

# USO DA FAIXA DE RADIOFREQUÊNCIAS DE 6GHZ PARA SISTEMAS IMT (5G E FUTUROS SISTEMAS 6G) MAXIMIZARÁ OS BENEFÍCIOS ECONÔMICO-SOCIAIS PARA O BRASIL

Fundamentação e Modelo Matemático

Por Agostinho Linhares e Leonardo Euler de Morais

https://ipedigital.tech

# Uso da Faixa de Radiofrequências de 6 GHz para Sistemas IMT (5G e Futuros Sistemas 6G) Maximizará os Benefícios Econômico-Sociais para o Brasil: Fundamentação e Modelo Matemático

#### Resumo

Há diversos estudos sobre o uso da faixa de 6 GHz, seja para o IMT, seja para o padrão WiFi, incluindo alguns com foco no cenário brasileiro. Nesse contexto nacional, destacam-se os estudos da GSMA e da DSA. Na avaliação da GSMA, no ano de 2035, o uso de 1200 MHz na faixa de 5.925 MHz – 7.125 MHz para sistema IMT poderia impactar o PIB em 0,46%, enquanto o uso total dessa faixa por sistemas WiFi6E impactaria em 0,42%. Por outro lado, o uso combinado desses sistemas, este com 500 MHz e aquele com 700 MHz, impactaria o PIB em 0,68%.

Tendo esses parâmetros como referência, desenvolveu-se um modelo de otimização matemática, em função de curva de utilidade, a fim de estimar qual solução traria o maior benefício econômico-financeiro para o Brasil. Os resultados confirmam que a destinação de 700 MHz para sistemas IMT e 500 MHz para WiFi6E é a melhor combinação.

#### Abstract

There are several studies on the use of the 6 GHz band, including some focusing on the Brazilian scenario. In this national context, studies by GSMA and DSA stand out. According to GSMA's assessment, in the year 2035, the use of 1200 MHz in the 5,925 MHz -7,125 MHz band for IMT systems could impact the GDP by 0.46%, while the total use of this band by WiFi6E systems would result in a 0.42% impact. On the other hand, the combined use of these systems, with 500 MHz for latter and 700 MHz for the other, would impact the GDP by 0.68%.

Using these parameters as a reference, a mathematical optimization model was developed based on a utility function to estimate which solution would bring the greatest economic-financial benefit to Brazil. The results confirm that allocating 700 MHz for IMT systems and 500 MHz for WiFi6E is the best combination.

#### **Originalidade Deste Trabalho**

Não foi identificado na literatura um trabalho que utilize programação não-linear, para modelar a destinação ótima do espectro de radiofrequências para diferentes serviços ou aplicações, em função do impacto de tal destinação no Produto Interno Bruto de um país. Tendo como referência um estudo da GSMA para testar o modelo, o ajuste do equacionamento proposto foi bem-sucedido e os resultados compatíveis com as conclusões da GSMA.

Assim, este trabalho apresenta um modelamento matemático original, que pode ser aplicado em diferentes cenários.

#### 1 - Introdução

Em fevereiro de 2021, a Anatel definiu os requisitos técnicos e operacionais que permitem o uso da faixa de 5.925 – 7.125 MHz, para "Sistema de Acesso Sem-Fio em Banda Larga para Redes Locais", conhecido internacionalmente como "WAS/RLAN – *Wireless Access System, including Radio Local Access Network*)", sendo o WiFi6E a tecnologia mais conhecida nessa faixa de radiofrequências. Em outras palavras, a Anatel destinou toda a faixa de 6 GHz para o WiFi6E.

Durante a Conferência Mundial de Radiocomunicações 2023 (WRC-23), a Administração Brasileira atuou para identificar a faixa de 6.425 – 7.125 MHz para IMT (*International Mobile Telecommunications*) e foi bem-sucedida. Destaca-se que quando se trata de sistemas IMT na faixa de 6 GHz, está-se considerando tanto o IMT-2020 (equivalente aos sistemas 5G), quanto o IMT-2030 (equivalente aos futuros sistemas 6G).

Quando da destinação de faixas de radiofrequências para serviços ou aplicações de telecomunicações, cabe ao órgão regulador avaliar qual solução trará os maiores benefícios econômico-sociais ao país. Adicionalmente, conforme previsto no art. 161 da Lei Geral de Telecomunicações (Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997), "a qualquer tempo, poderá ser modificada a destinação de radiofrequências ou faixas, bem como ordenada a alteração de potências ou de outras características técnicas, desde que o interesse público ou o cumprimento de convenções ou tratados internacionais assim o determine" (grifos nossos).

Quando se trata de interesse público, deve-se considerar o interesse da coletividade como um todo, incluindo pessoas (físicas ou jurídicas), setores da indústria e da economia, e, também, o próprio Estado. Baseado no interesse público, o Estado define suas políticas públicas, prioriza os anseios sociais e resolve lacunas na prestação de serviços públicos, com o propósito de melhorar o bem-estar da sociedade.

Por outro lado, o interesse privado é o interesse de um indivíduo, de um grupo ou grupos específicos, que não necessariamente representam o que é melhor para o conjunto de todos os interesses privados dos partícipes de uma sociedade. Na Administração Pública, adota-se o **princípio da supremacia do interesse público sobre o privado**. Dessa forma, o princípio serve para inspirar o regulador, que deve considerar a predominância do interesse público sobre o privado na hora de editar normas.

Ademais, cabe ao Poder Executivo e ao Legislativo definir as Políticas Públicas de Telecomunicações no Brasil. O primeiro por meio de Decretos e Portarias, e o segundo por meio de Leis. Por exemplo, o <u>Decreto nº 9.612/2018</u> estabelece as políticas públicas de telecomunicações no Brasil; enquanto a <u>Lei nº 9.998/2000</u> estabelece as finalidades que norteiam a aplicação do FUST (Fundo de Universalização das Telecomunicações), como a necessidade de dotar todas as escolas públicas brasileiras, em especial as situadas fora da zona urbana, de acesso à internet em banda larga, em velocidades adequadas, até 2024.

Assim, em um país de dimensões continentais como o Brasil, com tantos problemas nas áreas de educação, infraestrutura, segurança e saúde, entre outros, ampliar a conectividade com qualidade adequada, combinado com o letramento digital da população, é um desafio que deve

ser enfrentado e vencido, para o bem da sociedade. O art.2º, I da LGT determina que "o Poder Público tem o dever garantir, a toda a população, o acesso às telecomunicações, a tarifas e preços razoáveis, em condições adequadas"; combinado com o art.3º, I da mesma Lei, que estabelece "o usuário de serviços de telecomunicações tem direito de acesso aos serviços de telecomunicações, com padrões de qualidade e regularidade adequados à sua natureza, em qualquer ponto do território nacional", formam princípios que inspiram as políticas públicas de telecomunicações. Historicamente, os editais de licitação de espectro de radiofrequências têm sido uma das fontes de recursos financeiros mais relevantes para atendimento de tais políticas públicas.

Corroborando com a explanação anterior, destaca-se a Portaria MCOM nº 10.787/2023, que institui o Programa Nacional de Melhoria da Cobertura e da Qualidade da Banda Larga Móvel (ConectaBR), com o objetivo de ampliar a cobertura e o acesso à Banda Larga Móvel em todo o território nacional, com qualidade e velocidade adequadas à tecnologia empregada, a fim de incentivar a conectividade significativa e a inclusão digital, entre outros objetivos. Observa-se que o art.9º da Portaria prevê que, para consecução dos objetivos de qualidade definidos, a Anatel avaliará a necessidade de disponibilização de novas faixas de radiofrequências para o setor de telecomunicações móveis.

Assim, este estudo foi desenvolvido para contribuir nas discussões sobre a melhor destinação para a faixa de 6 GHz no Brasil, apresentando uma abordagem inovadora, com o uso de importante ferramenta matemática, que é a programação não-linear, para resolver o seguinte problema de otimização: qual arranjo de radiofrequências em 6 GHz para os sistemas IMT e WAS/RLAN tem o potencial de trazer o maior impacto no PIB brasileiro. Os resultados confirmam que a destinação de 700 MHz para sistemas IMT e 500 MHz para WiFi6E é a combinação que potencialmente maximiza o impacto no PIB brasileiro.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: a **Seção 2** discorre sobre benefícios econômico-sociais do uso do espectro de radiofrequências; a **Seção 3** explica os fundamentos para o desenvolvimento de políticas públicas por intermédio da administração do espectro de radiofrequências; na sequência, a **Seção 4** apresenta estudos anteriores sobre a faixa de 6 GHz que utilizaram o Brasil como cenário; a **Seção 5** retoma a discussão sobre a supremacia do

interesse público sobre o privado; a **Seção 6** merece um destaque especial, pois apresenta uma modelagem matemática original no tratamento da melhor destinação do espectro de radiofrequências para diferentes serviços ou aplicações; complementarmente a **Seção 7** traz um tema atual e de extrema relevância, que é como a destinação ótima da faixa de 6 GHz pode contribuir no atendimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU; por fim, a **Seção 8** apresenta as principais conclusões desse trabalho.

## 2 - Abordagens para avaliar o Benefício Econômico-Social do Uso do Espectro de Radiofrequências

De acordo com a (OCDE, 2014), há três abordagens mais comuns para avaliar o valor econômico do espectro: (i) **bem-estar econômico**; (ii) **contribuição econômica**; (iii) **aumento na produtividade**.

A abordagem de bem-estar econômico se fundamenta na teoria microeconômica clássica, calculando a soma do excedente econômico gerado por consumidores e produtores. Embora seja comumente referido como "bem-estar social", esse termo abrange apenas os excedentes acumulados nos mercados e expressos em termos monetários. Geralmente, o bem-estar econômico é composto pelo excedente do consumidor e do produtor. O excedente do consumidor representa a diferença entre a disposição de cada usuário em pagar por um serviço específico e seu preço real. Analogamente, o excedente do produtor reflete a diferença entre o preço pago e o preço mais baixo pelo qual o vendedor estaria disposto a vender (tipicamente o custo marginal de produção). A soma desses excedentes fornece o benefício global de um serviço oferecido no mercado, como no caso de serviços de comunicação móvel (OCDE, 2014).

Por outro lado, a abordagem da "contribuição econômica" avalia o valor agregado de diferentes indústrias envolvidas na cadeia de valor do serviço móvel no Produto Interno Bruto (PIB). Adicionalmente, a abordagem do "aumento na produtividade" busca medir o crescimento como resultado da adoção de serviços, que utilizam recursos de espectro, pois o uso desses serviços leva a uma produção econômica mais ampla, mantendo constantes o capital e o

trabalho. Por exemplo, um funcionário pode proporcionar uma produção mais elevada ao otimizar o tempo com o uso das comunicações móveis (OCDE, 2014).

Conforme explicado por (Mazar, 2016), os efeitos diretos sobre o Produto Interno Bruto (PIB) ocorrem quando as empresas fornecem serviços sem fio, como banda larga móvel. Adicionalmente, deve-se considerar toda a cadeia de valor impactada pela nova tecnologia ou faixa de radiofrequências utilizada, o que inclui empresas que fabricam equipamentos, distribuem ou comercializam serviços para a operadora móvel (ligação para frente), e empresas que fabricam equipamentos ou fornecem serviços, como recrutamento e tecnologia da informação, apoiando as operadoras móveis (ligação para trás). A contribuição para o PIB e o emprego é proporcional à combinação desses efeitos, tanto os que envolvem diretamente o setor móvel, quanto outros setores que dão suporte às operadoras móveis. Também deve-se considerar o impacto dos "efeitos multiplicadores". Estes surgem do impacto dos salários e lucros gerados em todas as empresas associadas ao uso do novo sistema móvel, à medida que se espalham pelo restante da economia do país e, no processo, criam mais renda e emprego. Um "efeito multiplicador" típico em comunicações móveis é de aproximadamente 1,4 vezes.

### 3 - Desenvolvimento de Políticas Públicas por Intermédio da Administração do Espectro de Radiofrequências

De acordo com (OCDE 2022), os procedimentos licitatórios de espectro de radiofrequências devem incluir simultaneamente três considerações-chaves em seu modelamento: (i) ampliação de cobertura; (ii) fomento de investimento; e (iii) promoção da concorrência.

A experiência brasileira com o "Edital 5G" (Anatel, 2021) foi exitosa. O valor econômico do espectro licitado foi de 47,2 bilhões de reais, com aproximadamente 90% desse valor revertido em diversos compromissos. Essas obrigações estão associadas às políticas públicas estabelecidas pelo Poder Executivo, que no caso desse edital reservou 3,1 bilhões de reais para investimento em conectividade nas escolas; cobertura de mais de 30 mil quilômetros de rodovias federais; implantação de *backhaul* de fibra óptica; lançamento de cabos ópticos subfluviais em

rios da Amazônia; ampliação da cobertura 4G no Brasil e planejamento de cobertura 5G em todos os municípios brasileiros; além de trazer novos competidores para o mercado de telecomunicações móveis no Brasil. Isto é, são mais de 40 bilhões de reais do setor de telecomunicações a serem investidos no próprio setor até 2030.

Utilizando-se dos conceitos de microeconomia, sem a definição de políticas públicas de telecomunicações, as operadoras móveis têm incentivo de investir em cobertura até o ponto em que a receita relacionada a adição de uma estação radiobase (ERB) a mais iguala ao custo pela adição daquela estação. Em outras palavras, o custo marginal iguala a receita marginal, conforme indicado na Fig.1. A adição de uma nova estação, tipicamente em locais com menor densidade populacional, com maior tempo de deslocamento para efetuar manutenção, condições tipicamente piores de suprimento de energia elétrica e segurança, desincentivam a ampliação da rede.

Políticas públicas do Poder Executivo ou mesmo determinação do regulador podem fazer com que uma operadora móvel amplie sua cobertura além do ponto de equilíbrio receita marginal x custo marginal. Todavia, deve ficar claro de onde virão esses recursos, que podem vir, por exemplo, de regras de licitação, Termo de Ajustamento Conduta (TAC), Obrigações de Fazer (ODF), prorrogações de uso de radiofrequências, entre outras medidas, todas essas devendo ser devidamente precificadas. A Fig.2 mostra a ampliação do atendimento além do ponto de cobertura comercial máxima, até um ponto de cobertura comercial competitiva viável. Além deste último ponto, começa-se a gerar uma situação tendendo ao monopólio natural, em que, no limite, a exploração comercial do serviço pode ser viável se existir somente uma operadora (podendo ser definidas políticas públicas ou regulamentação para facilitar o *roaming* nessas localidades).

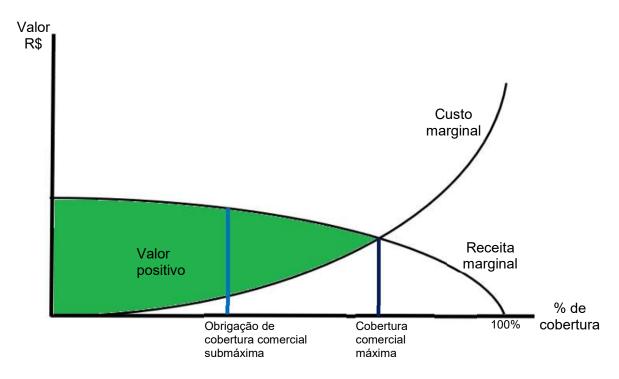


Fig.1 – Cobertura comercial máxima. O incentivo natural das operadoras móveis é investir em cobertura até o ponto em que receita marginal e custo marginal se igualam.

Fonte: Adaptado de (Coleago, 2019).

No Brasil, os editais de licitação de espectro de radiofrequências tem sido um dos meios mais importantes, senão o mais importante, para viabilizar a execução de políticas públicas de ampliação de cobertura e de melhoria de qualidade da banda larga móvel.

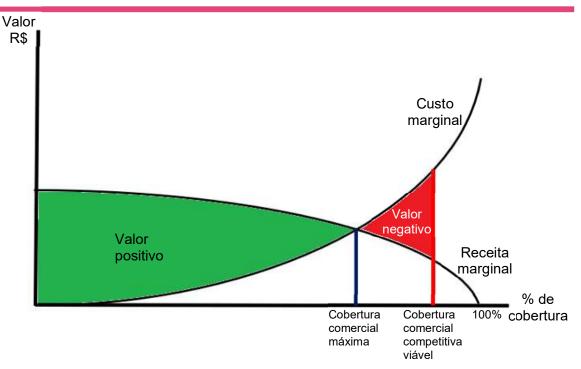


Fig.2 – Cobertura comercial competitiva viável. O atendimento de políticas públicas pode ampliar a cobertura além do ponto de equilíbrio entre receita marginal e custo marginal.

Fonte: Adaptado de Coleago, 2019.

#### 4 - Trabalhos Anteriores Relacionados a Faixa de 6 GHz (5.925 – 7.125 MHz)

Há diversos trabalhos sobre o uso da faixa de 6 GHz para sistemas IMT e/ou WiFi6E, incluindo alguns desenvolvidos com o foco no cenário brasileiro. Nesse sentido, destacam-se dois estudos, um apresentado pela *Dynamic Spectrum Alliance* (DSA) e outro pela GSMA.

O estudo da DSA<sup>2</sup> projeta que o valor econômico (soma da contribuição no produto interno bruto - PIB, do excedente do consumidor e do excedente do produtor) acumulado até o

 $<sup>^2\, \</sup>underline{\text{https://dynamicspectrumalliance.org/wp-content/uploads/2020/11/1-DSA-Valor-Economico-Uso-Nao-Licenciado-6-GHz-Brasil-1.pdf}$ 

ano de 2030 seria de 163,35 bilhões de dólares, sendo que no ano de 2022 seria de 2,3 bilhões de dólares (~11,5 bilhões de reais) e no ano de 2023 seria de 5,9 bilhões de dólares (~29,4 bilhões de reais). Esse estudo não fez análise comparativa para caso fosse destinado outra quantidade de espectro para o WiFi6E (ex. 500MHz). Dois pontos merecem atenção: (i) o primeiro é que, pelo menos para esses anos iniciais, a migração de sistemas baseados principalmente em WiFi5 para o WiFi6E ficou aquém do esperado, de tal forma que as estimativas do impacto econômico do WiFi6E na economia brasileira se demonstraram superestimadas até o presente momento. (ii) o segundo ponto é que dada as características de uso (e reuso das frequências), potência e de propagação do sinal WiFi6E, com portadoras de até 160 MHz, o que permite 3 portadoras de maior largura de faixa em um bloco de 500 MHz, parece razoável estimar que nesses primeiros anos da regulamentação brasileira, o valor econômico real (e não o estimado) gerado por destinar a faixa inteira de 1200 MHz para o WiFi6E, seria basicamente o mesmo caso originalmente tivesse sido destinado apenas 500 MHz.

Em relação a avaliação da GSMA³, são apresentados diversos cenários, onde destacase um em que se prevê que a banda larga fixa será atendida principalmente na velocidade de 10 Gbps e que o *offlload* em 60 GHz (ex. utilizando a tecnologia WiGig) não será relevante, isso no ano de 2035. Neste cenário, caso se tenha todo o uso de 1200 MHz na faixa de 6 GHz para sistema IMT, o impacto no PIB seria de 0,46%, enquanto seria de 0,42%, caso o uso total dessa faixa fosse para sistemas WiFi6E. Por outro lado, o uso combinado dos dois sistemas, este com 500 MHz e aquele com 700 MHz, impactaria o PIB em 0,68%. Destaca-se também que há cenários nesse estudo indicando que o maior benefício econômico seria se a totalidade da faixa fosse utilizada para IMT, porém, o cenário que parece ser mais provável (ver Seção 6, Fig.3) sugere que o maior impacto no PIB ocorrerá caso seja utilizado na faixa de 6GHz, de forma combinada, o 5G e o WiFi6E.

 $<sup>^3\</sup> https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2023/01/Brazil-Market-Insight-The-6-GHz-Band.pdf$ 

#### 5 - Interesse Setorial x Interesse Público

Um ponto que pode ser mais bem explorado é se determinada solução é o de maior interesse público ou somente de interesse de um setor (eventualmente, até mais de um). O interesse de um setor é um interesse privado, enquanto o interesse público envolve os diversos setores econômicos, os consumidores de soluções, governos, além daqueles cidadãos que não são consumidores ou usuários daquela tecnologia, mas as externalidades os impactam (por exemplo, a pessoa pode não utilizar o aparelho celular, mas o filho estudante pode ser beneficiário de uma política pública derivada de licitação de espectro).

Destaca-se o caso do regulador de telecomunicações no Reino Unido, OFCOM, que fez um estudo (OFCOM, 2006) sobre o dividendo digital em que definiu a "Estrutura do Valor Total – *Total Value Framework*". Classificou o valor privado como sendo composto pelos excedentes do consumidor e do produtor. Por outro lado, também levou em conta os interesses dos cidadãos que não utilizam aquelas tecnologias, mas que podem ser impactados diretamente ou indiretamente. Adicionalmente, considerou todas as externalidades (ex.: ampliação da educação, inclusão digital), o que chamou de "Valor Social Mais Amplo – *Broader Social Value*".

Todos os elementos acima devem ser levados em conta para o bem maior de uma nação, em que o interesse público deve se sobressair aos interesses privados (incluindo setorial). Dessa forma, na discussão sobre qual é a melhor destinação da faixa de 6 GHz, deve-se levar em consideração qual solução trará os maiores benefícios econômico-sociais para o Brasil.

A destinação de um bloco de 700 MHz na faixa de 6 GHz para sistemas IMT poderá representar a injeção de bilhões de reais na economia e a ampliação das políticas públicas, com recursos que poderão ser direcionados para a conectividade significativa nas escolas, redução da lacuna digital, mais velocidade na internet móvel, novos modelos inovadores que a tecnologia poderá oferecer, gerando emprego e renda para a sociedade brasileira.

Adicionalmente, um bloco de 500 MHz para a família WiFi, garantirá o uso de todas as aplicações que a tecnologia permite (*low-power indoor, wearables, standard power*). Destaca-se que o bloco de 500 MHz permitirá o uso da tecnologia WiFi7, que possui portadora máxima de 320 MHz.

Ressalta-se que sistemas IMT e WiFi não devem ser vistos como concorrentes, mas sim como complementares, de tal forma que é importante a destinação do espectro adequado para cada tecnologia, tendo como foco o maior benefício econômico-social, e não apenas qual solução maximiza o desempenho de um ou de outro sistema.

#### 6 - Modelo Matemático de Destinação Ótima

A programação não-linear trata de problemas de otimização de uma função objetivo na presença de restrições definidas por equações ou inequações (Bazaraa, 2006). Uma função utilidade representa a relação matemática que mapeia as preferências para a quantidade de utilidade obtida a partir dessas preferências por um agente econômico, por exemplo, um indivíduo, uma empresa ou até o governo. A utilidade marginal representa a variação na utilidade total em função na aquisição de uma unidade a mais do insumo. A lei da utilidade marginal decrescente estabelece que conforme a aquisição (ou consumo) de um insumo vai aumentando, a utilidade marginal associada a cada unidade adicional vai diminuindo.

Para este estudo de otimização, a função utilidade foi modelada por uma equação logarítmica, pois é uma função crescente, com utilidade marginal decrescente, tendo sido utilizada em outros modelos similares (DSA, 2020). Adicionalmente, possui três parâmetros  $(A_i, B_i, K_i)$  para o melhor ajuste das curvas.

Assim, considerando que se está avaliando a utilidade de dois sistemas, cujo insumo básico é o espectro de radiofrequências, e a destinação de uma quantidade  $x_1$  de espectro para um sistema resultará em uma utilidade  $U_1$ , e a destinação de uma quantidade  $x_2$  de espectro para o outro sistema resultará em uma utilidade  $U_2$ , a função utilidade total será dada pela soma  $U_1 + U_2$ , representando um problema de maximização, pois se pretende obter a combinação de  $x_1$  e  $x_2$  que fornecerá o maior valor para função utilidade U. No caso em tela, a função utilidade está representando o impacto da implantação de duas tecnologias (IMT e WiFi6E) no PIB do país, em função da quantidade de espectro de radiofrequências destinada para cada aplicação.

Matematicamente, para o presente estudo, as funções utilidades são modeladas da seguinte forma:

$$U_1 = A_1 \cdot \ln (B_1 + K_1 \cdot x_1)$$

$$U_2 = A_2 \cdot \ln (B_2 + K_2 \cdot x_2)$$

A função objetivo é dado por:

$$\text{Max } U = \sum U_i$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$g(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = c$$

$$x_1, x_2 \ge 0$$

Onde "c" representa o total de espectro de radiofrequências disponível (ex. 1200 MHz).

Pare resolver esse problema, deve-se calcular a Lagrangeana:

$$L = U + \lambda . g(x_1, x_2)$$

Considerando as seguintes condições necessárias:

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = \frac{A_{1.}K_1}{B_1 + K_1.x_1} + \lambda = 0 \quad (i)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} = \frac{A_2.K_2}{B_2 + K_2.x_2} + \lambda = 0 \quad (ii)$$

E fazendo (ii) – (i), chega-se aos seguintes resultados para este problema de otimização:

$$x_2 = \frac{\frac{A_2.K_2}{A_1.K_1}.(B_1 + K_1.x_1) - B_2}{K_2} \quad (iii)$$

$$x_1 = c - x_2 \tag{iv}$$

Tendo calculado o modelo geral e encontrado o ponto ótimo, se apresentará um caso prático de estudo, com base no relatório da (GSMA, 2022), conforme apresentado na Fig.3:

#### IMPACT ON BRAZILIAN GDP OF 6 GHz CHOICES - 2035

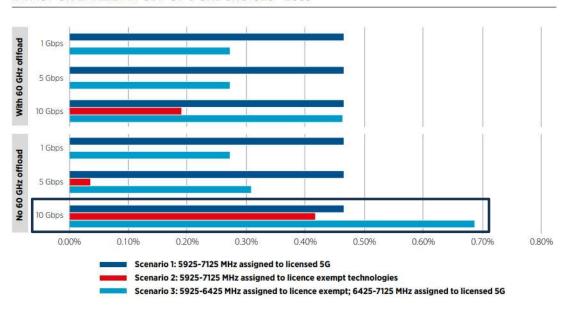


Fig. 3 – Se utilizará o cenário em que se considera, que em 2035, a taxa de transmissão de referência da banda larga fixa será de 10 Gbps, e que não ocorrerá *offload* de tráfego em 60 GHz (ex.: WiGig).

Fonte: Adaptado de GSMA, 2022.

Para ajustar os parâmetros  $(A_i, B_i, K_i)$ , se considerou as seguintes condições (ver Fig.3 para as condições 1, 2 e 3):

- $1 U_1 \approx 0.46$ , se for destinado 1.200 MHz para sistemas IMT
- $2 U_2 \approx 0,42$ , se for destinado 1.200 MHz para sistemas WiFi
- $3 U \approx 0,68$ , se for destinado 700 MHz para sistemas IMT e 500 MHz para sistemas WiFi
- 4 Devido o maior reuso de canais WiFi, sua função utilidade deve crescer mais rápido no início em relação a função utilidade do sistema IMT
- 5 A utilidade do IMT só pode ultrapassar a utilidade do WiFi se tiver mais de 400 MHz destinado, representando que 4 operadoras (ex.: 3 nacionais e 1 regional) teriam pelo menos 100 MHz cada, largura de faixa adequada de uma portadora 5G (sem considerar possível agregação de portadoras).

Com as 5 condições acima, chegou-se ao seguinte equacionamento:

$$U_1 = 0.22. \ln (1 + 0.6. x_1)$$
  $\Rightarrow$  função utilidade do IMT

$$U_2 = 0.13. \ln (1 + 2.1. x_2)$$
  $\Rightarrow$  função utilidade do WiFi

$$x_1 + x_2 = 12$$
  $\Rightarrow$  em que cada unidade representa 100 MHz

Utilizando as equações (iii) e (iv), encontram-se os seguintes resultados:

$$x_1 = 7,22$$

$$x_2 = 4.78$$

Considerando os ajustes para adequar os números fracionados às soluções compatíveis com a tecnologia, chega-se ao resultado que a melhor solução é destinar 700 MHz para IMT e 500 MHz para WAS/RLAN (ou, na prática, WiFi6E e evoluções).

A partir do modelamento desenvolvido anteriormente, depreende-se que qualquer um dos outros cenários apresentados pela GSMA resultaria na necessidade de destinação de uma faixa de radiofrequências maior do que 700 MHz para o IMT, inclusive em alguns cenários a melhor solução seria ter os 1200 MHz para sistemas IMT.

Para melhor entender a solução do problema de otimização apresentado anteriormente, convém avaliá-lo graficamente. Dessa forma, é possível visualizar na Fig.4 que a função utilidade representa uma curva tridimensional (um eixo é a utilidade total U, outro representa a quantidade de espectro  $x_1$ , e o terceiro eixo a quantidade de espectro  $x_2$ ). O problema tem uma restrição de quantidade total de espectro a ser distribuído entre um e outro sistema, possuindo um valor fixo de 1200 MHz. Essa restrição representa a equação de um plano  $g(x_1, x_2)$ . A intersecção entre a curva tridimensional U e o plano  $g(x_1, x_2)$  é uma curva sobre o plano  $g(x_1, x_2)$ , e o ponto de máximo representa o maior valor de U nesta curva, obtido com a distribuição de uma quantidade de espectro  $x_1$  e  $x_2$ , para os sistemas IMT e WAS/RLAN, respectivamente.

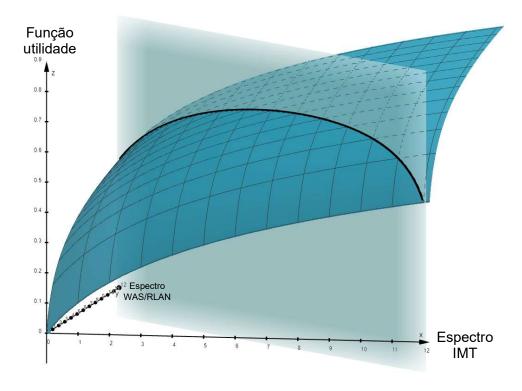


Fig. 4 – A intersecção entre a função utilidade (representada pela curva tridimensional em azul) e a restrição de que o espectro total a ser destinado é de 1200 MHz (representado pelo plano em cinza) é a curva em preto sobre o plano. O maior valor de U nesta curva está associado a uma quantidade  $x_1$  de espectro para sistema IMT e  $x_2$  de espectro para sistema WAS/RLAN (ex.: WiFi6E).

As mesmas curvas da Fig.4 podem ser observadas na Fig.5 a partir de outro ângulo para facilitar a visualização de que o ponto ótimo está ligeiramente acima da destinação de 7 unidades (~700 MHz) para IMT e ligeiramente abaixo de 5 unidades (~500 MHz) para o WiFi6E.

A Fig.6 compara a função utilidade para o IMT e para o WiFi6E em um plano, que foram ajustadas conforme os critérios e condições apresentadas anteriormente.

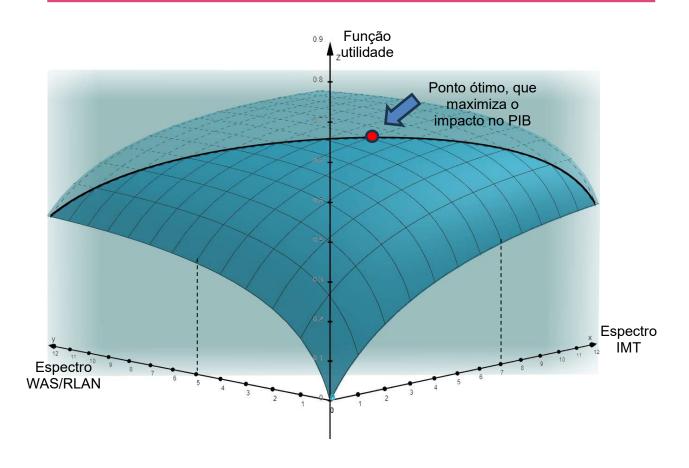


Fig. 5 – O ponto ótimo está representado pela bola vermelha indicada pela seta. Este arranjo resultará no maior impacto ao PIB.

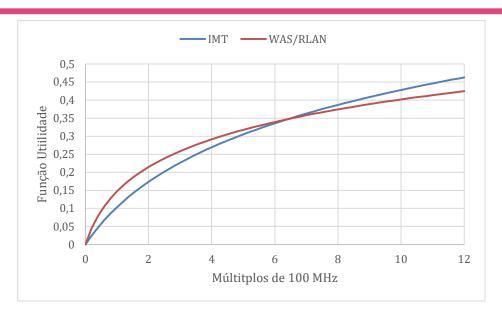


Fig. 6 – Comparativo entre a função utilidade do IMT e do WiFi6E.

#### 7 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU

O uso da faixa de 6 GHz para sistemas 5G e 6G será uma importante ferramenta na consecução dos objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, em especial os objetivos 3 (Saúde e Bem-Estar), 4 (Educação de Qualidade), 5 (Igualdade de Gênero), 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), 9 (Industria, Inovação e Infraestrutura), 10 (Redução das Desigualdades), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 12 (Consumo e Comunidades Sustentáveis), pois contribuirá para o desenvolvimento de diversas políticas públicas, aumentará a conectividade, criará novos negócios, possuindo sinergia com outras faixas de frequências, como o 3,5Hz, de tal forma a contribuir na diminuição da pobreza, no aumento do acesso à saúde e à educação, e impulsionando o crescimento econômico.



Fig. 7 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU 2030. Fonte: Nações Unidas - Brasil

#### 8 - Conclusões

Este trabalho avaliou oportunidades de uso da faixa de radiofrequências de 6 GHz (5.925 – 7.125 MHz), atualmente destinada no Brasil para sistemas WAS/RLAN (ex. WiFi6E). Parte dessa faixa (6.425 – 7.125 MHz) foi identificada para IMT durante a WRC-23 para uso no Brasil. Adicionalmente, este trabalho apresentou a fundamentação da avaliação de benefícios econômico-sociais, discorreu sobre políticas públicas telecomunicações, principalmente com o objetivo de ampliação de cobertura móvel, além de apresentar um estudo original sobre otimização da destinação da faixa de 6 GHz.

Partindo de um estudo da GSMA, que serviu como parâmetros de referência, desenvolveu-se um modelo de otimização matemática, em função de curva de utilidade, a fim de estimar qual solução traria o maior benefício econômico-financeiro para o Brasil. Os resultados confirmam que a destinação de 700 MHz para sistemas IMT e 500 MHz para WiFi6E é a melhor combinação, pois trará o maior impacto positivo no PIB.

Ademais, ponderou-se sobre a necessidade do interesse público sobressair-se em relação ao interesse privado (ou setorial). Isso reflete na destinação de parte da faixa de 6 GHz para IMT, pois poderá resultar em mais recursos para a consecução de políticas públicas de telecomunicações, que serão benéficas para toda a sociedade, incluindo educação em escolas, redução da lacuna digital, maior qualidade na banda larga móvel, entre diversos outros benefícios.

#### Referências Bibliográficas

OCDE, 2014. "New Approaches to Spectrum Management", OECD Digital Economy Papers, No. 235, OECD Publishing, Paris. Disponível em <a href="http://dx.doi.org/10.1787/5jz44fnq066c-en">http://dx.doi.org/10.1787/5jz44fnq066c-en</a>

Mazar, 2016. "Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques". John Wiley & Sons, Ltd.

OCDE, 2022. "Developments in Spectrum Management for Communication Services", OECD Digital Economy Papers, No. 332, OECD Publishing, Paris. Disponível em <a href="https://www.oecd.org/publications/developments-in-spectrum-management-for-communication-services-175e7ce5-en.htm">https://www.oecd.org/publications/developments-in-spectrum-management-for-communication-services-175e7ce5-en.htm</a>

Anatel, 2021. "Edital nº 1/2021 - Licitação nº 1/2021-SOR/SPR/CD-Anatel - Radiofrequências nas Faixas de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz". Disponível em <a href="https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/leilao-de-espectro-5g">https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/leilao-de-espectro-5g</a>

Coleago, 2019. "Increasing mobile broadband coverage through spectrum awards". Coleago Consulting. Disponível em <a href="https://www.coleago.com/app/uploads/2020/09/Maximising-coverage-through-spectrum-awards.pdf">https://www.coleago.com/app/uploads/2020/09/Maximising-coverage-through-spectrum-awards.pdf</a>

OFCOM, 2006. "Digital Dividend Review A report of consumer research conducted for Ofcom by Holden Pearmain and ORC International". Disponível em <a href="https://www.ofcom.org.uk/">https://www.ofcom.org.uk/</a> data/assets/pdf file/0021/19416/researchrpt.pdf

Bazaraa, M; *et al*, 2006. "Nonlinear Programming: Theory and Algorithms, 3<sup>rd</sup> Edition". A John Wiley and Sons, Inc., Publication.

DSA, 2020. "Avaliação do valor econômico do uso não licenciado na faixa de 6 GHz no Brasil". Disponível em <a href="https://dynamicspectrumalliance.org/wp-content/uploads/2020/11/1-DSA-Valor-Economico-Uso-Nao-Licenciado-6-GHz-Brasil-1.pdf">https://dynamicspectrumalliance.org/wp-content/uploads/2020/11/1-DSA-Valor-Economico-Uso-Nao-Licenciado-6-GHz-Brasil-1.pdf</a>

GSMA, 2022. "Brazil Market Insight: 5925 - 7125 MHz: The 6 GHz Band". Disponível em <a href="https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2023/01/Brazil-Market-Insight-The-6-GHz-Band.pdf">https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2023/01/Brazil-Market-Insight-The-6-GHz-Band.pdf</a>