

Uma Análise da Relação entre Vazão e Justiça na Divisão de Recursos em Escalonadores de Redes 5G

Júlio Henrique da Silva Lopes¹, André Luiz N. Pires², Diego Canizio Lopes³

¹Instituto Federal do Rondônia (IFRO)

²Universidade Federal do Acre (UFAC)

³Instituto Federal do Acre (IFAC)

julio.lobes@ifro.edu.br, andre.nasseralala@ufac.br, diego.lobes@ifac.edu.br

Abstract. Resource allocation in 5G networks involves the challenge of balancing system efficiency, measured by aggregate throughput, and fairness in resource distribution among users often evaluated using the Jain Fairness Index. This work presents an analysis of the relationship between these metrics in 5G network schedulers, considering the classical algorithms Round Robin (RR), Maximum Rate (MR), Proportional Fair (PF), and a hybrid scheduler called Fair Max Rate (FMR). By constructing the Pareto Frontier in the throughput versus fairness plane, non-dominated solutions were identified and regions of equilibrium between throughput and fairness were analyzed. The results show that it is not possible to simultaneously maximize both metrics, confirming the structural conflict between system performance and fair resource distribution. PF stood out by occupying the largest number of points in the efficient region, while FMR presented a consistent balance between throughput and fairness. Additionally, the geometric mean of the normalized metrics was applied to select a representative equilibrium point. Based on this analysis, a fairness policy guided by the Pareto Frontier is proposed, capable of defining minimum fairness thresholds without significantly compromising the overall network performance.

Resumo. A alocação de recursos em redes 5G envolve o desafio de equilibrar eficiência do sistema, medida pela vazão agregada, e justiça na distribuição de recursos entre os usuários frequentemente avaliada pelo Índice de Jain. Este trabalho apresenta uma análise da relação entre essas métricas em escalonadores de redes 5G, considerando os algoritmos clássicos Round Robin (RR), Maximum Rate (MR), Proportional Fair (PF) e um escalonador híbrido chamado de Fair Max Rate (FMR). A partir da construção da Fronteira de Pareto no plano vazão versus justiça, foram identificadas soluções não dominadas e analisadas as regiões de equilíbrio entre vazão e justiça. Os resultados evidenciam que não é possível maximizar simultaneamente ambas as métricas, confirmando o conflito estrutural entre desempenho e distribuição justa de recursos. O PF destacou-se por ocupar maior número de pontos na região eficiente, enquanto o FMR apresentou equilíbrio consistente entre vazão e justiça. Adicionalmente, foi aplicada a média geométrica das métricas normalizadas para seleção de um ponto representativo de equilíbrio. Com base nessa análise, propõe-se uma política de justiça orientada pela Fronteira de Pareto, capaz de definir limites mínimos de justiça sem comprometer significativamente o desempenho global da rede.

1. Introdução

As redes de quinta geração (5G) foram projetadas para atender a requisitos que incluem altas taxas de transmissão, baixa latência e suporte a um grande número de dispositivos conectados, introduzindo maior flexibilidade na utilização do espectro de radiofrequência, diferentes numerologias, arquitetura orientada para serviços e suporte simultâneo a diferentes perfis de aplicação, como eMBB (Enhanced Mobile Broadband), URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) e mMTC (Massive Machine-Type Communications) [3GPP 2019].

Para viabilizar os requisitos de altas taxas de transmissão, baixa latência e flexibilidade espectral, o 5G utiliza técnicas baseadas em OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), permitindo a alocação dinâmica de Blocos de Recursos (Resource Blocks – RBs) entre múltiplos usuários. Os RBs representam a menor unidade de recursos de radiofrequência utilizada na transmissão de dados, sendo compostos por 12 subportadoras durante um slot de transmissão [Seddiq et al. 2013].

A distribuição desses RBs é realizada pelo escalonador de recursos, responsável por definir quantos RBs serão atribuídos a cada usuário, de acordo com as condições da rede e do canal. Entre as principais métricas consideradas no processo de escalonamento estão a vazão e a justiça. A vazão está relacionada à maximização da taxa de transmissão de dados atribuída ao usuário pela rede, enquanto a justiça busca garantir uma distribuição equilibrada de recursos entre os usuários.

Essas duas métricas, no entanto, apresentam um conflito estrutural: priorizar usuários com melhor condição de canal tende a aumentar a vazão, mas pode comprometer a justiça na alocação. A justiça é um aspecto importante em redes 5G, especialmente em cenários com múltiplos usuários e diferentes condições de canal. Uma das formas de avaliar o grau de justiça na distribuição de recursos é por meio do Índice de Jain. Esse índice mede quão uniforme é a distribuição das vazões individuais entre os usuários, assumindo valores próximos de 1 quando a alocação é equilibrada e valores próximos de 0 quando há concentração de recursos em poucos usuários [Guo et al. 2014].

Diante desse contexto, este trabalho busca analisar o comportamento de diferentes estratégias de escalonamento em redes 5G, investigando o equilíbrio entre vazão e justiça na alocação de recursos. A análise considera escalonadores clássicos e abordagens mais recentes, avaliando como suas decisões de alocação impactam a vazão agregada do sistema e a distribuição de recursos entre os usuários. A partir da construção de uma Fronteira de Pareto (FP), busca-se identificar pontos de equilíbrio entre essas métricas e discutir a viabilidade de incorporar restrições de justiça no processo de escalonamento. Com essa abordagem, pretende-se propor uma política de justiça baseada na análise da FP para auxiliar na definição de estratégias de alocação de recursos em redes 5G.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 introduz conceitos sobre 5G e algoritmos de escalonamento. A Seção 3 apresenta conceitos sobre a fronteira de Pareto. A Seção 4 discute os trabalhos relacionados. A Seção 5 apresenta a modelagem do problema, formalizando as métricas utilizadas. A Seção 6 descreve os resultados, detalhando a origem dos dados e a análise da FP. A Seção 7 apresenta a proposta de política de justiça baseada na FP e, por fim, a Seção 8 apresenta as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2. Redes 5G e Algoritmos de Escalonamento

No 5G NR (New Radio), a numerologia define o espaçamento entre subportadoras (Sub-carrier Spacing – SCS) e influencia diretamente a quantidade de Blocos de Recursos (Resource Blocks – RBs) disponíveis para alocação. Cada RB é composto por 12 subportadoras, e sua largura varia conforme o valor do SCS adotado. Assim, numerologias menores, como 15 kHz, permitem maior quantidade de RBs na mesma largura de banda, enquanto numerologias maiores, como 30 kHz e 60 kHz, reduzem a quantidade de RBs disponíveis devido ao aumento da largura ocupada por cada bloco e das bandas de guarda necessárias. Essa flexibilidade possibilita adaptar a utilização do espectro aos diferentes requisitos de desempenho, latência e eficiência espectral das aplicações suportadas pelo 5G [3GPP 2019].

Sob essa perspectiva, a alocação de recursos em redes 5G depende diretamente das estratégias adotadas pelos escalonadores para distribuir os RBs entre os usuários. Cada algoritmo utiliza critérios distintos de priorização, o que impacta tanto o desempenho do sistema quanto o nível de justiça na distribuição dos recursos. Os escalonadores *Round Robin* (RR), *Maximum Rate* (MR) e *Proportional Fair* (PF) representam algoritmos clássicos utilizados na alocação de recursos em redes sem fio [Mamane et al. 2022].

O algoritmo RR distribui os recursos de forma cíclica entre os usuários, garantindo igualdade de acesso, porém sem considerar as condições do canal. Já o MR prioriza os usuários que apresentam melhores condições de canal no momento da transmissão, buscando maximizar a vazão total da rede, embora possa comprometer a equidade entre os usuários. Por sua vez, o PF procura equilibrar eficiência e justiça, considerando tanto a taxa instantânea do canal quanto o histórico de atendimento dos usuários [Lopes et al. 2025].

3. Fronteira de Pareto

A Fronteira de Pareto (FP) é o conjunto de soluções eficientes em um problema com múltiplos objetivos conflitantes, nas quais não é possível melhorar uma métrica sem piorar outra. Esse conjunto de soluções é chamado de pontos não dominados, pois representa configurações nas quais qualquer melhoria em uma métrica implica perda em outra, e vice-versa. Já os pontos localizados abaixo da fronteira são considerados ineficientes, pois existe pelo menos uma configuração alternativa que apresenta desempenho superior em ambas as métricas [Deb 2011].

A relação entre um ponto T e J pode ser analisada no plano bidimensional (T, J) . Considere dois pontos $p_a = (T_a, J_a)$ e $p_b = (T_b, J_b)$. Diz-se que p_a domina p_b se:

$$T_a \geq T_b \quad \text{e} \quad J_a \geq J_b \quad (1)$$

com pelo menos uma desigualdade estrita.

Embora a FP represente o conjunto de todas as soluções eficientes, ela não determina automaticamente qual configuração deve ser adotada pelo sistema. Cada ponto pertencente à fronteira expressa um compromisso distinto entre as soluções, sendo todos estruturalmente eficientes, porém com diferentes níveis de priorização [Deb 2011].

Nesse contexto, o ponto de equilíbrio corresponde a uma solução específica selecionada dentro do conjunto de soluções não dominadas pertencentes a FP, escolhida com base em um critério adicional de decisão. Diferentemente de um ponto dominante, que é definido por relações de superioridade entre métricas, o ponto de equilíbrio resulta de uma decisão operacional ou política. Ele representa a configuração considerada mais adequada para o contexto analisado.

4. Trabalhos Relacionados

Os trabalhos relacionados foram selecionados com base em três critérios: estudos que analisaram o *tradeoff* entre vazão e justiça em redes sem fio, abordagens de alocação de recursos baseadas em aprendizado de máquina ou otimização, e trabalhos que utilizam métricas de fairness (justiça), como o Índice de Jain, na avaliação de escalonadores em redes 5G. Dessa forma, os estudos analisados representam diferentes perspectivas do problema de alocação de recursos, incluindo modelagem matemática, otimização convexa, aprendizado de máquina e escalonamento adaptativo.

No estudo de [Sedqi et al. 2013], os autores demonstram que o modelo matemático utilizado para equilibrar eficiência e justiça na alocação de recursos em redes (política α -fair) pode apresentar desempenho ineficaz em sistemas com mais de dois usuários. Neste trabalho, é introduzido o conceito de EJT (Efficiency–Jain Tradeoff), propondo procedimentos de escalonamento baseados em otimização convexa para identificar o ponto ótimo. Diferentemente de [Sedqi et al. 2013], que possui foco teórico e matemático, esta pesquisa realiza uma análise de diferentes escalonadores em redes 5G, avaliando como esses algoritmos se comportam na prática.

[Chataut and Akl 2020] investigaram o uso de RL (Reinforcement Learning) para otimizar a alocação de recursos em ambientes dinâmicos. Embora essas abordagens apresentem ganhos adaptativos, concentram-se na maximização da vazão agregada utilizando métricas de justiça apenas como indicadores de avaliação posterior. Ao contrário de [Chataut and Akl 2020], esta pesquisa investiga diretamente o equilíbrio entre vazão e justiça na alocação de recursos, transformando a justiça em uma condição de viabilidade do sistema.

[Padmageetha et al. 2024] analisaram a otimização da alocação de recursos, considerando métricas relacionadas à qualidade do sistema, como eficiência espectral, vazão e QoS (Quality of Service), por meio de modelos de aprendizado de máquina. Os autores avaliaram técnicas como regressão, árvores de decisão e redes neurais, obtendo desempenho promissor, especialmente com Random Forest e Redes Neurais. Apesar de investigar a alocação de recursos em redes 5G, buscando melhorar a eficiência espectral e o QoS, os autores não investigaram o *tradeoff* entre vazão e justiça.

Em [Lopes et al. 2025], é proposto um escalonador para redes 5G chamado FMR (Fair Max Rate), baseado em RL e no Algoritmo PPO (Proximal Policy Optimization). Seu objetivo é maximizar a vazão agregada da rede, priorizando dispositivos com maior eficiência espectral, com base no MCS (Modulation and Coding Scheme), enquanto mantém a justiça na distribuição de recursos por meio de uma função de recompensa que penaliza situações em que algum dispositivo recebe vazão abaixo de um limiar mínimo. Dessa forma, o FMR busca equilibrar eficiência e justiça, evitando situações de inanição de usuários e mantendo níveis de justiça superiores aos obtidos pelo escalonador MR.

Embora existam estudos voltados para a otimização matemática, fairness e aprendizado de máquina em redes 5G, poucos trabalhos investigam o comportamento do *tradeoff* entre vazão e justiça a partir da construção da Fronteira de Pareto aplicada à análise de escalonadores. Além disso, a literatura ainda explora de forma limitada o uso da FP como mecanismo orientador de políticas de justiça em redes 5G.

5. Modelagem do Problema

A alocação de recursos em redes 5G pode ser modelada como um problema de otimização multiobjetivo, no qual se busca maximizar simultaneamente métricas conflitantes, como vazão agregada e justiça na distribuição de recursos. Nesta seção, formaliza-se matematicamente este *tradeoff*.

5.1. Definição das Métricas

Considerando um conjunto de n usuários $\{UE_1, UE_2, \dots, UE_n\}$ atendidos por uma estação rádio base (gNB). Seja $r_i \geq 0$ a taxa de vazão individual (throughput) atribuída ao usuário i em um determinado intervalo de tempo.

A vazão agregada do sistema é definida como:

$$T = \sum_{i=1}^n r_i \quad (2)$$

Essa métrica representa a eficiência global da rede, refletindo a quantidade total de dados transmitidos no intervalo considerado.

A justiça na distribuição de recursos é quantificada por meio do Índice de Jain, definido como:

$$J(r_1, \dots, r_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n r_i)^2}{n \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (3)$$

onde $0 < J \leq 1$. O valor $J = 1$ indica alocação equitativa, enquanto valores próximos de zero indicam alta desigualdade na distribuição. O Índice de Jain é invariante à escala e captura a dispersão relativa entre as taxas individuais.

5.2. Formulação da Análise Vazão–Justiça

A maximização exclusiva da vazão agregada pode ser formalizada como:

$$\max_{r_1, \dots, r_n} T = \sum_{i=1}^n r_i \quad (4)$$

sujeito às restrições do sistema, como a disponibilidade de blocos de recurso, a potência de transmissão e as condições do canal.

Entretanto, essa formulação tende a favorecer usuários com melhores condições instantâneas de canal, levando à concentração de recursos e à consequente degradação da justiça.

Por outro lado, a maximização da justiça pode ser representada da seguinte forma:

$$\max_{r_1, \dots, r_n} J(r_1, \dots, r_n) \quad (5)$$

o que implica, no limite, na equalização das taxas individuais, podendo reduzir a eficiência global do sistema.

Dessa forma, o problema de escalonamento pode ser interpretado como um problema multiobjetivo:

$$\max (T, J) \quad (6)$$

Como essas métricas são conflitantes, não existe uma solução única que maximize simultaneamente ambas. Uma alternativa consiste em reformular o problema como uma otimização com restrição explícita de justiça mínima:

$$\max_{r_1, \dots, r_n} T \quad (7)$$

sujeito a:

$$J(r_1, \dots, r_n) \geq \varepsilon_{min} \quad (8)$$

onde $\varepsilon_{min} \in [0, 1]$ representa um patamar mínimo aceitável de justiça.

Essa formulação transforma a justiça de métrica de avaliação posterior em uma condição de viabilidade do sistema.

6. Resultados e Discussões

Esta seção descreve a construção do conjunto de dados, o procedimento adotado para a análise do *tradeoff* entre vazão e justiça, bem como a aplicação prática da FP no processo de escalonamento de recursos em 5G.

6.1. Conjunto de Dados

Este estudo utiliza dados provenientes das simulações realizadas em [Lopes et al. 2025], desenvolvidas a partir de registros de MCS obtidos em um conjunto público disponível na plataforma O-RAN Colosseum. Todos os detalhes relacionados ao ambiente de simulação, configuração da rede, definição dos cenários e implementação dos escalonadores encontram-se descritos no estudo original. Nesta pesquisa, foram utilizados os resultados das simulações previamente realizadas pelos autores, a partir dos quais foi construído um novo conjunto de dados voltado especificamente para a análise do *tradeoff* entre vazão e justiça na alocação de recursos.

O cenário simulado por [Lopes et al. 2025] considera uma única célula 5G composta por uma estação rádio base (gNB) atendendo a três dispositivos de usuário (UEs) em um ambiente urbano, com mobilidade e condições dinâmicas de canal. A rede foi configurada com largura de banda de 10 MHz, numerologia $\mu = 1$ (SCS de 30 kHz)

e comunicação OFDM no downlink, disponibilizando 25 Blocos de Recursos (RBs) para alocação dinâmica entre os usuários. Foram avaliados os escalonadores Round Robin (RR), Maximum Rate (MR), Proportional Fair (PF) e Fair Max Rate (FMR). Cada simulação compreende 470 slots de transmissão, totalizando 1880 registros experimentais.

Para cada algoritmo a e slot de transmissão t , foram registradas as taxas individuais de transmissão $r_{i,t}^{(a)}$ de cada usuário $i \in \{U1, U2, U3\}$. A partir desses valores, foram calculadas a vazão agregada e o Índice de Jain para cada slot. A vazão agregada foi definida como:

$$T_t^{(a)} = \sum_{i=1}^3 r_{i,t}^{(a)} \quad (9)$$

enquanto o Índice de Jain foi utilizado para medir o grau de equilíbrio na distribuição de recursos entre os usuários:

$$J_t^{(a)} = \frac{\left(\sum_{i=1}^3 r_{i,t}^{(a)}\right)^2}{3 \sum_{i=1}^3 \left(r_{i,t}^{(a)}\right)^2} \quad (10)$$

Além das métricas instantâneas, também foram calculadas as médias globais de vazão e justiça para cada escalonador:

$$\bar{T}^{(a)} = \frac{1}{470} \sum_{t=1}^{470} T_t^{(a)} \quad (11)$$

$$\bar{J}^{(a)} = \frac{1}{470} \sum_{t=1}^{470} J_t^{(a)} \quad (12)$$

A partir do conjunto inicial, foi realizado um pré-processamento para estruturar os dados e gerar uma nova base de análise. Nesse processo, os nomes das variáveis foram padronizados, a vazão agregada do sistema foi calculada a partir da soma das vazões individuais dos usuários e também foi determinada a participação percentual de cada usuário na vazão total. Além disso, foram incluídas variáveis auxiliares relacionadas ao total de recursos disponíveis, como o total de MCS e de RBs alocados pelo sistema.

Por fim, o Índice de Jain presente nos logs foi utilizado para criar uma variável categórica representando diferentes níveis de justiça na distribuição de recursos. Os dados obtidos foram posteriormente utilizados na construção da FP no plano Vazão Agregada versus Índice de Jain, permitindo analisar o equilíbrio entre eficiência e justiça na alocação de recursos em redes 5G.

6.2. Análise Vazão versus Justiça

A Figura 1 apresenta a análise temporal sobre a evolução das métricas em relação a distribuição de recursos durante o período da simulação. Na Figura 1a, o eixo (X) apre-

senta os valores de vazão agregada alcançados pelos algoritmos, e o eixo (Y) apresenta os slots de tempo definidos na simulação. Enquanto na Figura 1b, o eixo (X) apresenta o índice de Jain obtido durante o processo de distribuição de recursos, e o eixo (Y) apresenta os slots de tempo definidos na simulação.

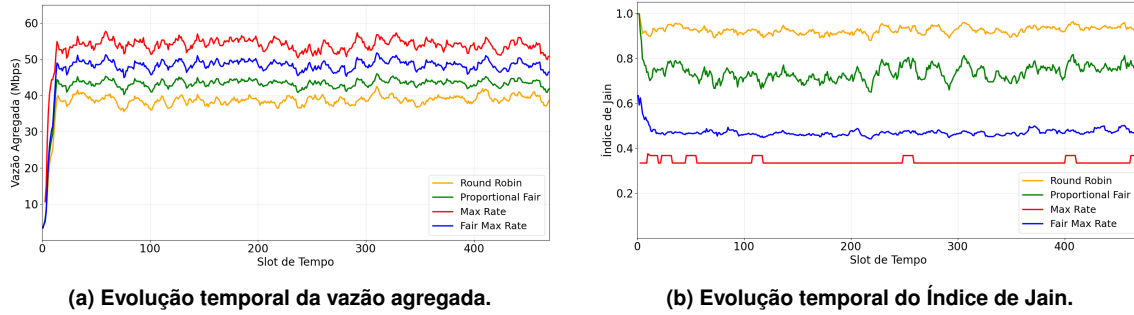


Figura 1. Análise temporal das métricas ao longo dos slots de simulação.

O algoritmo MR apresentou os maiores valores médios de vazão agregada, confirmando sua política de priorizar usuários com melhor qualidade de canal. No entanto, esse ganho de eficiência resultou em uma redução significativa no Índice de Jain, caracterizando a concentração de recursos. O RR, por sua vez, manteve os maiores níveis de justiça, distribuindo os recursos de forma mais equilibrada entre os usuários, porém essa equidade implicou redução na vazão agregada, evidenciando o custo de priorizar a igualdade sem considerar as condições de canal.

O PF demonstrou comportamento intermediário, mantendo um equilíbrio proporcional entre a taxa de vazão agregada e o Índice de Jain, indicando um melhor compromisso estrutural entre eficiência e equidade. Por fim, o FMR apresentou um desempenho consistente ao manter uma elevada vazão, com uma melhoria significativa na justiça em relação ao algoritmo MR, especialmente em cenários onde existe pouca justiça.

Os resultados revelam que os algoritmos apresentam diferentes padrões e confirmam que o *tradeoff* não é apenas estrutural, mas também dinâmico, variando conforme as condições instantâneas do canal.

6.3. Pontos Não Dominados

O conjunto de pontos que não é dominado por nenhuma outra solução forma a chamada Fronteira de Pareto, representando as configurações mais eficientes no equilíbrio entre vazão e justiça. A Figura 2 apresenta a FP, obtida por meio da projeção dos pontos no plano (T, J). O eixo horizontal (X) representa a vazão agregada do sistema, expressa em Mbps, enquanto o eixo vertical (Y) corresponde ao Índice de Jain, utilizado como medida de justiça na distribuição de recursos.

Conforme observado na Figura 2, cada ponto representa um resultado obtido em um instante de simulação, correspondente à combinação entre as duas métricas (T, J), onde cada cor identifica um algoritmo específico: MR (vermelho), FMR (azul), RR (laranja) e PF (verde). A linha tracejada (na cor preta) representa a FP, composta pelos pontos não dominados segundo o critério definido na Seção 3.

O algoritmo MR concentra-se na região de menor justiça ($J \approx 0,35-0,40$) e maior vazão agregada (acima de 55 Mbps). Esse posicionamento confirma sua estratégia de

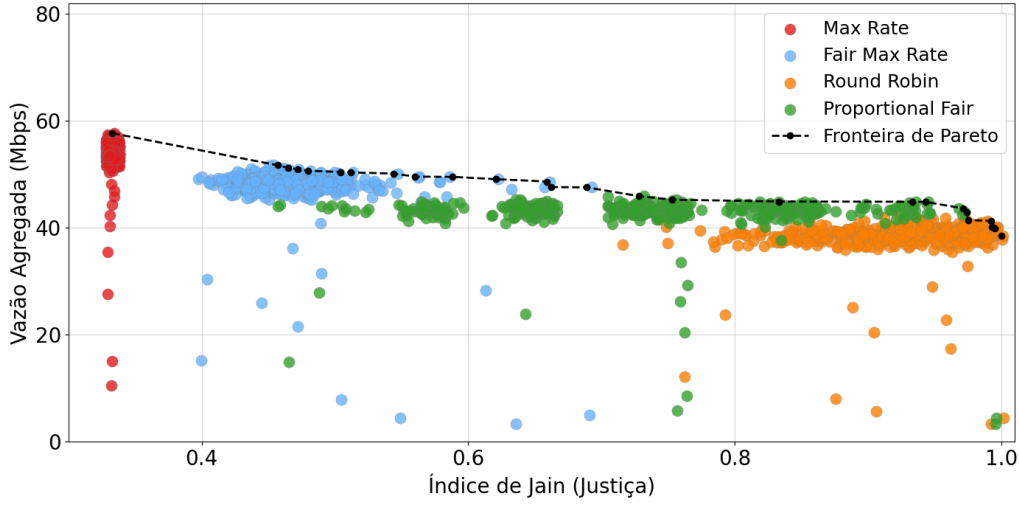


Figura 2. Fronteira de Pareto no plano Vazão Agregada versus Índice de Jain.

priorizar usuários com melhor qualidade de canal, resultando em concentração de recursos e baixa justiça. O FMR desloca-se para uma região intermediária do plano, com valores de justiça entre aproximadamente 0,45 e 0,70, mantendo vazões próximas de 50 Mbps. Esse comportamento indica uma mitigação parcial do conflito estrutural entre vazão e justiça, com um custo moderado de desempenho.

O PF ocupa predominantemente a região de alta justiça ($J \approx 0,75-0,95$), com vazões agregadas em torno de 43 a 46 Mbps. Nota-se que grande parte de seus pontos encontra-se próxima à FP, indicando um melhor compromisso estrutural entre as métricas. O RR posiciona-se na extremidade direita do gráfico, com valores de justiça próximos de 1, porém com vazões inferiores às observadas nos demais algoritmos. Esse comportamento evidencia o custo de priorizar a justiça sem considerar as condições instantâneas do canal.

Neste cenário, o FMR destacou-se por ocupar um maior número de pontos não dominados, aproximando-se da região eficiente. O PF apresentou pontos concentrados na região central da fronteira, sugerindo um comportamento balanceado. Esse comportamento reforça a necessidade de mecanismos de decisão que considerem explicitamente o equilíbrio entre as métricas, em vez de priorizar uma delas.

6.4. Identificação do Ponto de Equilíbrio

Para tornar comparáveis as métricas de vazão agregada (T) e Índice de Jain (J), nos pontos pertencentes a FP, aplicou-se uma normalização min-max, que transforma os valores para o intervalo $[0, 1]$:

$$J_{norm} = \frac{J - J_{min}}{J_{max} - J_{min}}, \quad T_{norm} = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (13)$$

Após essa etapa, definiu-se um *Índice de Equilíbrio* (S), baseado na média geométrica das métricas normalizadas, utilizado para selecionar um ponto representativo de compromisso entre eficiência e justiça:

$$S = \sqrt{J_{norm} \cdot T_{norm}} \quad (14)$$

Essa abordagem penaliza soluções extremas e favorece configurações que mantêm simultaneamente níveis satisfatórios de vazão e equidade. A Figura 3 apresenta o plano bidimensional formado pela Vazão Agregada (T) e pelo Índice de Jain (J). O eixo horizontal (X) representa a vazão agregada do sistema (T), expressa em Mbps, enquanto o eixo vertical (Y) corresponde ao Índice de Jain (J). Cada ponto representa o par (T, J) que compõe a FP, bem como cada algoritmo que compõe a FP.

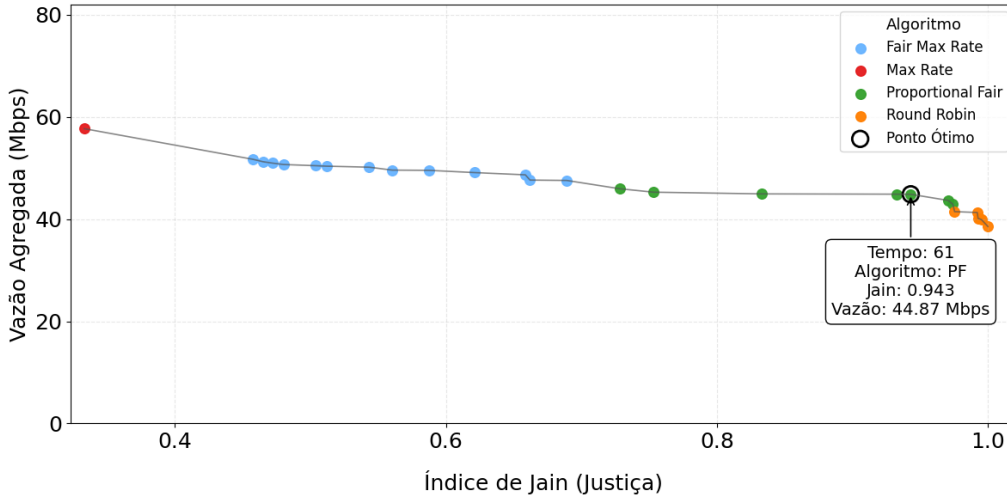


Figura 3. Identificação do ponto ótimo na Fronteira de Pareto.

O ponto destacado na Figura 3, obtido através do *Índice de Equilíbrio* (S), corresponde ao instante $t = 61$, associado ao algoritmo PF, com $J = 0,943$ e $T = 44,87$ Mbps. Esse ponto foi selecionado com base na média geométrica das métricas normalizadas, representando um equilíbrio entre elevada justiça e vazão competitiva. Ele evita tanto o extremo de máxima eficiência, com forte desigualdade (jain próximo de 0), quanto o extremo de justiça ideal (jain próximo de 1), com baixa vazão.

Esse resultado evidencia que existe uma configuração capaz de maximizar simultaneamente alta vazão e alta justiça. Entretanto, à medida que o Índice de Jain aumenta, observa-se uma redução da vazão agregada. Porém, é possível observar a formação de agrupamentos distintos para cada política de escalonamento, o que permite caracterizar a existência de regiões viáveis do sistema e identificar limites operacionais entre vazão e justiça.

7. Proposta de Política de Justiça Baseada na FP

A construção da Fronteira de Pareto permite que o ponto de operação da rede seja orientado por uma política explícita de qualidade de serviço, considerando simultaneamente eficiência e justiça na alocação de recursos. Formalmente, o problema pode ser descrito da seguinte forma:

$$\max T \quad \text{sujeito a} \quad J \geq \varepsilon_{min}, (T, J) \in P \quad (15)$$

onde P representa o conjunto de soluções não dominadas da Fronteira de Pareto.

A Figura 4 apresenta a aplicação prática da FP no processo de escalonamento. Inicialmente, o sistema monitora métricas da rede, como vazão agregada, Índice de Jain, carga da célula e condições de canal dos usuários. A partir dessas informações, define-se um limiar mínimo aceitável de justiça, denotado por $J \geq \varepsilon_{min}$, restringindo a operação da rede à região da FP que satisfaz essa condição. Na Figura 4, a região destacada representa o conjunto de soluções admissíveis após a aplicação da restrição de justiça.

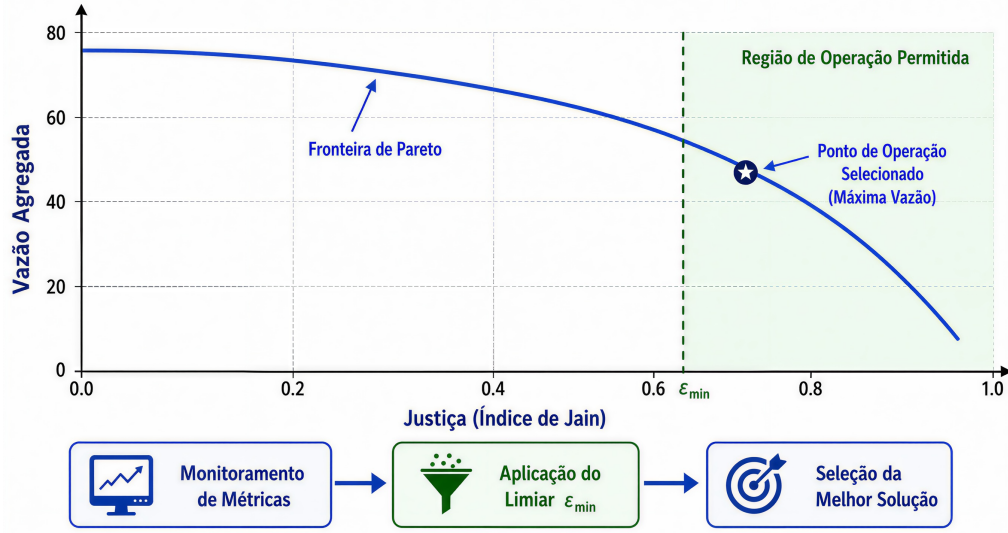


Figura 4. Aplicação Prática da FP no escalonamento de recursos em 5G.

Assim, a política proposta baseia-se em três princípios operacionais: garantir um nível mínimo de justiça na distribuição de recursos, restringir a operação apenas às soluções não dominadas da FP, evitando configurações ineficientes no espaço (T, J) , e selecionar, dentre as soluções admissíveis, aquela que apresenta a maior vazão agregada. Dessa forma, o escalonador passa a operar apenas em regiões eficientes, adaptando-se dinamicamente ao estado da rede e aos requisitos de qualidade de serviço.

8. Conclusão

A construção da Fronteira de Pareto permitiu identificar soluções não dominadas e evidenciar que não há configuração capaz de maximizar simultaneamente alta vazão e alta justiça. Os resultados mostram que diferentes escalonadores ocupam regiões distintas da FP, refletindo diferentes estratégias de compromisso entre eficiência e equidade. Enquanto o MR concentra soluções com maior vazão e menor justiça, o PF e o FMR apresentam pontos mais equilibrados no conjunto eficiente.

Além da análise comparativa, os resultados indicam a viabilidade de utilizar a FP como mecanismo orientador de políticas de escalonamento. Nesse contexto, a definição de um limiar mínimo de justiça ($J \geq \varepsilon_{min}$) permite restringir a operação da rede a regiões eficientes que preservem níveis aceitáveis de justiça, sem comprometer significativamente a vazão agregada. Dessa forma, a justiça deixa de atuar apenas como métrica de avaliação posterior e passa a ser incorporada diretamente ao processo de decisão da alocação de recursos.

Como trabalhos futuros, propõe-se avaliar diferentes valores de ε_{min} , expandir a análise para cenários com um maior número de usuários e diferentes condições de mobilidade, além de investigar o uso de modelos preditivos para a identificação automática de regiões eficientes na FP no plano de vazão versus justiça.

Referências

- 3GPP (2019). Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical Channels and Modulation TS 38.211 (Release 15). Technical Specification TS 38.211 V15.5.0, 3GPP.
- Chataut, R. and Akl, R. (2020). Massive mimo systems for 5g and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction. *Sensors*, 20(10):2753.
- Deb, K. (2011). Multi-objective optimization using evolutionary algorithms: An introduction. KanGAL Report 2011003, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, India. Publicado originalmente como relatório técnico e posteriormente como capítulo de livro na Springer.
- Guo, C., Sheng, M., Wang, X., and Zhang, Y. (2014). Throughput maximization with short-term and long-term jain’s index constraints in downlink ofdma systems. *IEEE transactions on communications*, 62(5):1503–1517.
- Lopes, D. C., Pires, A. L. N., Bastos, I. V., and Moraes, I. M. (2025). Fair max rate: Um escalonador de recursos baseado em aprendizado por reforço para redes 5g. In *Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2025)*, pages 1043–1056, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Mamane, A., Fattah, M., Ghazi, M. E., Bekkali, M. E., Balboul, Y., and Mazer, S. (2022). Scheduling algorithms for 5g networks and beyond: Classification and survey. *IEEE Access*, 10:51643–51661.
- Padmageetha, B. G., Naik, P. K., and Patil, M. (2024). Resource allocation in 5g networks - machine learning approach. *J. Electrical Systems*, 20(3):4165–4179.
- Sedq, A. B., Gohary, R. H., Schoenen, R., and Yanikomeroglu, H. (2013). Optimal tradeoff between sum-rate efficiency and jain’s fairness index in resource allocation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(7):3496–3509.