste na instalação de equipamentos de elevado custo em áreas remotas e rurais. O uso da tecnologia de *Radio over Fiber* (RoF)

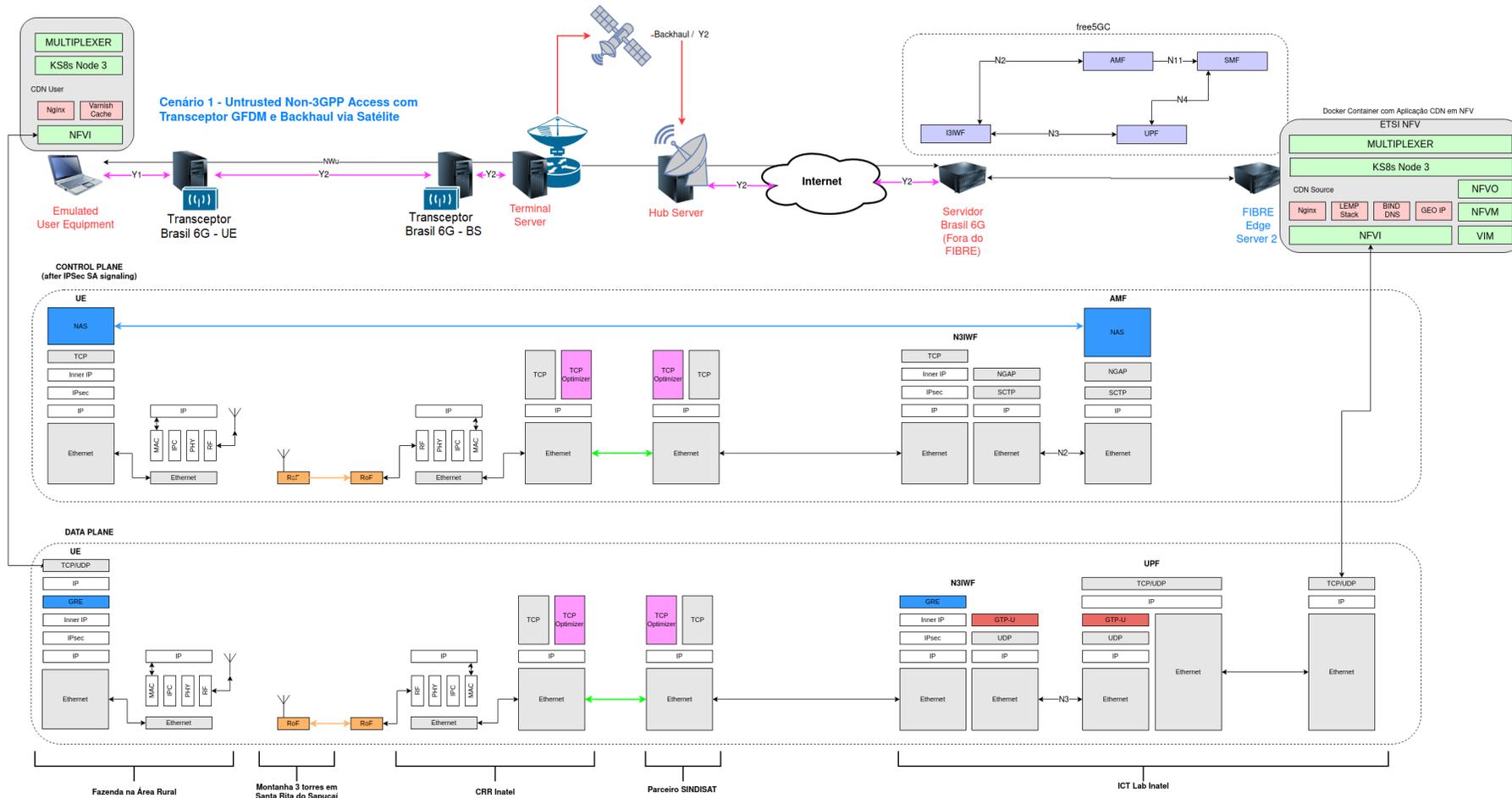


Figura 10: Abordagem para integração da rede satelital ao Projeto Brasil 6: visão vertical.

4.2 Ambiente de *Cloud Computing* (UFG)

O paradigma de computação em nuvem introduziu um novo modelo de entrega de serviços onde *data centers* hospedam um conjunto de recursos de tecnologia da informação e atendem múltiplas demandas de serviços diferentes, atribuindo às aplicações recursos de processamento e armazenamento de forma dinâmica e elástica.

Nos últimos anos, operadores de redes móveis estão evoluindo suas infraestruturas em direção a ambientes de execução similares aos encontrados nos *data center* de computação em nuvem. Essa decisão é motivada em grande parte pela necessidade de implementar novos modelos de negócios que atraiam o segmento vertical, como também pela possibilidade de reduzir custos com o uso de hardware de propósito geral e NFV. Uma consequência da introdução dos conceitos de computação em nuvem nas redes móveis de próxima geração é a possibilidade de implantar e escalar dinamicamente componentes de serviços em diferentes partes da rede, e.g., na borda ou na *cloud*, desde que as restrições de largura de banda e latência sejam satisfeita. Essa capacidade, denominada de orquestração de serviço, possibilita a acomodação e instanciação dos serviços da rede de acordo com a demanda.

O ambiente de *Cloud Computing* previsto na infraestrutura de experimentação do projeto Brasil 6G, juntamente com a rede de acesso, a rede FIBRE, e o enlace satelital, cria um ecossistema abrangente para as investigações conduzidas no projeto, especialmente aquelas relacionadas a orquestração de serviços. O ambiente de *Cloud Computing* é provido pelo LaMCAD, um data center para pesquisa, localizado no parque tecnológico da UFG. O LaMCAD é um centro multi-usuário voltado para atender a demanda por computação científica da UFG e de universidades parceiras com as quais o laboratório pode estabelecer colaborações. O objetivo do laboratório é oferecer à comunidade acadêmica da UFG e instituições parceiras recursos computacionais voltados para computação científica que demandem alto poder de processamento, bem como serviços de computação em nuvem.

4.3 Rede FIBRE

A ilha operacional da rede FIBRE da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) está localizada no *Information and Communications Technologies Laboratory* (ICT Lab) do Inatel/MG e até o momento da escrita desse relatório possui quatro nós ativos em operação. Os nós foram denominados respectivamente: FIBRE EDGE 1, 2, 3 e 4 para facilitar a identificação e o gerenciamento. Para que os servidores pudessem ser integrados à rede FIBRE, diversos trabalhos e configurações tiveram que ser realizados tanto nas máquinas físicas, como na formatação e instalação de *softwares* e na rede interna do ICT Lab.

Dentro do escopo do projeto Brasil 6G, o ICT Lab do Inatel/MG administra um nó operacional da rede *Future Internet Brazilian Environment for Experimentation* (FIBRE) da RNP [22]. O FIBRE é um centro de pesquisa construído no âmbito de um projeto anterior financiado pela Chamada Coordenada Brasil-UE, realizados, respectivamente, em 2010 e 2012 na área de Tecnologia da Informação e Comunicação [22]. O FIBRE pode ser definido como um laboratório virtual em larga escala para o desenvolvimento de novas aplicações e novas arquiteturas de Internet. Embora o FIBRE possa ser utilizado por qualquer estudante, pesquisador ou desenvolvedor que queira acesso a um ambiente de experimentação real, os cenários ficarão restritos aos participantes do projeto Brasil 6G. O FIBRE é formado por uma federação de ilhas de experimentação, abrigadas em diversas universidades e instituições de pesquisa brasileiras e também está disponível remotamente [22].

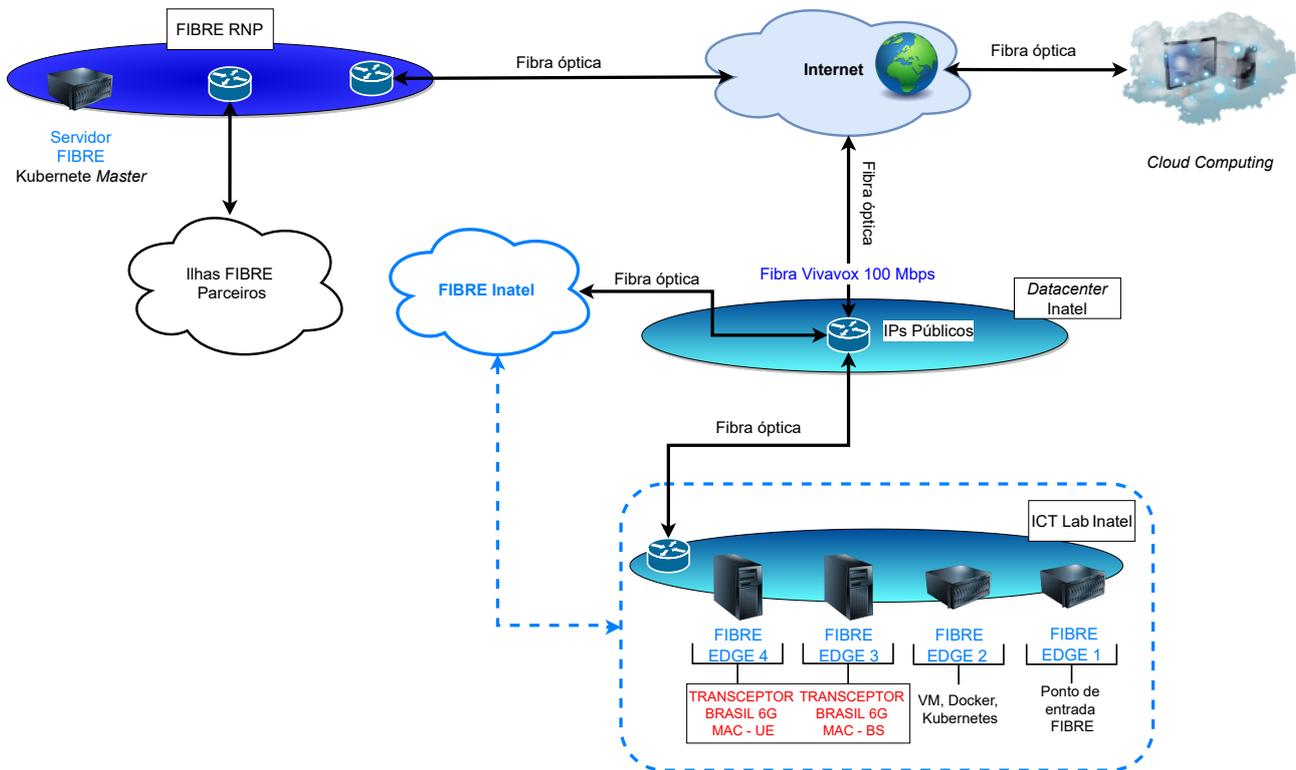


Figura 11: Organização atual da rede FIBRE no Inatel/MG.

A Figura 11 mostra o estado atual da ilha FIBRE do Inatel com os servidores em funcionamento atendendo simultaneamente os projetos SINDISAT C: Redes 5G e Redes Satelitais e Brasil 6G. Os servidores FIBRE EDGE 1, 2, 3 e 4 estão em operação e podem se comunicar entre si e com outras ilhas das instituições parceiras através da rede FIBRE RNP. O servidor EDGE 1 é o ponto de entrada da rede FIBRE no Inatel. Esse ponto passa pela conexão de fibra óptica com a configuração de IPs públicos válidos. Os servidores FIBRE EDGE 2, 3 e 4 podem suportar máquinas virtuais e aplicações para testes dentro do projeto. O ICT Lab possui uma conexão com a Internet de 100 Mbps fornecida pela empresa parceira do laboratório ICT Lab Vivavox, de Santa Rita do Sapucaí, MG. A rede FIBRE da RNP possui uma ilha com um servidor que gerencia as outras ilhas de instituições parceiras através de um nó *master*. Implementações estão sendo feitas nos servidores FIBRE EDGE 2, 3 e 4 em relação as plataformas de virtualização e redes definidas por *software*.

O Inatel já fazia utilização da plataforma de forma remota com o sistema antigo do FIBRE, e agora integra as dezoito ilhas operacionais distribuídas pelo país [22]. Cada ilha possui um conjunto de dispositivos de rede para suportar experimentos em tecnologias fixas e sem fio. Eles são conectados por uma rede *overlay* no *backbone* RNP, composta por duas camadas de rede separadas: um plano de controle e um plano de experimento, na rede denominada “FIBREnet”. O modelo de governança permite que cada instituição participante tenha autonomia sobre seus recursos locais, podendo utilizar recursos de outras ilhas para configurar experimentos de rede e não é necessário hospedar uma ilha experimental para usar o ambiente de testes. Diversos trabalhos foram publicados com o apoio do cenário de testes FIBRE, para citar os mais recentes, encontra-se: Pedrosa *et al.* [23], Brito, Ribeiro e Sampaio [24], Folly *et al.* [25], Silva, Fernandes e Saade [26] e Ferreira *et al.* [27].

Os operadores da rede FIBRE trabalham para gerenciar os usuários e os comandos efetu-

ados nos servidores para que a segurança da rede não seja comprometida. O FIBRE utiliza um sistema de compartilhamento de recursos de laboratórios, facilitando e viabilizando experimentos em larga escala, suportados por virtualização. Os objetivos do FIBRE se destacam por buscar [22]: (i) construir um *testbed* de Internet no Brasil, interligando instituições de pesquisa em diversos estados do país e em parceria com outras iniciativas de *testbed* em todo o mundo; (ii) fornecer uma plataforma de grande escala para promover a pesquisa da Internet do Futuro no Brasil e região e (iii) incentivar os educadores a usar o *testbed* para aulas em rede para promover uma nova geração de pesquisadores.

4.4 Definição de possível arquitetura Non-3GPP Access - Wi-fi (UFG)

Nesta seção, apresentamos um protótipo de arquitetura de acesso à rede 5G/6G via rede de acesso Wi-Fi não 3GPP não confiável. O ambiente experimental, inclui as ferramentas de software e as configuração dos componentes pertencentes ao sistema 5G. Será utilizado um equipamento de usuário genérico via software de código aberto, utilizado para acessar a rede a partir da conexão wifi não 3GPP não confiável. Entretanto, o equipamento de usuário pode ser alterado futuramente para qualquer tecnologia de acesso não confiável não 3GPP. Figura 12 apresenta a arquitetura proposta inicialmente e os componentes necessários.

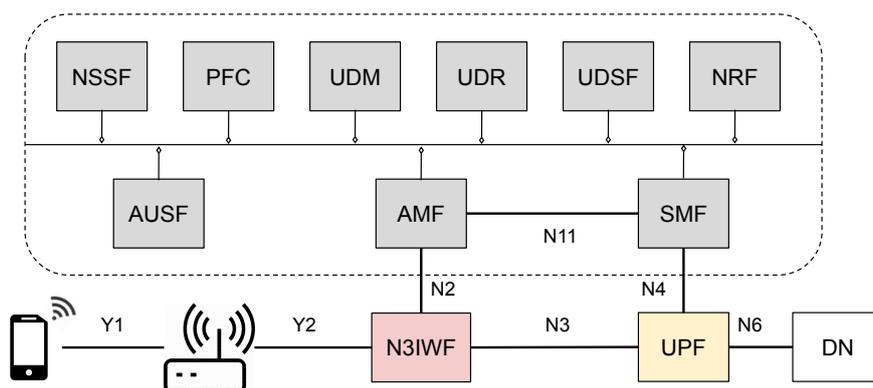


Figura 12: Arquitetura Non-3GPP Access - Wifi proposta.

Para implementação da arquitetura proposta serão utilizadas soluções de código aberto para implementação do sistema, que incluem, o sistema operacional Linux Ubuntu versão 18.04, o equipamento de usuário via software disponível pelo projeto My5G, e o núcleo da rede baseado no projeto Free5GC, que implementa um núcleo 5G autônomo básico, mas totalmente funcional, de acordo com o 3GPP Release 15.

5 Conclusão

Luciano Leonel Mendes
luciano@inatel.br

Um dos grandes desafios na concepção das redes 6G consiste em avaliar se as complexas tecnologias habilitadoras efetivamente suportam os requisitos das diversas aplicações já vislumbradas para a futura reede móvel. O desenvolvimento de um ambiente para experimentação que permita testar as diversas tecnologias propostas para as diferentes camadas é essencial para validar as contribuições realizadas pela equipe do projeto Brasil 6G.

Este relatório apresentou a concepção da chamada Plataforma Brasil 6G, composta por equipamentos e sistemas que permitam a implementação de algoritmos para as camadas física, de enlace e de rede, além de abrigar equipamentos voltados para execução de funções do núcleo da rede e de aplicações voltadas para diferentes verticais. Um dos destaques desta plataforma é sua capacidade para implementação de redes de acesso empregando SDR. A possibilidade de implementar o núcleo da rede em diferentes ambientes, como no servidor Brasil 6G ou em uma das redes associadas à plataforma, como o ambiente de *Cloud Computing* oferecido pela UFG, é outro ponto de destaque da plataforma proposta neste documento. Finalmente, a integração da Plataforma Brasil 6G com a rede satelital fornecida pelo SINDISAT Brasil é um recurso que irá permitir avaliar a integração de satélites como parte inerente das futuras redes móveis.

A concepção da plataforma apresentada neste relatório servirá como referência para a especificação de todos os seus elementos de software e de hardware, que serão descritos e especificados nos relatórios complementares das atividades previstas na meta 2 do projeto Brasil 6G.

Referências

- [1] Projeto Brasil 6G, “Estado da Arte em Inteligência Artificial Aplicada a Redes 6G,” *Inatel*, agosto 2021.
- [2] C. De Lima, D. Belot, R. Berkvens, A. Bourdoux, D. Dardari, M. Guillaud, M. Isomursu, E.-S. Lohan, Y. Miao, A. N. Barreto *et al.*, “Convergent communication, sensing and localization in 6G systems: An overview of technologies, opportunities and challenges,” *IEEE Access*, 2021.
- [3] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, e G. C. Trichopoulos, “Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond,” *IEEE Access*, v. 7, p. 78 729–78 757, 2019.
- [4] Y. Yuan, Y. Zhao, B. Zong, e S. Parolari, “Potential key technologies for 6G mobile communications,” *Science China Information Sciences*, v. 63, 2020.
- [5] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) Inatel, “Contribuições para a Camada Física de Redes 6G,” *Projeto Brasil 6G*, fev. 2022.
- [6] Anatel, “Resolução Anatel Nº 747, de 5 de outubro de 2021,” [Online]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anatel-n-747-de-5-de-outubro-de-2021-350609897>. Acessado em: 14 de julho de 2022.
- [7] Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) Inatel, “Atividade 2.2 - Definição dos componentes de hardware da plataforma,” *Projeto Brasil 6G*, Jul. 2022.
- [8] I. Gaspar, N. Michailow, A. Navarro, E. Ohlmer, S. Krone, e G. Fettweis, “Low complexity GFDM receiver based on sparse frequency domain processing,” in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, 2013, p. 1–6.
- [9] A. Nimr, M. Chafii, e G. P. Fettweis, “Unified low complexity radix-2 architectures for time and frequency-domain GFDM modem,” *IEEE Circuits and Systems Magazine*, v. 18, n. 4, p. 18–31, 2018.
- [10] *Intel Intrinsic Guide*, 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/intrinsic-guide/index.html>
- [11] J. Demel e et al, “Vector-optimized library of kernels (volk),” Feb. 2022. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6052858>
- [12] D. Chu, “Polyphase codes with good periodic correlation properties,” *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 18, p. 531–532, July 1972.
- [13] I. A. Ali, U. Wasenmüller, e N. Wehnn, “A high throughput architecture for a low complexity soft-output demapping algorithm,” *Advances in Radio Science*, v. 13, p. 73–80, Nov 2015, doi:10.5194/ars-13-73-2015.
- [14] E. Arikan, “Systematic polar coding,” *IEEE communications letters*, v. 15, n. 8, p. 860–862, 2011.

- [15] A. Cassagne, O. Hartmann, M. Leonardon, K. He, C. Leroux, R. Tajan, O. Aumage, D. Barthou, T. Tonnellier, V. Pignoly *et al.*, “AFF3CT: A Fast Forward Error Correction Toolbox!” *SoftwareX*, v. 10, p. 100345, 2019.
- [16] G. Sarkis, P. Giard, A. Vardy, C. Thibeault, e W. J. Gross, “Fast polar decoders: Algorithm and implementation,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 32, n. 5, p. 946–957, 2014.
- [17] S. K. Lam, A. Pitrou, e S. Seibert, “Numba: A llvm-based python jit compiler,” in *Proceedings of the Second Workshop on the LLVM Compiler Infrastructure in HPC*, 2015, p. 1–6.
- [18] M. Frigo e S. G. Johnson, “The Design and Implementation of FFTW3,” *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 2, p. 216–231, 2005, special issue on “Program Generation, Optimization, and Platform Adaptation”.
- [19] “Anaconda software distribution,” 2020. [Online]. Disponível em: <https://docs.anaconda.com/>
- [20] M. Abadi e et al, “TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems,” 2015, software available from [tensorflow.org](https://www.tensorflow.org/). [Online]. Disponível em: <https://www.tensorflow.org/>
- [21] F. Chollet *et al.* (2015) Keras. [Online]. Disponível em: <https://github.com/fchollet/keras>
- [22] R. N. de Ensino e Pesquisa, “Future internet brazilian environment for experimentation,” in *FIBRE Testbed*. [Online:] Disponível em: <https://www.fibre.org.br/>, May 2022.
- [23] D. Pedroso, B. Lopes, C. Marcondes, P. Matias, e E. Barea, “Proposta de testbed para experimentação de plano em dados em redes,” *Anais do IX WPEIF 2018 – Workshop de Pesquisa Experimental da Internet do Futuro*, Mar. 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.fibre.org.br/documentation/publications/>
- [24] I. V. S. Brito, A. V. Ribeiro, e L. N. Sampaio, “Sdn-ips: Uma ferramenta para contenção automatizada e colaborativa de ataques cibernéticos baseada em sdn,” *XXXVI Simpósio de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2018)*, 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.fibre.org.br/documentation/publications/>
- [25] L. E. Folly, M. F. Schwarz, G. Araújo, A. S. Moura, e L. N. Ciuffo, “Fibrenet – o backbone do testbed fibre,” *Anais do IX WPEIF 2018 – Workshop de Pesquisa Experimental da Internet do Futuro*, 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.fibre.org.br/documentation/publications/>
- [26] E. F. Silva, N. C. Fernandes, e D. C. M. Saade, “Across: A generic framework for attribute-based access control with distributed policies for virtual organizations,” *Future Generation Computer Systems -The International Journal of eScience*, v. 78, p. 1–17, 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.fibre.org.br/documentation/publications/>
- [27] F. A. Ferreira, F. S. Miranda, Élcio Carlos do Rosário, V. H. D. D’Avila, e A. M. Alberti, “Novagenesis no ambiente fibre: Primeiras impressões,” *Anais do VIII WPEIF 2017 – Workshop de Pesquisa Experimental da Internet do Futuro*, p. 6–9, 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.fibre.org.br/documentation/publications/>