

Análise da Evolução dos Processadores Intel Core i3 (2010–2019) com Base nos Dados do SPEC.org

Pedro Henrique Janini Silva Rodrigues¹, Renan Albuquerque Marks¹

¹FACOM – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)
R. Ufms - Vila Olinda, Campo Grande - MS

pedro.janini@ufms.br, renan.marks@ufms.br

Abstract. *Processor performance evolution is critical to the computing industry. The period from 2010 to 2019 encapsulates a highly volatile phase for Intel, marked by the stagnation of the 14 nm lithography and the resurgence of competition. This work seeks to answer the question: “What was the rhythm of performance evolution for Intel Core i3 processors between 2010 and 2019?”. To do this, a quantitative analysis was performed, correlating data from standardized benchmarks (SPEC CPU2006 and SPEC CPU2017) with the architectural specifications (core, clock, cache, and memory) of **eight distinct Core i3 processor generations**. The results demonstrate that the pace of evolution was neither constant nor moderate, but rather volatile and driven by different bottlenecks at different times. The first phase (2010-2016) was marked by IPC gains and the resolution of memory bottlenecks with the introduction of DDR4. The second phase (2017-2019) revealed a strategic shift, where Intel sacrificed single-thread performance (reducing clock speed) to double the physical cores, prioritizing parallelism.*

Resumo. *A evolução do desempenho de processadores é crucial para a indústria de computação. O período de 2010 a 2019 encapsula uma fase de grande volatilidade para a Intel, marcada pela estagnação da litografia de 14 nm e pelo ressurgimento da concorrência. Este trabalho busca responder à pergunta: “Como foi o ritmo da evolução de desempenho dos processadores Intel Core i3 entre os anos de 2010 e 2019?”. Para isso, foi realizada uma análise quantitativa correlacionando dados de benchmarks padronizados (SPEC CPU2006 e SPEC CPU2017) com as especificações arquiteturais (núcleo, clock, cache e memória) de **oito gerações distintas de processadores Core i3**. Os resultados demonstram que o ritmo de evolução não foi constante nem moderado, mas sim volátil e impulsionado por diferentes gargalos em momentos distintos. A primeira fase (2010-2016) foi marcada por ganhos de IPC e pela resolução de gargalos de memória com a introdução da DDR4. A segunda fase (2017-2019) revelou uma mudança estratégica, onde a Intel sacrificou o desempenho single-thread (reduzindo o clock) para duplicar os núcleos físicos, priorizando o paralelismo.*

1. Introdução

A evolução do desempenho dos processadores (CPUs) é um pilar fundamental para o avanço da computação moderna. Por décadas, a indústria foi guiada por um ritmo

previsível de melhorias, impulsionado pela Lei de Moore e por estratégias de fabricação consistentes. No entanto, o desempenho de um processador não é uma métrica única; ele é o resultado de uma interação complexa entre frequência (*clock*), contagem de núcleos (paralelismo), eficiência microarquitetural (*IPC* - Instruções por Ciclo) e a velocidade do subsistema de memória [11].

O período entre 2010 e 2019 encapsula uma das fases mais voláteis e estratégicas da história da Intel. A década iniciou com o domínio da empresa, sustentado pela cadência rítmica do “*Tick-Tock*” (Seção 2.1), mas terminou em um cenário de estagnação litográfica (a dificuldade de sair dos 14 nm) e o ressurgimento de uma forte concorrência com o lançamento dos processadores AMD Ryzen (Seção 2.5).

Este cenário de disrupção levanta a questão central de pesquisa deste trabalho: **Como foi o ritmo da evolução de desempenho dos processadores Intel Core i3 entre os anos de 2010 e 2019?** O objetivo é quantificar esse ritmo, identificando se ele foi linear, se apresentou aceleração ou se, de fato, estagnou, e quais fatores arquiteturais causaram essas mudanças.

Para responder a esta pergunta, o trabalho adota uma **abordagem quantitativa** fundamentada na análise de dados de *benchmarks* padronizados. A metodologia (Seção 3) baseia-se na coleta e processamento de dados públicos das suítes **SPEC CPU® 2006** e **SPEC CPU® 2017** (Seção 2.3), escolhidas por sua reprodutibilidade e rigor científico. Os resultados de desempenho (SPEED e RATE) são então correlacionados com os dados de especificações de *hardware* dos processadores (como núcleos, *clock*, *cache* e memória *DDR*), analisados na Seção 4.1.3.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta a **Fundamentação Teórica** sobre a evolução da Intel, a importância dos *benchmarks* e a motivação do estudo. A Seção 3 detalha a **Metodologia** de coleta, filtragem e processamento dos dados. A Seção 4 apresenta os **Resultados e a Discussão**, correlacionando os dados de desempenho com as mudanças de *hardware*. Finalmente, a Seção 5 apresenta a **Conclusão**, que sintetiza as descobertas e responde à pergunta de pesquisa.

2. Fundamentação

Esta seção apresenta a fundamentação teórica e o contexto que embasam a pesquisa. Inicialmente, descreve-se o objeto de estudo: a **evolução histórica dos processadores Intel Core no período de 2010 a 2019**. Em seguida, justifica-se a abordagem metodológica através da **importância dos benchmarks sintéticos** para a avaliação de desempenho padronizada. Na sequência, são detalhadas as duas principais plataformas de *benchmark* consideradas: a **Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC)**, que é a ferramenta escolhida para este trabalho, e a plataforma **OpenBenchmarking.org**, que serve como um contraponto metodológico. Por fim, a seção estabelece a **Motivação** do estudo, contextualizando a estagnação da Intel e a ascensão da concorrência, o que define a relevância da pergunta de pesquisa.

2.1. Evolução dos Processadores Intel Core (2010–2019)

A linha de processadores Intel Core, introduzida oficialmente em 2006 com o lançamento da família **Core 2 Duo** (baseada na microarquitetura Core) [4], consolidou-se como a

principal família de *CPUs* voltadas ao público doméstico e corporativo. Entretanto, foi a partir da década de 2010 que a Intel iniciou uma sequência contínua de lançamentos que definiram o padrão de desempenho e eficiência para o mercado de computadores pessoais [5].

Cada geração de processadores Intel Core é identificada por uma microarquitetura distinta, frequentemente associada a um novo processo de fabricação em nanômetros e a incrementos na eficiência energética, largura de banda de memória e quantidade de transistores. A Tabela 1 [27] resume as principais gerações lançadas entre 2010 e 2019, que correspondem às nove primeiras gerações da série Intel Core i3 analisadas neste trabalho.

Tabela 1. Resumo das gerações Intel Core (2010–2019) e estratégia de litografia.

Geração	Microarquitetura	Ano	Litografia (nm)	Estratégia
1 ^a	Westmere	2010	32 nm	Tick
2 ^a	Sandy Bridge	2011	32 nm	Tock
3 ^a	Ivy Bridge	2012	22 nm	Tick
4 ^a	Haswell	2013	22 nm	Tock
5 ^a	Broadwell	2014	14 nm	Tick
6 ^a	Skylake	2015	14 nm	Tock
7 ^a	Kaby Lake	2016	14 nm+	Otimização (PAO)
8 ^a	Coffee Lake	2017	14 nm++	Otimização (PAO)
9 ^a	Coffee Lake Refresh	2018	14 nm+++	Otimização (PAO)

Durante o período que abrange da 1^a até a 6^a geração, a Intel manteve a estratégia conhecida como *tick-tock*, na qual cada “*tick*” representava uma redução no processo de litografia, ou seja, a diminuição do tamanho dos transistores, e cada “*tock*” introduzia uma nova microarquitetura. A partir da 7^a geração, contudo, diante das limitações físicas impostas pela miniaturização, a Intel substituiu o modelo *tick-tock* pela estratégia **PAO (Processo-Arquitetura-Otimização)**. Este novo ciclo decompõe a evolução tecnológica em três etapas distintas [28]:

- **Processo (P):** Introdução de uma nova litografia, reduzindo as dimensões dos transistores (equivalente ao antigo “*Tick*”).
- **Arquitetura (A):** Lançamento de uma nova microarquitetura utilizando o processo de fabricação já estabelecido, focando em aumento de *IPC* e eficiência (equivalente ao antigo “*Tock*”).
- **Otimização (O):** Etapa introduzida para refinar o processo de fabricação existente sem alterar a litografia base. Isso envolve melhorias nas características físicas e elétricas dos transistores (como o perfil das aletas nos transistores *FinFET*), permitindo frequências de operação (*clock*) mais altas com a mesma tensão.

Essa mudança de abordagem explica a existência das litografias refinadas (14nm+ e 14nm++) observadas na Tabela 1. Foi através da etapa de “Otimização” que a Intel conseguiu manter ganhos de desempenho entre as gerações Kaby Lake e Coffee Lake, elevando as frequências de operação mesmo sem reduzir o tamanho dos transistores ou introduzir grandes mudanças na microarquitetura.

No início da década, os processadores da linha Intel Core i3 apresentavam configurações de dois núcleos e quatro *threads*, caracterizando-se como modelos de entrada da família Core, otimizados para tarefas de produtividade, navegação e multitarefa leve. Com o passar das gerações, especialmente a partir da 8ª geração (Coffee Lake), os modelos passaram a adotar quatro núcleos físicos. No entanto, para segmentação de mercado e diferenciação da linha Core i5, a tecnologia *Hyper-Threading* foi desativada nos modelos base i3 [24], resultando em uma configuração de quatro núcleos e quatro *threads* [6]. Essa transição, apesar da desativação do *multithreading*, refletiu o aumento gradual da demanda por aplicações paralelas e multitarefa.

Os processadores Intel Core não foram os primeiros a adotar múltiplos núcleos, mas representaram a consolidação dessa arquitetura no segmento de consumo. A Intel já havia introduzido *designs multicore* anteriormente, como o Pentium D [30] e Core 2 Duo [29], porém a família Intel Core i estabeleceu um equilíbrio mais eficiente entre desempenho, consumo e custo, consolidando o conceito de *multi-core* no mercado doméstico.

O tamanho do transistor, medido em nanômetros, é um fator essencial para a evolução da microeletrônica. Reduções sucessivas nesse parâmetro permitem incluir mais transistores em um mesmo chip, aumentando a capacidade de processamento e reduzindo o consumo energético. Entre 2010 e 2019, o processo de fabricação evoluiu de 32 nm para variações aprimoradas do nó de 14 nm, mantendo-se nesse limite devido a desafios técnicos de miniaturização. Mesmo sem reduções drásticas no tamanho do transistor após 2015, a Intel conseguiu ampliar o número total de transistores e melhorar o desempenho por meio de otimizações arquiteturais (*PAO* - Processo-Arquitetura-Otimização) [28] e melhorias de *IPC* (*instructions per cycle*).

Em síntese, o período de 2010 a 2019 marcou uma fase de maturação das microarquiteturas Intel, caracterizada por avanços incrementais e estabilidade no processo de fabricação. Essa trajetória consolidou a linha Core como referência de desempenho, mas também revelou os limites físicos e tecnológicos do silício tradicional, que começariam a impactar o ritmo de evolução nas gerações seguintes.

2.2. Importância dos *Benchmarks* Sintéticos na Avaliação de Desempenho

A análise e o projeto de arquiteturas de computadores devem ser guiados por uma abordagem quantitativa, onde o desempenho é a métrica principal para comparar projetos e tomar decisões [11, Cap. 1, Seção 1.4]. Nesse contexto, para concretizar a avaliação quantitativa do desempenho de *hardware*, dentre as diversas abordagens de teste, os *benchmarks* sintéticos se destacam por oferecerem uma forma padronizada, reproduzível e comparável de mensurar o potencial de processadores, memórias e outros componentes de *hardware*.

Diferentemente de testes empíricos (realizados com o uso de aplicações reais e cotidianas), os *benchmarks* sintéticos utilizam cargas de trabalho artificiais. Essas cargas são projetadas especificamente para **isolar e avaliar aspectos pontuais** da arquitetura do processador, como a capacidade de execução de instruções inteiras ou de ponto flutuante, largura de banda de memória e o paralelismo entre núcleos. Essa característica permite uma análise mais controlada e precisa do comportamento interno da CPU, isolando variáveis que seriam difíceis de medir em cenários de uso cotidiano.

Outra vantagem crucial dessa abordagem é a **reprodutibilidade dos resultados**. Como os *benchmarks* sintéticos são regidos por conjuntos de programas, parâmetros e condições de execução rigidamente definidos (a exemplo das suítes SPEC), é possível replicar os testes em diferentes plataformas. Essa padronização assegura a consistência na comparação entre as diversas gerações de processadores, sendo indispensável para estudos de longo prazo, como o presente trabalho, que visa observar o ritmo de evolução de desempenho ao longo de quase uma década.

Além disso, os *benchmarks* sintéticos fornecem métricas numéricas objetivas e comparáveis, facilitando a aplicação de métodos estatísticos e a geração de modelos de tendência (como a regressão linear empregada na seção de Resultados). Tais métricas permitem que o desempenho seja analisado sob múltiplas perspectivas, incluindo desempenho absoluto e escalabilidade em cargas paralelas.

No entanto, é importante reconhecer a limitação de que, por se tratarem de testes artificiais, os *benchmarks* sintéticos não refletem necessariamente o desempenho em todas as situações de uso real. Seu propósito primário é medir o potencial teórico e arquitetural dos sistemas, e não o comportamento em aplicações específicas. Ainda assim, sua relevância é amplamente reconhecida na pesquisa em arquitetura de computadores, fornecendo uma base metodológica sólida, consistente e replicável, indispensável para compreender a evolução do *hardware* moderno.

2.3. Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC)

Dando continuidade à necessidade de *benchmarks* padronizados, a **Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC)** é a organização mais influente e reconhecida nesse domínio. Fundada em **1988** por um consórcio de fornecedores de estações de trabalho, a SPEC nasceu da necessidade de criar testes de desempenho realistas e padronizados [23].

A SPEC é uma corporação sem fins lucrativos que conta hoje com mais de 120 membros, incluindo as principais empresas de *hardware* e *software*, universidades e institutos de pesquisa [23]. O objetivo da organização é fornecer um conjunto objetivo de testes orientados a aplicações que sirvam como pontos de referência comuns durante a avaliação de sistemas [22].

2.3.1. As Suítes SPEC CPU® (2006 e 2017)

O funcionamento do SPEC se baseia na distribuição de suítes de *benchmarks* como **código-fonte**, muitas das quais são derivadas de aplicações reais [22, 17]. Os licenciados (usuários) devem compilar esse código em seus sistemas, seguindo regras de execução (*Run Rules*) estritas.

O foco deste trabalho são as suítes **SPEC CPU®**, projetadas para medir o desempenho intensivo de computação, estressando o **processador, o subsistema de memória e o compilador** [17]. Este estudo utiliza duas gerações dessas suítes:

- **SPEC CPU® 2006**: A suíte utilizada para avaliar as gerações de processadores no início do período (2010-2016).

- **SPEC CPU® 2017**: A sucessora, que introduziu novas cargas de trabalho e regras, usada para avaliar as gerações mais recentes (2017-2019).

Ambas as suítes medem o desempenho em duas modalidades principais:

- **SPECspeed®** (Métrica de Velocidade): Mede o tempo para completar uma única tarefa, sendo o principal indicador de desempenho *single-core* (*monothread*).
- **SPECrate®** (Métrica de Vazão): Mede o *throughput*, ou seja, o número de tarefas que um sistema pode completar em paralelo (*multithread*) por unidade de tempo.

É crucial notar que, embora meçam os mesmos conceitos (SPEED e RATE), as suítes são produtos diferentes. Conforme a documentação oficial, **não existe fórmula de conversão** entre os resultados do SPEC CPU 2006 e do SPEC CPU 2017, pois eles diferem em código, regras e dados utilizados [17]. Por este motivo, a metodologia deste trabalho os analisa separadamente.

2.3.2. Abrangência, Público-Alvo e Acesso

Embora este trabalho utilize as suítes SPEC CPU (do grupo *OSG* - Open Systems Group), a organização mantém diversos grupos que cobrem outras áreas, como *High Performance Computing* (*HPG*) e Gráficos (*GWPG*) [23].

O público-alvo do SPEC são pesquisadores, engenheiros e analistas que necessitam de uma análise robusta e científica [22]. Para garantir o acesso da comunidade científica, o licenciamento das suítes possui um custo reduzido, como o SPEC CPU® 2017, que custa **US\$ 50** para acadêmicos credenciados [20].

Embora o *software* seja licenciado, os **dados dos resultados** são **abertos e públicos**. O SPEC hospeda um repositório centralizado com todos os resultados submetidos e validados [21, 19], que serve como fonte primária para este artigo.

2.4. OpenBenchmarking.org

Como alternativa ao modelo de licenciamento restrito do SPEC, plataformas abertas de *benchmarking* ganharam popularidade, sendo a **OpenBenchmarking.org** a mais proeminente. Diferente do SPEC, o OpenBenchmarking.org não é uma corporação ou um consórcio de padronização, mas sim um **ecossistema centralizado** e uma plataforma de colaboração [10] construída em torno do **Phoronix Test Suite** (PTS) [12].

O Phoronix Test Suite é um *software* cliente de código-fonte aberto (*open-source*) [12] projetado para automatizar a execução de testes de forma extensível.

O OpenBenchmarking.org atua como o repositório *backend* para o PTS, hospedando centenas de perfis de teste e suítes que o cliente pode baixar e executar [12].

2.4.1. Funcionamento e Métricas

O funcionamento da plataforma é baseado em um modelo de cliente-servidor. O usuário, através do cliente Phoronix Test Suite, seleciona um “perfil de teste” (um arquivo XML e scripts que definem como executar um teste) [7] ou uma “suíte de testes” (um

agrupamento de perfis) [8]. O cliente então automatiza o download, a instalação das dependências e a execução do teste.

Ao final da execução, o usuário é **opcionalmente** solicitado a enviar seus resultados de volta para o repositório público [9]. Isso cria um grande banco de dados de resultados “coletados da comunidade” (*crowd-sourced*) [10].

A plataforma mede uma gama vasta de componentes, incluindo:

- **Processador:** Testes de compilação, codificação de vídeo (como AOM AV1, x264), xadrez (Stockfish), criptografia (OpenSSL) e renderização (Blender) [7].
- **Gráficos:** Testes de jogos, ray-tracing (POV-Ray) e renderizadores 3D [7].
- **Sistema e Disco:** Testes de I/O, bancos de dados (SQLite, Redis) e estresse do sistema [7].

2.4.2. Abrangência, Público-Alvo e Acesso

A abrangência da plataforma é um de seus pontos fortes. Ela é *cross-platform* (suportando Linux, Windows, macOS, Solaris e BSD) [12, 10] e projetada para escalar desde sistemas embarcados (*embedded*) até a nuvem (*cloud*) [10].

O uso da plataforma é **totalmente gratuito** para o público [9]. Os dados são abertos e podem ser explorados por qualquer usuário para comparar resultados [10]. O público-alvo é amplo, incluindo tanto “usuários” (entusiastas comparando seus sistemas com os de amigos) quanto “projetos e organizações” (para validação de *hardware* e garantia de qualidade) [10, 12].

No entanto, a principal característica que define o OpenBenchmarking.org é também sua maior diferença em relação ao SPEC: qualquer indivíduo ou organização pode criar e enviar seus próprios perfis de teste, sem a necessidade de um “*gate-keeper*” (moderador central) [10]. Essa abordagem resulta em uma vasta biblioteca de testes, mas também em uma **heterogeneidade** significativa de testes e configurações, como mencionado na Metodologia deste trabalho.

2.5. Motivação

A principal motivação deste trabalho é responder à pergunta de pesquisa central: **Como foi o ritmo da evolução de desempenho dos processadores Intel Core i3 entre os anos de 2010 e 2019?**

O período selecionado (2010-2019) não representa uma década de crescimento linear; ao contrário, ele encapsula duas fases distintas da indústria de processadores. A primeira metade da década foi marcada pelo domínio da Intel, impulsionado pela sua estratégia *tick-tock* (discutida na Seção 2.1), que garantia avanços geracionais consistentes.

A segunda metade da década, no entanto, define a relevância deste estudo. A partir de 2015, a Intel enfrentou graves e inesperados atrasos na transição de sua litografia de 14 nm para 10 nm [25]. Essa dificuldade técnica quebrou o modelo *tick-tock* e forçou a empresa a lançar múltiplas gerações de processadores (da 6ª à 10ª) essencialmente na mesma arquitetura (Skylake) e no mesmo processo de 14 nm, resultando em ganhos de desempenho puramente incrementais [3].

Essa estagnação abriu uma janela de oportunidade para a concorrência. Em **março de 2017**, a AMD lançou sua microarquitetura **Zen**, comercializada como **Ryzen** [31, 26]. O lançamento marcou o retorno da AMD ao mercado de alto desempenho após quase uma década [31]. Os processadores Ryzen foram disruptivos ao oferecer um número significativamente maior de núcleos e *threads* (multitarefa) por um preço competitivo, superando as ofertas da Intel em diversas métricas de produtividade [26, 14].

Este artigo é motivado por essa disrupção. A pesquisa busca quantificar, usando os dados padronizados do SPEC, como a linha Core i3 da Intel respondeu a esse cenário. Analisa-se se a estagnação no processo de 14 nm de fato desacelerou o ritmo de evolução do desempenho e como a pressão competitiva do Ryzen forçou a Intel a reestruturar sua oferta de produtos.

3. Metodologia

A seção de Metodologia descreve as etapas e procedimentos adotados para a condução deste estudo. Inicialmente, são definidos os objetivos específicos da pesquisa, que orientam a análise e delimitam o escopo do trabalho. Em seguida, na subseção de Procedimentos, detalha-se o processo de seleção dos processadores, a escolha das suítes de *benchmark* e os critérios de comparação utilizados. A subseção de Ferramentas apresenta os recursos computacionais e bibliotecas empregados para coleta, tratamento e visualização dos dados, incluindo a descrição do banco de dados do SPEC.org, do ambiente de desenvolvimento e das tecnologias de apoio. Por fim, na parte de Avaliação, são explicadas as abordagens estatísticas e comparativas utilizadas para interpretar os resultados e relacioná-los às características arquiteturais dos processadores Intel Core i3 analisados.

3.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar o ritmo de evolução do desempenho dos processadores Intel i3 no período de 2010 a 2019, buscando compreender de que forma as melhorias e inovações introduzidas ao longo das gerações se refletiram nos resultados obtidos em testes padronizados.

Definem-se essas melhorias como as modificações implementadas nas gerações de processadores que iremos observar, representadas pelo aumento da frequência de operação, pela ampliação do número de núcleos e *threads*, pela expansão e maior associatividade das memórias cache, e pela transição para novos padrões de memória principal com maior largura de banda.

Tais melhorias refletem a evolução da microarquitetura destes processadores, e são responsáveis em otimizar o paralelismo de tarefas, reduzir latências e ampliar a largura de banda de comunicação entre os componentes internos. E dessa forma, esses avanços se traduzem em variações de desempenho que observamos em *benchmarks* padronizados.

Tendo essas considerações, podemos definir que este trabalho busca:

- **Quantificar o ganho percentual de desempenho** entre as gerações de processadores analisadas;
- **Identificar tendências de evolução ou desaceleração** nos resultados de desempenho ao longo do tempo;

- **Relacionar as mudanças de desempenho** com características microarquiteturais, como número de núcleos, *threads*, *cache*, *clock* e tipo de memória;
- **Comparar as métricas das suítes SPEC CPU2006 e SPEC CPU2017**, diferenciando os resultados entre as categorias INT (inteiros) e FP (ponto flutuante), e entre os modos SPEED (desempenho de uma tarefa única) e RATE (desempenho de múltiplas tarefas em conjunto).

3.2. Procedimentos

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho realiza uma análise comparativa baseada em resultados de desempenho obtidos a partir dos *benchmarks* SPEC CPU2006 e SPEC CPU2017, aplicados a diferentes gerações de processadores Intel Core i3, abrangendo o período entre 2010 e 2019.

A escolha pelo uso do *SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)* fundamenta-se em seu elevado grau de padronização e confiabilidade. O SPEC utiliza conjuntos de testes controlados, com metodologias e ambientes de execução definidos, o que garante comparabilidade direta entre diferentes gerações de processadores. Outras plataformas, como o *OpenBenchmarking.org*, embora possuam ampla variedade de dados, apresentam heterogeneidade de testes e configurações, o que dificultaria a análise histórica de forma consistente e reprodutível.

A partir dessa escolha, optou-se por analisar processadores da linha **Intel Core i3**, uma vez que é a série que possui maior número de gerações com resultados disponíveis no banco de dados do SPEC, entre as famílias voltadas ao uso doméstico e corporativo. Essa linha apresenta continuidade arquitetural e disponibilidade de dados que permitem observar a evolução do desempenho sem recorrer a modelos voltados a nichos específicos, como os processadores Xeon ou Core i9.

Foram considerados apenas modelos base dos processadores Intel Core i3, isto é, versões sem sufixos comerciais (como K, U, M, HQ, entre outros), de modo a manter a equidade nas comparações. Essa filtragem foi realizada automaticamente durante o processamento dos dados, garantindo que apenas resultados consistentes e representativos fossem utilizados na análise.

Em relação às **suítes de testes**, o SPEC CPU2006 e o SPEC CPU2017 são produtos independentes, desenvolvidos com cargas de trabalho, conjuntos de dados e métodos de cálculo próprios. De acordo com a documentação oficial da SPEC, não existe uma fórmula de conversão entre os resultados das duas suítes, uma vez que diferem em código, *hardware* explorado e regras de execução [17]. Por esse motivo, os resultados são analisados separadamente, considerando-se a evolução relativa dentro de cada suíte.

Ambas as suítes incluem duas categorias principais de testes:

- **CINT (Integer)** — mede o desempenho em operações de inteiros, associadas a aplicações gerais e lógicas;
- **CFP (Floating Point)** — avalia o desempenho em operações de ponto flutuante, relacionadas a cálculos científicos e gráficos.

Além disso, cada categoria é avaliada sob duas métricas complementares:

- **SPEED** — representa o desempenho em tarefas de execução única (*monothread*), evidenciando a capacidade individual de um núcleo de processamento;

- **RATE** — representa o desempenho em múltiplas tarefas simultâneas (*multithread*), evidenciando o paralelismo e a escalabilidade do processador.

Dessa forma, a metodologia adotada permite observar o comportamento dos processadores Intel Core i3 sob diferentes perspectivas de carga e tipo de operação, correlacionando a evolução de desempenho aos avanços arquiteturais observados em cada geração.

3.3. Apuração e Processamento dos Dados

O processo de apuração dos dados utilizados neste estudo foi dividido em cinco etapas principais, cada uma responsável por uma fase distinta da construção e análise dos resultados. Essas etapas foram implementadas por meio de scripts em Python executados em ambiente Jupyter (Google Colab), utilizando bibliotecas como *Pandas* e *Matplotlib* para manipulação, consolidação e visualização das informações.

3.3.1. Construção do Conjunto de Dados dos Processadores

Inicialmente, foi elaborado um conjunto de dados contendo as especificações técnicas dos processadores Intel Core i3 analisados, abrangendo da 1ª à 9ª geração. As informações foram obtidas a partir de documentação técnica e incluíram parâmetros como número de núcleos e *threads*, frequência base, frequência do barramento (*BCLK*), multiplicador, tamanhos e associatividade das memórias *cache*, além do tipo e frequência da memória principal (*DDR*). Esses dados foram organizados manualmente em estruturas tabulares no formato *CSV*, garantindo padronização entre as gerações. Esse conjunto de dados serviu de base para os gráficos que ilustram a evolução das características arquiteturais ao longo dos anos.

3.3.2. Geração dos Gráficos de Especificações Arquiteturais

Com o conjunto de dados estruturado, foi realizada a visualização das informações de *hardware*. Foram gerados gráficos que representam a evolução dos parâmetros arquiteturais, como número de núcleos e *threads*, frequência base, tamanho da *cache* e transição entre gerações de memória *DDR*, permitindo observar tendências estruturais nas plataformas Intel Core i3.

3.3.3. Filtragem dos Resultados dos Testes SPEC

Os resultados de desempenho utilizados neste estudo foram obtidos a partir do banco de dados público do **SPEC.org**, que reúne execuções padronizadas dos *benchmarks* SPEC CPU2006 e SPEC CPU2017. Os arquivos originais contêm informações de diferentes configurações de processadores, incluindo modelos com sufixos (como “K”, “U” e “T”), versões para dispositivos móveis e edições com frequências alteradas. Para manter a comparabilidade entre gerações, foi aplicado um processo de filtragem que manteve apenas os **modelos base**, ou seja, versões “*stock*” sem modificações de *clock* ou características especiais. O filtro também identificou automaticamente a versão da

suíte (2006 ou 2017) e o tipo de teste (CINT ou CFP; SPEED ou RATE), separando os resultados em conjuntos organizados por processador.

3.3.4. Consolidação das Pontuações de Desempenho

Com os resultados filtrados, foi realizada a consolidação das pontuações de cada processador em cada conjunto de testes SPEC. Para cada modelo, as pontuações individuais de cada *benchmark* foram agrupadas por categoria (CINT/CFP e SPEED/RATE), e a pontuação média foi calculada por meio de uma **média aritmética simples** dos resultados individuais, conforme a expressão:

$$\text{Pontuação média} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

em que P_i representa a pontuação obtida em cada teste individual e n é o número total de *benchmarks* executados naquela categoria. Essa consolidação resultou em uma métrica única de desempenho para cada processador, viabilizando comparações diretas entre gerações e entre versões do SPEC.

3.3.5. Visualização dos Resultados Consolidados

Por fim, as pontuações consolidadas foram utilizadas para gerar os gráficos de desempenho apresentados neste trabalho. As representações incluem a evolução percentual dos resultados, comparativos entre as versões SPEC CPU2006 e SPEC CPU2017, e gráficos com linhas de tendência obtidas por regressão linear simples. Essas visualizações foram fundamentais para identificar padrões de crescimento e para apoiar a análise sobre o ritmo da evolução de desempenho ao longo das gerações dos processadores Intel Core i3.

O processo geral de apuração pode ser resumido nas seguintes etapas numeradas:

1. Construção do conjunto de dados dos processadores;
2. Geração dos gráficos de especificações arquiteturais;
3. Filtragem dos resultados de desempenho do SPEC.org;
4. Consolidação das pontuações médias de cada processador;
5. Visualização e análise final dos resultados consolidados.

3.4. Ferramentas

Esta seção apresenta os recursos e instrumentos utilizados para coleta, tratamento, análise e visualização dos dados. As atividades foram realizadas em ambiente *Jupyter Notebook* por meio da plataforma **Google Colab**, utilizando a linguagem de programação **Python** na versão 3.12.12.

3.4.1. Banco de Dados SPEC.org

Os resultados de desempenho utilizados neste trabalho foram obtidos diretamente do repositório oficial do **SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)** [18].

Nesse portal, foram aplicados filtros de busca por modelo de processador, de modo a recuperar exclusivamente os resultados referentes aos processadores **Intel Core i3** observados. Em seguida, os dados foram exportados em formato `.csv`, permitindo o tratamento posterior por meio das bibliotecas Python.

3.4.2. Ambiente de Desenvolvimento

A etapa de processamento e análise dos dados foi conduzida no **Google Colab**, um ambiente de computação em nuvem baseado em *Jupyter Notebook*, que permite a execução de código Python sem necessidade de instalação local. O Colab foi escolhido por sua praticidade na manipulação de dados, suporte a bibliotecas científicas e integração nativa com o Google Drive, facilitando o armazenamento e compartilhamento dos resultados.

3.4.3. Linguagem e Bibliotecas Utilizadas

A análise foi implementada em **Python 3.12.12**, com o auxílio de um conjunto de bibliotecas voltadas à manipulação de dados, cálculos estatísticos e visualização gráfica. A seguir, descrevem-se as principais bibliotecas utilizadas e suas respectivas funções:

- **pandas**: responsável pela manipulação e análise de dados tabulares (*DataFrames*). Foi utilizada para leitura e tratamento dos arquivos `.csv`, bem como para junção e filtragem dos dados de testes dos processadores.
- **numpy**: fornece operações matemáticas e vetorizadas de alto desempenho. Empregada para cálculos de médias, desvios e transformações numéricas.
- **matplotlib**: biblioteca para criação de gráficos 2D (linhas, barras e dispersão). Utilizada na plotagem dos resultados dos *benchmarks* SPEC.
- **seaborn**: extensão do Matplotlib voltada à produção de gráficos estatísticos mais elegantes e comparativos. Aplicada para visualizações com foco em clareza e estética aprimorada.
- **os** e **pathlib**: empregadas para interação com o sistema de arquivos, permitindo a criação, leitura e organização de diretórios para entrada e saída de dados.
- **glob**: utilizada para busca de arquivos com padrões específicos (por exemplo, `*.csv`), automatizando a leitura de múltiplos resultados de *benchmark*.
- **re**: responsável por operações com expressões regulares, usada na limpeza e padronização de nomes de arquivos e colunas.
- **typing**: adiciona tipagem estática opcional ao Python, contribuindo para maior legibilidade e segurança na definição de funções.
- **warnings**: empregada para controle e supressão de mensagens de aviso, evitando alertas automáticos durante a execução de códigos.
- **google**: biblioteca utilizada para integração com o Google Colab e o Google Drive (`google.colab`), permitindo o carregamento e o salvamento dos dados diretamente em nuvem.

3.4.4. Uso de Modelos de Linguagem (LLM)

Durante o desenvolvimento, foi empregado um modelo de linguagem de grande escala baseado em inteligência artificial (LLM, do inglês *Large Language Model*), especificamente o **Claude** [1], para auxiliar na geração inicial de alguns gráficos exploratórios. Esse recurso de inteligência artificial foi utilizado como apoio na etapa de visualização e análise dos resultados, contribuindo para a organização e interpretação dos dados.

3.5. Avaliação

A avaliação dos resultados teve como objetivo compreender o ritmo de evolução do desempenho dos processadores Intel Core i3 entre 2010 e 2019, relacionando as variações de desempenho observadas nos testes padronizados com as mudanças técnicas introduzidas em cada geração.

A análise baseou-se na aplicação de **regressões lineares** sobre os resultados dos *benchmarks* SPEC CPU2006 e SPEC CPU2017, considerando as métricas **SPEED** (desempenho *monothread*) e **RATE** (desempenho *multithread*) nas categorias **CINT** (inteiros) e **CFP** (ponto flutuante). As linhas de tendência obtidas serviram como referência para avaliar o comportamento geral da evolução, permitindo verificar se o crescimento de desempenho entre as gerações se manteve próximo de um padrão linear ou apresentou sinais de desaceleração.

De forma complementar, foram calculados os **ganhos percentuais de desempenho** entre as gerações, a partir dos valores obtidos nos testes SPEC. Esses cálculos possibilitaram estimar o avanço relativo entre os processadores, oferecendo uma visão mais detalhada da magnitude das melhorias observadas ao longo do período estudado.

Além disso, foram analisados as **características dos processadores**, relacionados à sua microarquitetura, como: número de núcleos, número de *threads*, frequência base, multiplicador, tamanho e associatividade da cache L3 e o tipo de memória principal utilizada. Essas informações permitiram contextualizar os resultados de desempenho e identificar como as modificações arquiteturais influenciaram o comportamento dos testes.

Com essa abordagem, foi possível avaliar o ritmo da evolução de desempenho de forma abrangente, combinando a interpretação dos resultados numéricos do SPEC com as características técnicas dos processadores de cada geração.

4. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os dados coletados e a análise crítica dos resultados. Inicialmente, a subseção **Resultados dos Benchmarks SPEC** (Seção 4.1) expõe os dados de desempenho obtidos das suítes SPEC CPU2006 e SPEC CPU2017, bem como os dados das características arquiteturais dos processadores analisados. Em seguida, a subseção **Discussão** (Seção 4.2) correlaciona esses dois conjuntos de dados para identificar as causas das variações de desempenho e responder à pergunta central da pesquisa.

4.1. Resultados dos Benchmarks SPEC

Os resultados apresentados nesta seção foram divididos em dois grupos principais: na seção 4.1.1 temos os resultados que representam o desempenho obtido nos testes padro-

nizados SPEC CPU2006 e SPEC CPU2017; e na seção 4.1.2 temos os resultados que representam as características arquiteturais dos processadores Intel Core i3 analisados.

4.1.1. SPEC CPU2006

A suíte SPEC CPU2006 foi utilizada para avaliar o desempenho das gerações mais antigas dos processadores Intel Core i3, considerando as categorias de testes inteiros (CINT) e de ponto flutuante (CFP), sob as métricas SPEED e RATE. De forma geral, observa-se uma evolução progressiva ao longo dos anos, com tendência geral de crescimento nas métricas, embora com variações perceptíveis entre algumas gerações intermediárias.

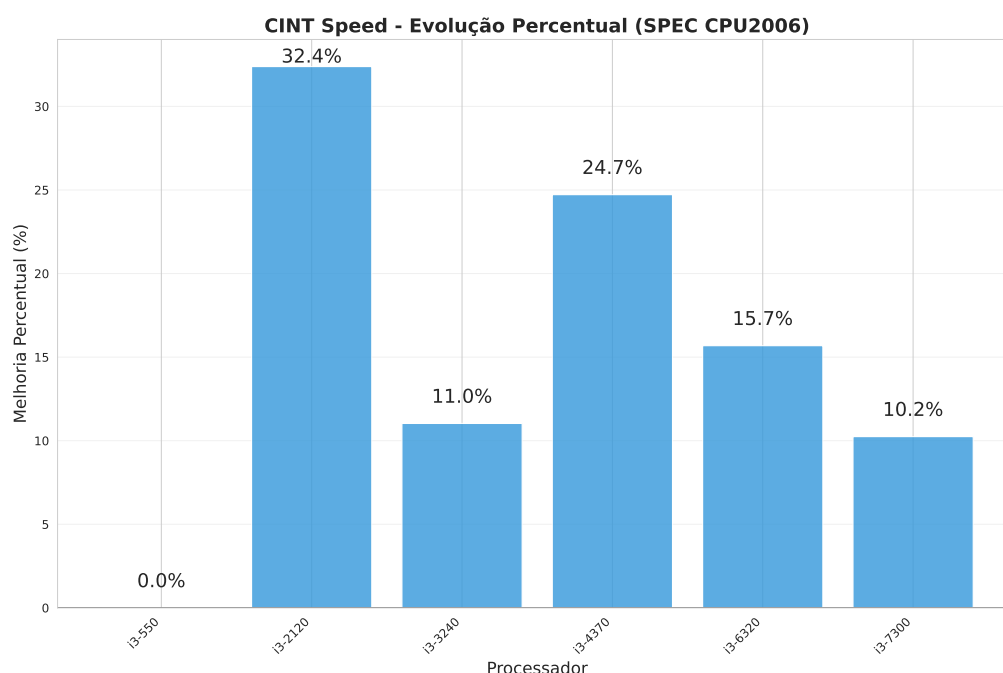


Figura 1. Evolução percentual do desempenho no SPEC CPU2006 – CINT SPEED.

A Figura 1 detalha o ganho de desempenho percentual para operações inteiras em *single-thread* (CINT Speed), comparando cada processador com a geração imediatamente anterior. O processador i3-550 (1ª Geração) serve como a **linha de base** da análise, portanto inicia com o valor de 0.0%.

O gráfico expõe uma **variação significativa** no ritmo de melhoria entre as gerações. O salto mais expressivo ocorre na transição para o i3-2120 (2ª Geração), com **32,4%** de ganho. Ao buscar uma explicação para este pico nos dados de especificações (Seção 4.1.3), nota-se que as métricas de *hardware* **não justificam** este avanço:

- A contagem de núcleos e *threads* (Figura 15) permaneceu idêntica (2C/4T);
- A frequência base (Figura 18) teve um aumento marginal (de 3.2 para 3.3 GHz);
- O *Cache* L3 (Figura 19) foi, na verdade, reduzido (de 4 MB para 3 MB).

Conclui-se, portanto, que este ganho de 32,4% não se deve às especificações de alto nível, mas sim às **otimizações microarquiteturais** (ganho de *IPC*) introduzidas pela arquitetura “*Tock*” (Sandy Bridge), como definido na Fundamentação (Tabela 1). Conforme detalhado por Michael Sexton[15], esta arquitetura representou o maior salto de desempenho da Intel em sete anos, principalmente devido à introdução de um **cache de**

micro-operações (L0) (para armazenar instruções decodificadas) e um **Ring Bus** interno, que integrou todos os componentes em um único *die* monolítico.

Em contrapartida, a transição para o i3-3240 (Ivy Bridge), um “*Tick*” focado em eficiência (redução de 22 nm), resulta em um ganho mais contido de **11,0%** [15]. A evolução acelera novamente com o “*Tock*” do i3-4370 (Haswell), atingindo **24,7%** de melhoria.

A partir deste ponto, os ganhos percentuais entram em desaceleração, caindo para **15,7%** (i3-6320, Skylake) e **10,2%** (i3-7300, Kaby Lake). Essa redução no ritmo coincide com o fim da estratégia *tick-tock* e o início do ciclo de otimizações (*PAO*), onde os ganhos de *IPC single-thread* tornaram-se visivelmente menores a cada ano [16].

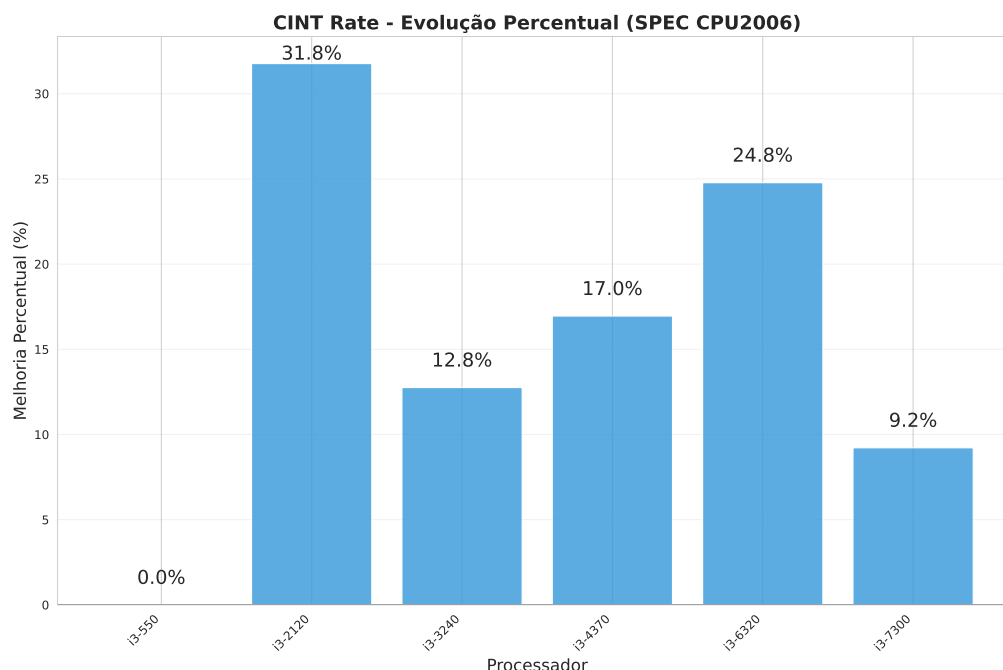


Figura 2. Evolução percentual do desempenho no SPEC CPU2006 – CINT RATE.

A Figura 2 (CINT Rate) apresenta uma dinâmica distinta da Figura 1 (SPEED). A discrepância mais significativa ocorre na 6ª Geração (i3-6320), onde o ganho de *throughput* (RATE) foi de **24,8%**, um valor substancialmente maior que o ganho de *single-thread* (SPEED) de 15,7% na mesma transição.

Esta variação demonstra que o desempenho *multithread* (RATE) não era limitado apenas pelo *IPC* (SPEED), mas também por um gargalo de largura de banda de memória.

Como pode ser visto na Figura 21, o i3-6320 (Skylake) foi o processador que introduziu o suporte ao padrão **DDR4**. A Figura 21 mostra que isso aumentou a largura de banda disponível em 33% (de 25.6 GB/s para 34.1 GB/s) em relação ao i3-4370 (4ª Ger). Este salto na largura de banda da memória aliviou o gargalo, permitindo que a capacidade *multithread* (2C/4T) fosse melhor explorada, explicando o ganho de RATE ser superior ao de SPEED.

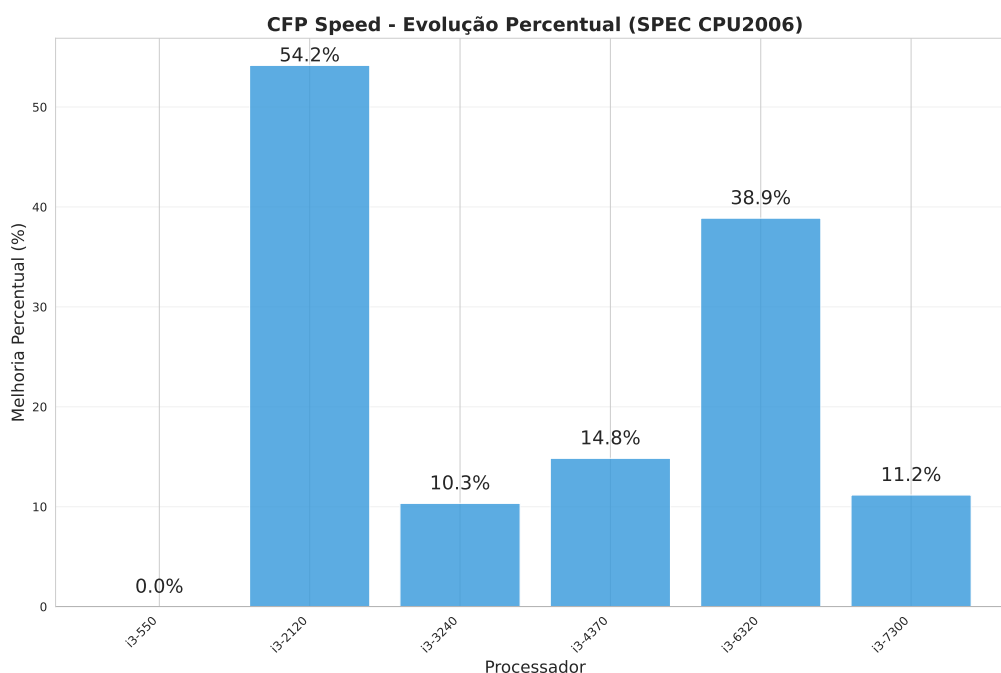


Figura 3. Evolução percentual do desempenho no SPEC CPU2006 – CFP SPEED.

A Figura 3 (CFP Speed) apresenta a maior variação no ritmo de evolução do *single-thread* de todo o estudo, com um desempenho inconstante entre as gerações. O gráfico mostra dois picos de desempenho distintos: um salto de **54,2%** na 2ª Geração (i3-2120) e um segundo salto de **38,9%** na 6ª Geração (i3-6320).

Ao cruzar estes picos com os dados de especificações (Seção 4.1.3), podemos identificar as causas:

1. **Pico do i3-2120 (54,2%):** Este ganho não pode ser explicado pelas especificações de *hardware* apresentadas. Os gráficos mostram que a contagem de núcleos (Figura 15), a frequência (Figura 18) e a largura de banda de memória (Figura 21) permaneceram praticamente inalteradas. O *Cache* L3 (Figura 19) foi inclusive reduzido. Conclui-se, por eliminação, que este ganho massivo se deveu às **otimizações microarquiteturais (IPC)** introduzidas pela arquitetura “*Tock*” (Sandy Bridge), como definido na Tabela 1.

2. **Pico do i3-6320 (38,9%):** Este segundo pico, por outro lado, coincide perfeitamente com a principal mudança de *hardware* introduzida pela 6ª Geração (Skylake): a **transição para a memória DDR4**. Como pode ser visto na Figura 21, esta geração aumentou a largura de banda de memória em **+33%** (de 25.6 GB/s para 34.1 GB/s) em relação ao i3-4370 (4ª Ger).

A conclusão é que o desempenho de Ponto Flutuante (CFP) se mostrou sensível a dois gargalos distintos: o *IPC* da microarquitetura (resolvido pelo Sandy Bridge) e a largura de banda da memória (resolvido pelo Skylake/DDR4).

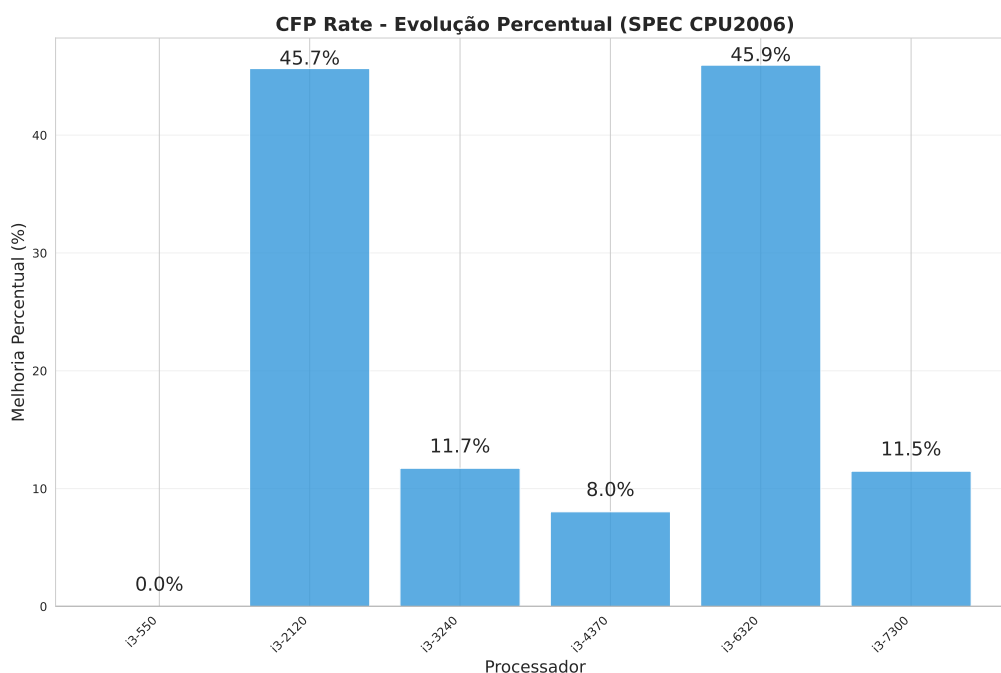


Figura 4. Evolução percentual do desempenho no SPEC CPU2006 – CFP RATE.

Por fim, a Figura 4 (CFP Rate) apresenta a evolução mais **volátil** de toda a suíte. O gráfico é dominado por picos de ganho (45,7% no i3-2120 e 45,9% no i3-6320), intercalados por períodos de forte estagnação.

O ponto mais crítico da análise é o ganho de apenas **8,0%** na 4ª Geração (i3-4370, Haswell). Este desempenho fraco em Ponto Flutuante Paralelo é explicado pelos dados de especificações (Seção 4.1.3): enquanto a frequência do i3-4370 aumentou (Figura 18), a largura de banda de memória permaneceu estagnada na *DDR3-1600* (Figura 21).

Ao aumentar a velocidade de processamento (*clock*) sem aumentar a largura de banda da memória (*DDR3*), a arquitetura Haswell tornou-se **limitada pela memória** (*memory-bound*) em testes paralelos pesados [2]. Isso é confirmado pelo pico seguinte: o salto massivo de **45,9%** no i3-6320 (Skylake), que resolveu o gargalo ao introduzir a **DDR4** (+33% de largura de banda) [13].

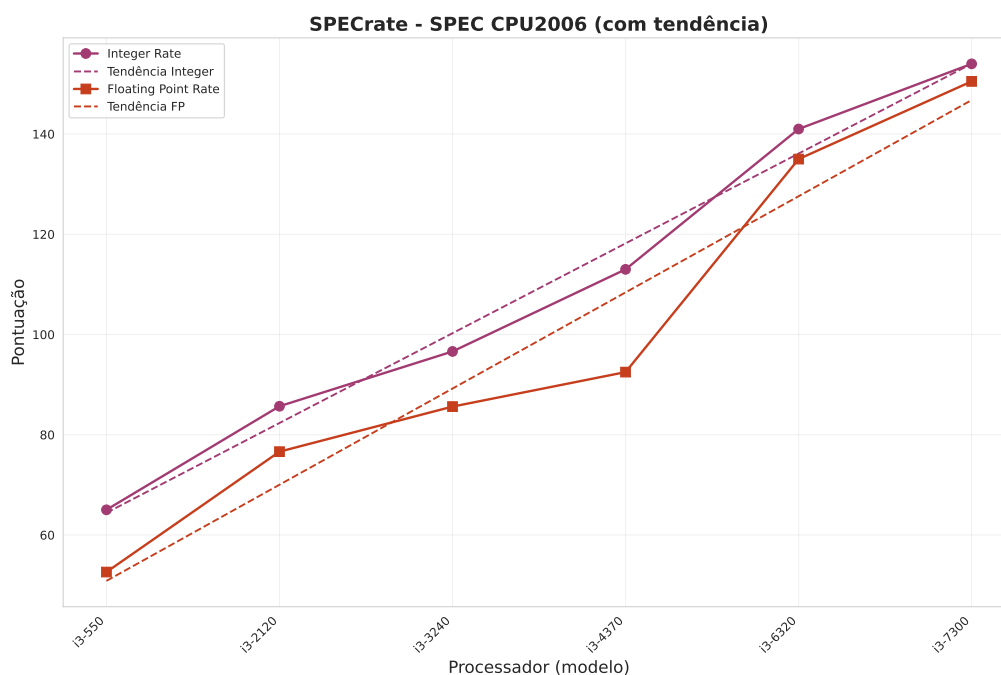


Figura 5. Tendência de desempenho no SPEC CPU2006 (RATE).

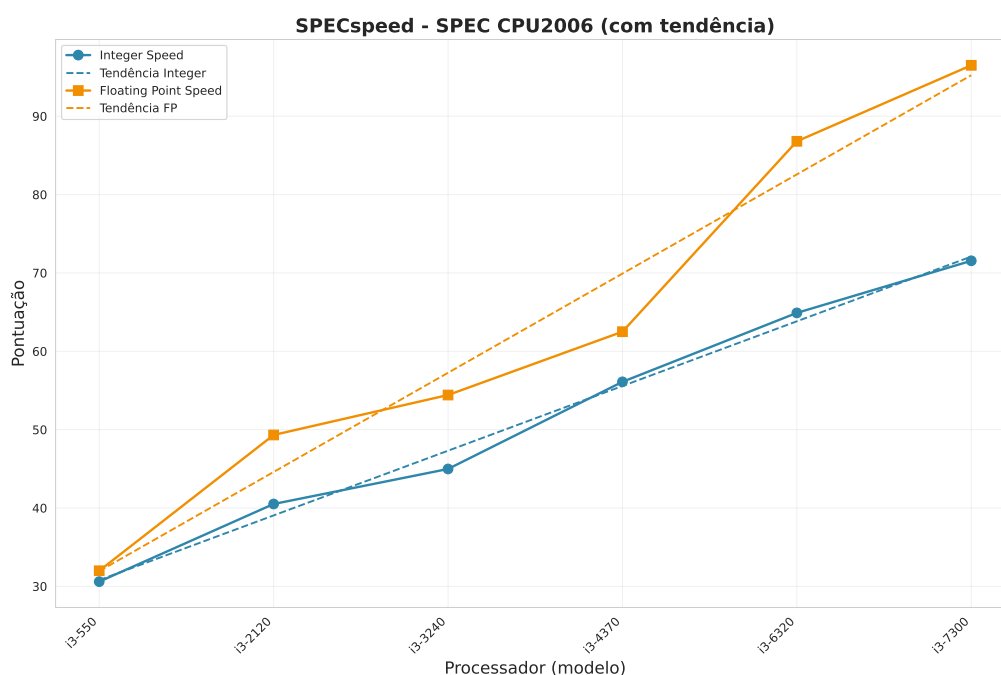


Figura 6. Tendência de desempenho no SPEC CPU2006 (SPEED).

As regressões lineares apresentadas nas Figuras 5 e 6 suavizam as flutuações geracionais (discutidas nas Figuras 1-4) para revelar a **tendência de crescimento acumulado** entre a 1ª Geração (i3-550) e a 7ª Geração (i3-7300).

A análise quantitativa da tendência geral (comparando os pontos inicial e final) mostra que o desempenho de Ponto Flutuante (CFP) teve um crescimento acumulado significativamente superior ao de Inteiros (CINT) em ambas as modalidades:

- **SPECrate (Throughput):** Conforme os dados da Figura 13, o CINT Rate teve

um crescimento acumulado de **138,2%** (de 65.0 para 154.8 pontos). O CFP Rate cresceu **187,4%** (de 51.5 para 148.0 pontos).

- **SPECspeed (Single-Thread):** Conforme os dados da Figura 14, o CINT Speed cresceu **122,0%** (de 32.2 para 71.5 pontos). O CFP Speed teve o maior avanço total, crescendo **208,0%** (de 31.1 para 95.8 pontos).

As linhas de tendência (tracejadas) confirmam um crescimento robusto em todas as métricas. No entanto, os dados reais (linhas sólidas) oscilam em torno delas, reforçando a conclusão das análises anteriores: os ganhos não foram lineares, mas sim impulsionados por avanços específicos de *IPC* (microarquitetura) e memória (*DDR4*), que beneficiaram o Ponto Flutuante de forma mais expressiva.

4.1.2. SPEC CPU2017

A suíte SPEC CPU2017, lançada como sucessora da SPEC CPU2006, introduz um **novo conjunto de 43 benchmarks** no total. Embora alguns programas da suíte anterior tenham sido mantidos (como o *mcf*), eles receberam novas cargas de trabalho ou versões de código-fonte atualizadas [17].

Em relação às métricas, o SPEC CPU2017 **manteve os mesmos conceitos** da suíte anterior: a distinção entre testes inteiros (CINT) e de ponto flutuante (CFP), e entre as modalidades SPEED (single-task) e RATE (throughput) [17].

A principal “atualização”, no entanto, está na forma de cálculo: os resultados são normalizados contra uma **nova máquina de referência** (um Sun Fire V490). Como os testes e cargas de trabalho são diferentes, a documentação oficial afirma que **não há fórmula de conversão** entre os resultados do CPU2006 e do CPU2017 [17]. Por este motivo, os resultados das duas suítes são analisados separadamente neste trabalho.

Os resultados (apresentados nas Figuras 7 a 10) seguem um padrão de crescimento, embora com ganhos percentuais menores, o que reflete um ritmo mais estável de evolução de desempenho nas gerações mais recentes.

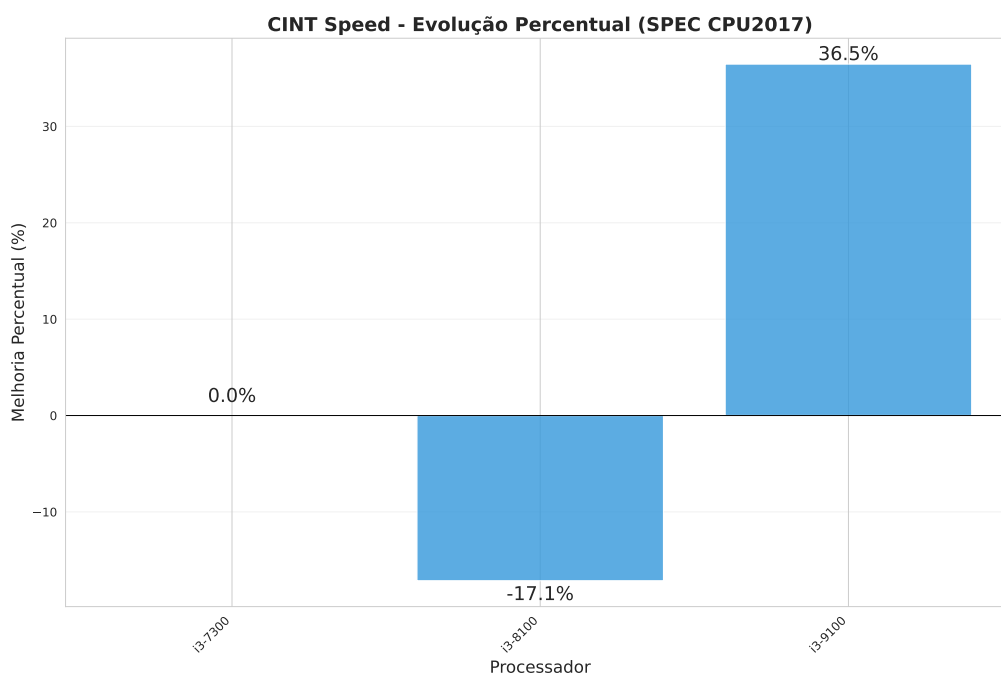


Figura 7. Evolução percentual do desempenho no SPEC CPU2017 – CINT SPEED.

A Figura 7 expõe uma anomalia no desempenho *single-thread*: a transição para o i3-8100 (8ª Ger) resultou em uma perda de desempenho de 17,1%. A causa é diretamente visível na Figura 18 (*Clock Base*): o i3-8100 teve uma redução de 10% no *clock* (de 4.0 GHz para 3.6 GHz) em relação ao i3-7300, como parte do *trade-off* da Intel para adicionar mais núcleos. O ganho de 36,5% do i3-9100, apesar do *clock* idêntico (Figura 18), sugere que esta geração se beneficiou de melhorias de *IPC* (otimização *PAO*).

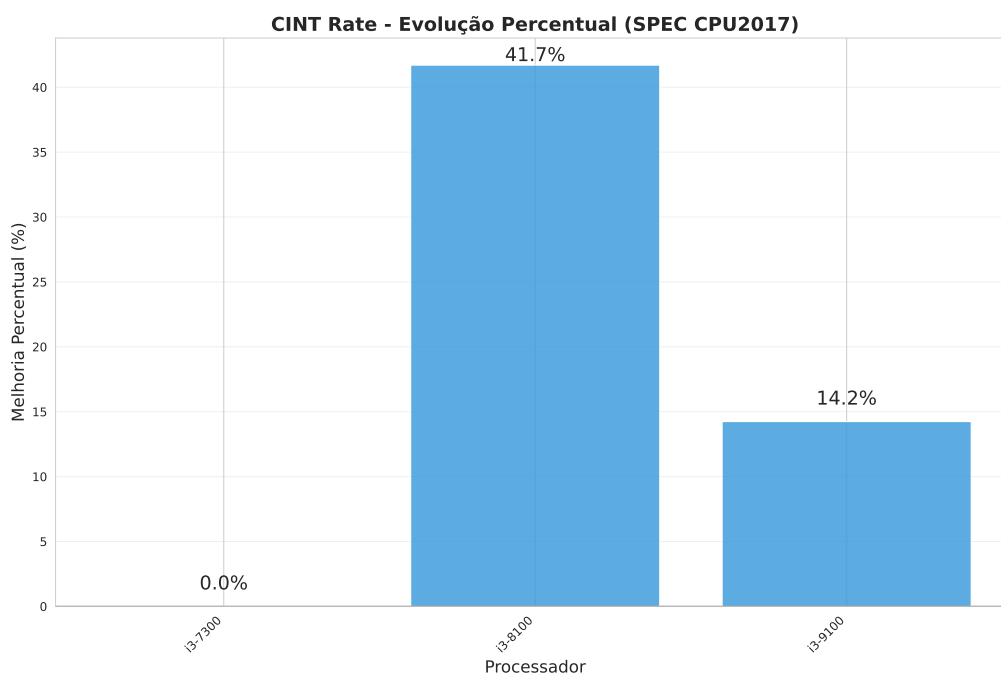


Figura 8. Evolução percentual do desempenho no SPEC CPU2017 – CINT RATE.

A Figura 8 (CINT Rate) mostra o resultado oposto e confirma o *trade-off* da 8ª

Geração. O i3-8100 apresenta um ganho massivo de 41,7% no desempenho *multithread*. Este salto é explicado pela Figura 15 (*Cores e Threads*), que mostra a Intel dobrando o número de núcleos físicos (de 2C/4T para 4C/4T). O ganho de núcleos físicos superou amplamente a penalidade da redução de *clock* (Figura 18). O ganho de 14,2% do i3-9100 representa a otimização (*PAO*) dessa nova arquitetura de 4 núcleos.

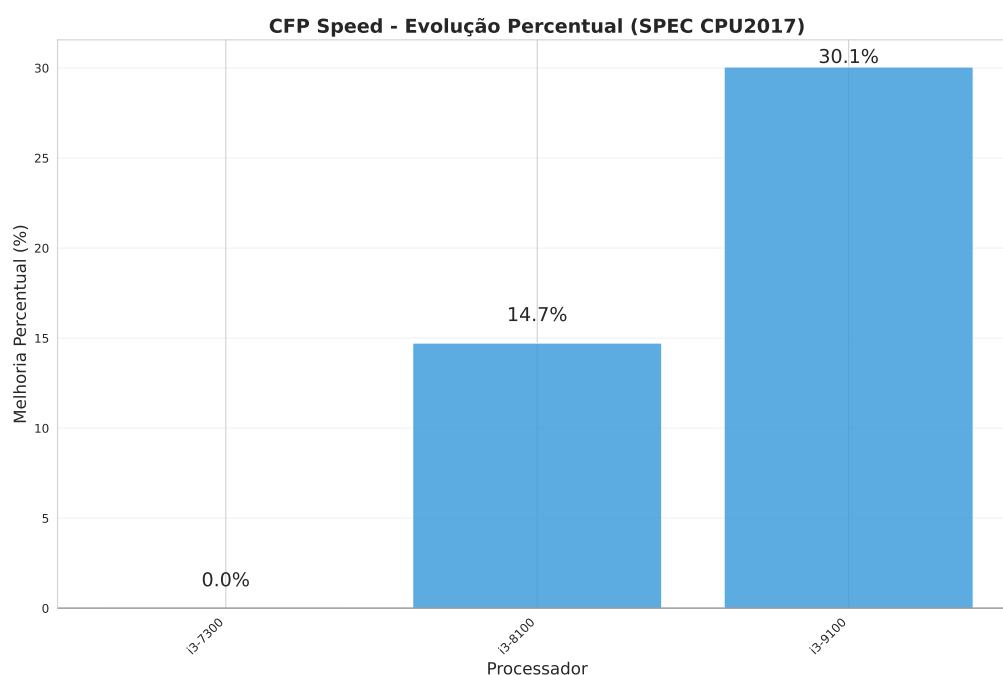


Figura 9. Evolução percentual do desempenho no SPEC CPU2017 – CFP SPEED.

A Figura 9 (CFP Speed) revela que o desempenho de Ponto Flutuante reagiu de forma diferente à 8ª Geração. Ao contrário da perda de 17,1% vista no CINT Speed (Figura 7), o i3-8100 teve um ganho de 14,7% no CFP Speed. Embora o *clock* tenha diminuído (Figura 18), os dados das Figuras 19 e 21 mostram que o i3-8100 se beneficiou de 50% a mais de *Cache L3* (de 4MB para 6MB) e de uma memória *DDR4* mais rápida (2400 MHz). Para esta carga de trabalho, os ganhos de *cache* e memória compensaram a perda de frequência.

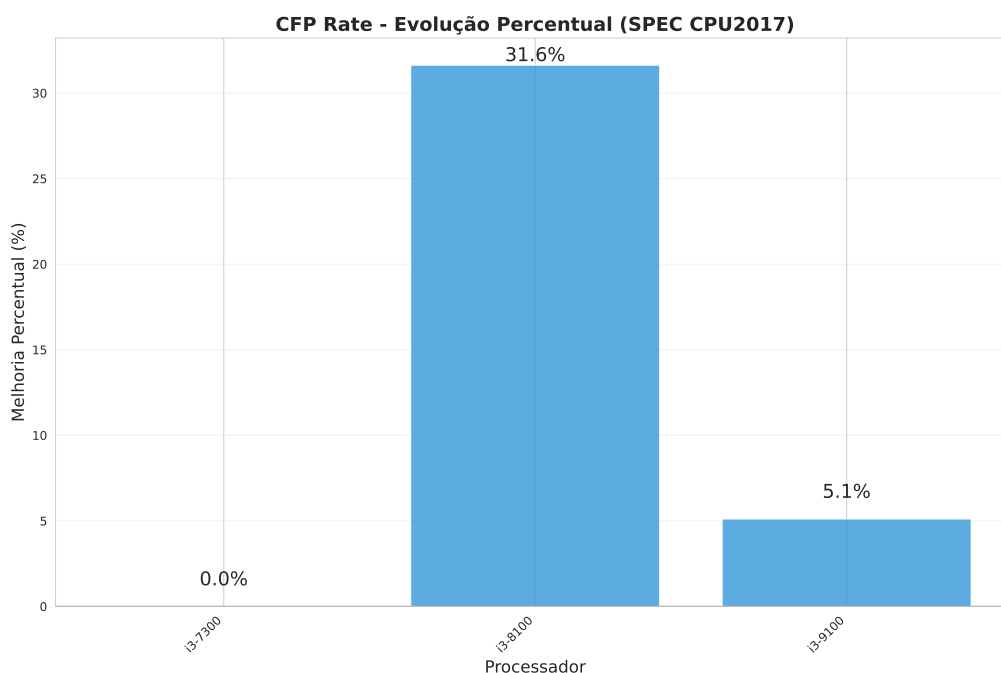


Figura 10. Evolução percentual do desempenho no SPEC CPU2017 – CFP RATE.

Por fim, a Figura 10 (CFP Rate) mostra o resultado combinado das mudanças da 8ª Geração. O i3-8100 teve um ganho robusto de 31,6%, impulsionado pela duplicação de núcleos (Figura 15) e pelo aumento de *Cache* L3 (Figura 19). O ganho subsequente de apenas 5,1% do i3-9100 (9ª Ger) foi o mais baixo do período, indicando que a otimização microarquitetural (*PAO*) entre a 8ª e a 9ª Geração teve um impacto mínimo nesta carga de trabalho específica de Ponto Flutuante paralelo.

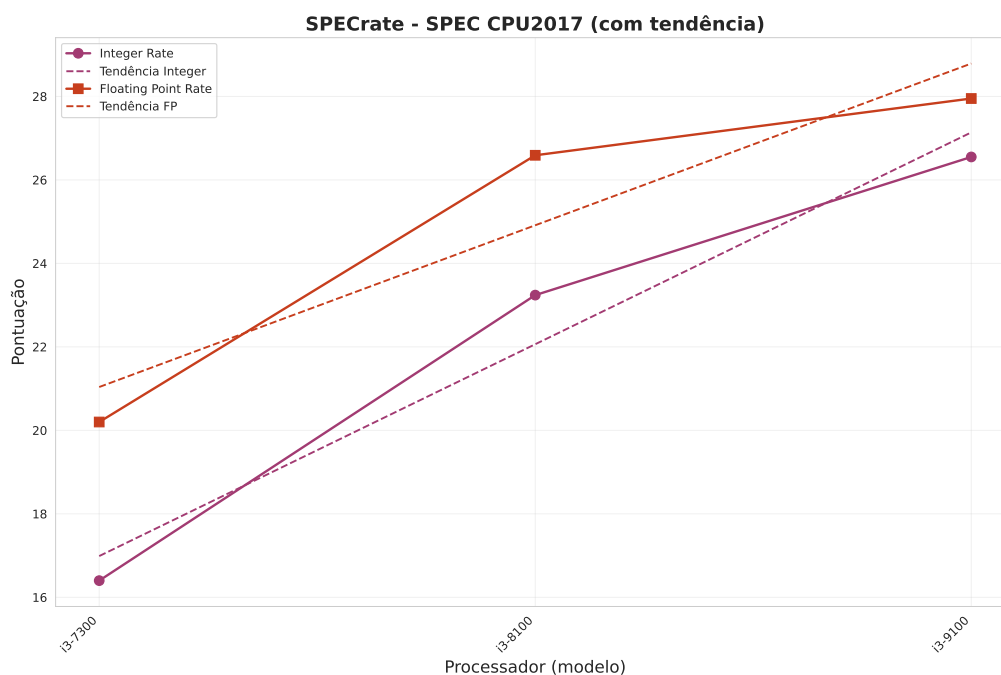


Figura 11. Tendência de desempenho no SPEC CPU2017 (RATE).

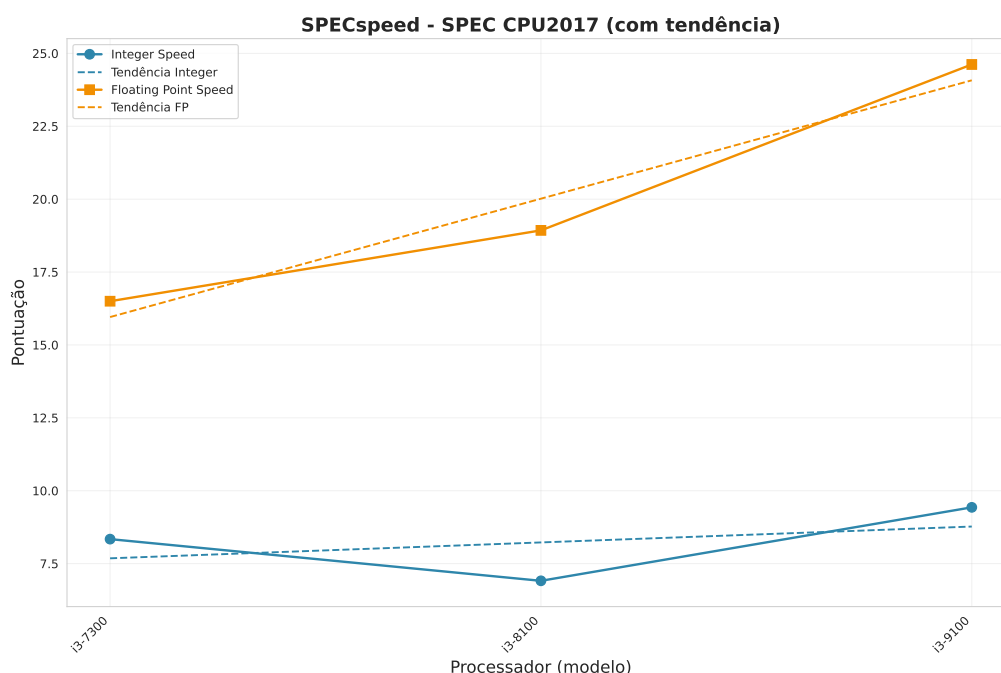


Figura 12. Tendência de desempenho no SPEC CPU2017 (SPEED).

As regressões lineares apresentadas nas Figuras 11 e 12 resumem a tendência de evolução de desempenho no período do SPEC CPU2017 (7ª à 9ª Geração). Ao contrário da suíte SPEC CPU2006, os gráficos revelam um comportamento de *single-thread* (SPEED) e *multithread* (RATE) que divergem drasticamente.

A tendência do **SPECSpeed (Figura 12)** expõe o impacto da 8ª Geração. A linha de tendência do **CINT Speed** (azul) é perfeitamente horizontal; esta estagnação é resultado direto da queda de -17,1% (vista na Figura 7), causada pela redução de *clock*. Ao final do período, o CINT Speed acumulou um ganho de apenas **13,3%** (de 8.3 para 9.4 pontos, conforme Figura 12). Em contrapartida, o **CFP Speed** (laranja), que não sofreu a queda (Figura 12), teve a tendência mais forte de todo o estudo, com um crescimento acumulado de **50,3%** (de 16.5 para 24.8 pontos).

Já a tendência do **SPECrate (Figura 11)** mostra um crescimento forte e quase idêntico para ambas as métricas. Isso foi impulsionado pelo salto de +41,7% no CINT Rate (Figura 8) da 8ª Geração, causado pela **duplicação de núcleos físicos**. O resultado líquido foi um crescimento acumulado de **37,3%** para CINT Rate e **37,9%** para CFP Rate (conforme Figura 11).

Em suma, as linhas de tendência provam quantitativamente que, no final da década, a Intel priorizou o desempenho *multithread* (dobrando núcleos) em detrimento do *single-thread* (reduzindo o clock), resultando em uma estagnação no CINT Speed, mas ganhos robustos no RATE.

4.1.3. Comparativos Gerais

As Figuras 13 e 14 condensam todos os dados de tendência das suítes SPEC, permitindo uma análise aprofundada e uma comparação visual direta do **ritmo de evolução** do

desempenho nos dois períodos do estudo.

Estes gráficos confirmam quantitativamente a tese central deste trabalho: o crescimento de desempenho **desacelerou significativamente** nas gerações mais recentes (2017-2019) em comparação com o período anterior (2010-2016).

No período coberto pelo **SPEC CPU2006** (i3-550 ao i3-7300), as linhas de tendência são visivelmente íngremes. Como calculado nas seções anteriores, este período teve ganhos acumulados robustos, impulsionados por avanços de IPC (“*Tocks*”) e pela introdução da **DDR4**:

- **CINT Rate** (Figura 13, vermelho) cresceu **138,2%**.
- **CFP Rate** (Figura 13, azul escuro) cresceu **187,4%**.
- **CFP Speed** (Figura 14, azul) cresceu **208,0%**, o maior ganho do período.

Em nítido contraste, no período do **SPEC CPU2017** (i3-7300 ao i3-9100), as linhas de tendência são muito mais planas, indicando um ritmo de evolução visivelmente mais lento.

A mudança mais drástica é vista no **CINT Speed** (Figura 14, verde), que **praticamente estagnou com um ganho de apenas 13,3%**. Esta estagnação é o resultado direto da perda de desempenho *single-thread* causada pela redução de *clock* na 8ª Geração (como visto na Figura 7).

As métricas **RATE** (Figura 13, verde e laranja) cresceram cerca de 37%, um ganho impulsionado quase inteiramente pela **duplicação de núcleos físicos** (Figura 15), e não por um ganho de IPC *single-thread*, que já estava em clara desaceleração. A única métrica que manteve um crescimento forte no *single-thread* foi o **CFP Speed** (Figura 14, laranja), com **50,3%**, beneficiando-se das melhorias de *cache* e memória (Figuras 19 e 21).

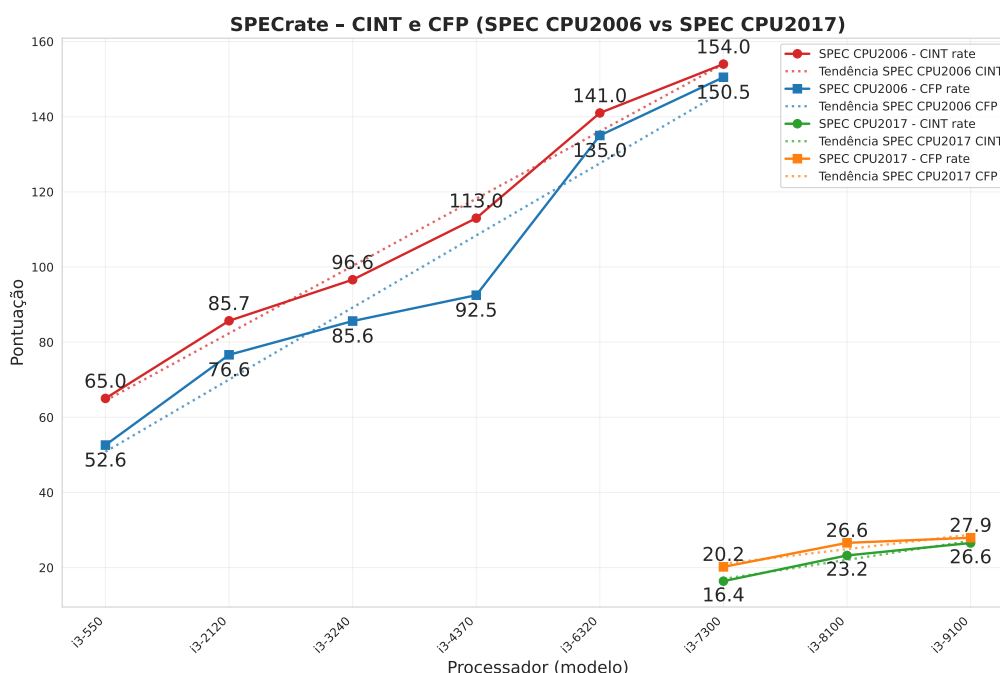


Figura 13. Comparativo de desempenho entre as métricas RATE nas suítes SPEC CPU2006 e CPU2017.

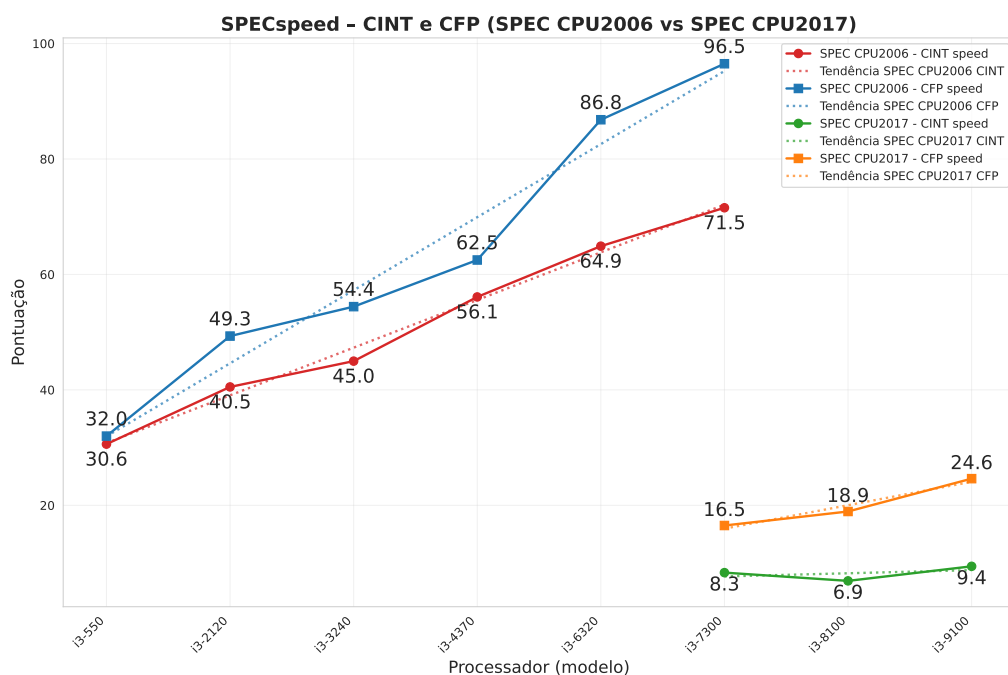


Figura 14. Comparativo de desempenho entre as métricas SPEED nas suítes SPEC CPU2006 e CPU2017.

4.1.4. Resultados das Características Arquiteturais

As Figuras 15 a 21 apresentam a evolução dos principais parâmetros de *hardware* dos processadores Intel Core i3. A análise individual de cada gráfico é fundamental, pois esses dados servem de base para a Discussão (Seção 4.2), permitindo correlacionar as mudanças de *hardware* com os resultados de desempenho observados nos *benchmarks*.

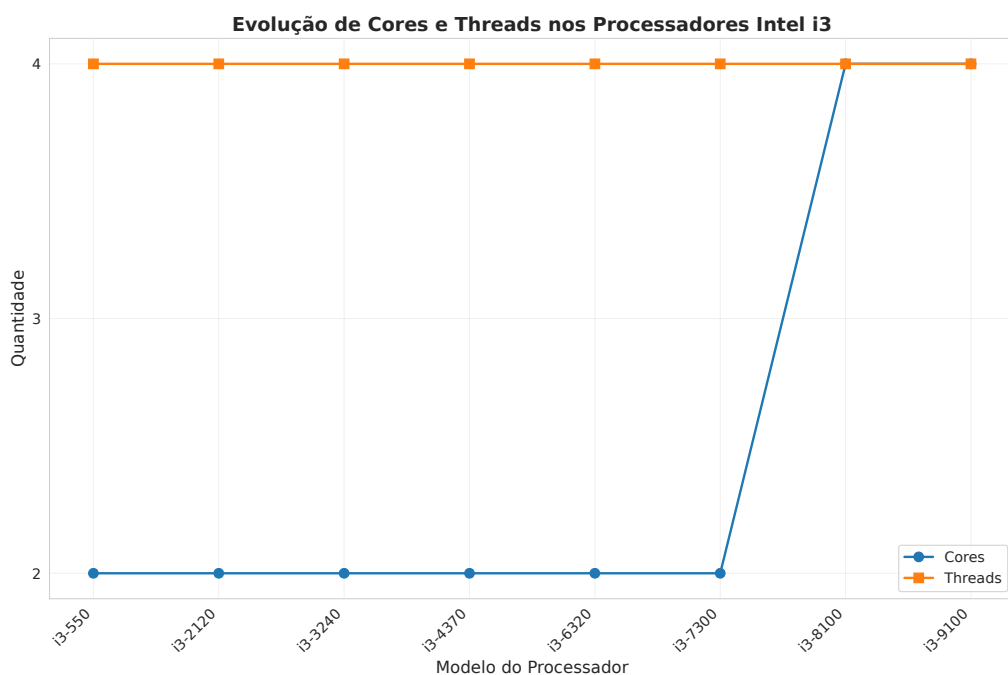


Figura 15. Evolução do número de núcleos e threads dos processadores Intel Core i3.

A Figura 15 ilustra a contagem de núcleos e *threads*. O ponto de maior destaque é a estagnação da linha Core i3 em 2 núcleos e 4 *threads* (2C/4T) por sete gerações, da 1ª (i3-550) à 7ª (i3-7300). A mudança mais significativa ocorre na 8ª Geração (i3-8100), com um salto abrupto para 4 núcleos e 4 *threads* (4C/4T). Esta duplicação de *cores* físicos é um fator crucial para a análise de desempenho paralelo (RATE) nas gerações mais recentes.

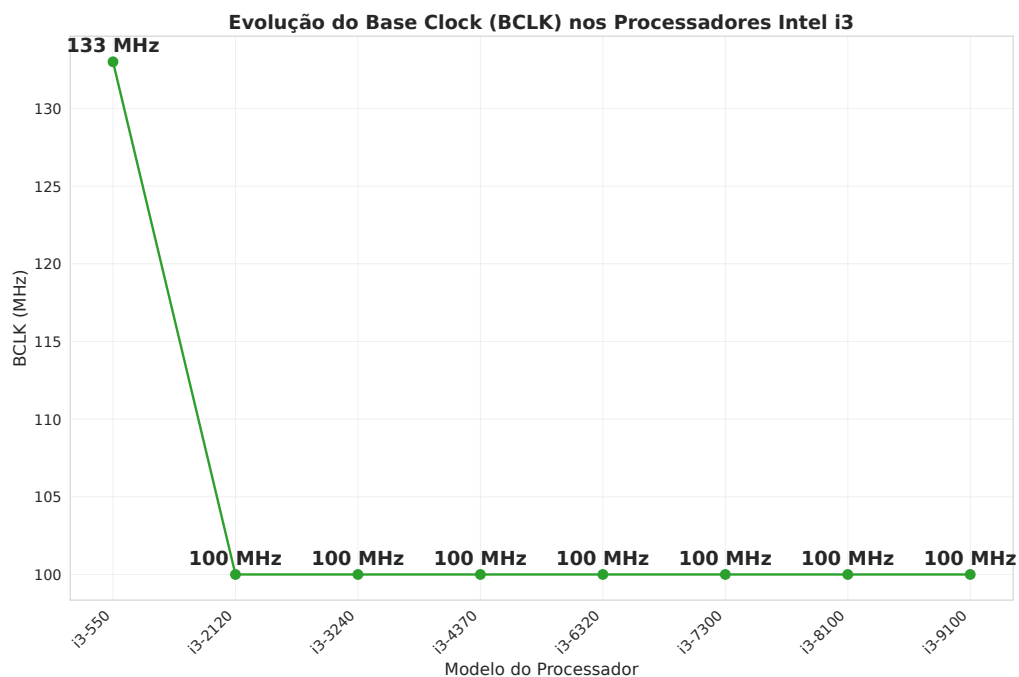


Figura 16. Frequência base (BCLK) utilizada nas diferentes gerações.

A Figura 16 (*Base Clock*) revela uma mudança fundamental de plataforma após a 1ª Geração. O i3-550 utilizava um *BCLK* de 133 MHz. A partir da 2ª Geração (i3-2120), a Intel padronizou a arquitetura em 100 MHz. Esta redução no *BCLK* explica por que o multiplicador (Figura 17) precisou aumentar tanto para atingir a frequência final.

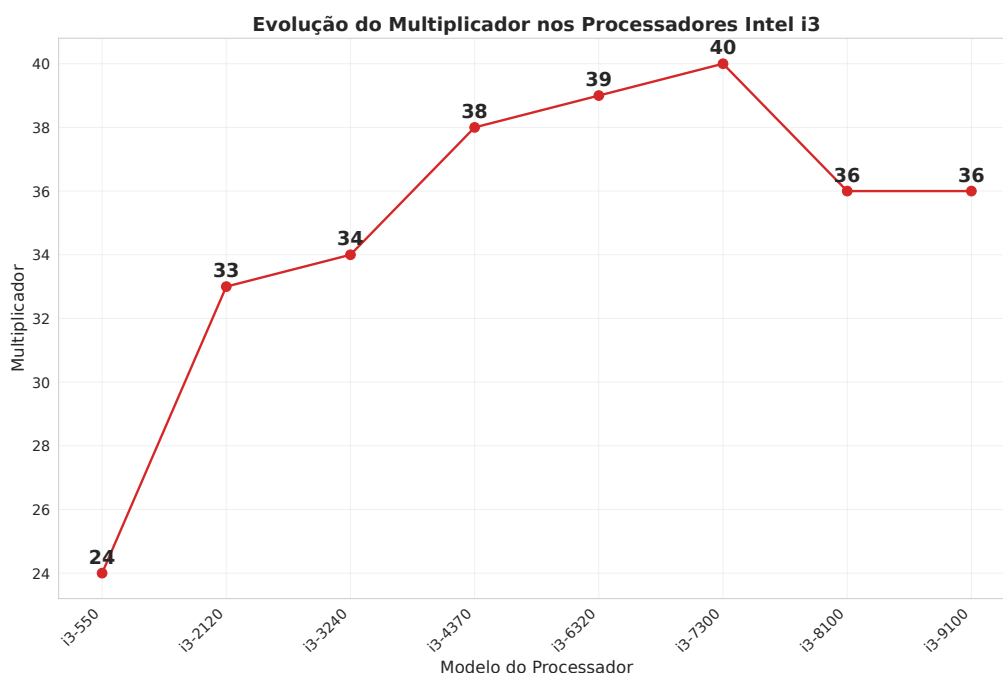


Figura 17. Variação do multiplicador de clock ao longo das gerações.

A Figura 17 mostra a evolução do multiplicador de *clock*. O gráfico apresenta um salto acentuado da 1ª Geração (24x) para a 2ª (33x). Este aumento, no entanto, deve ser analisado em conjunto com o *BCLK* (Figura 16), pois a frequência final (Figura 18) é o produto de ambos.

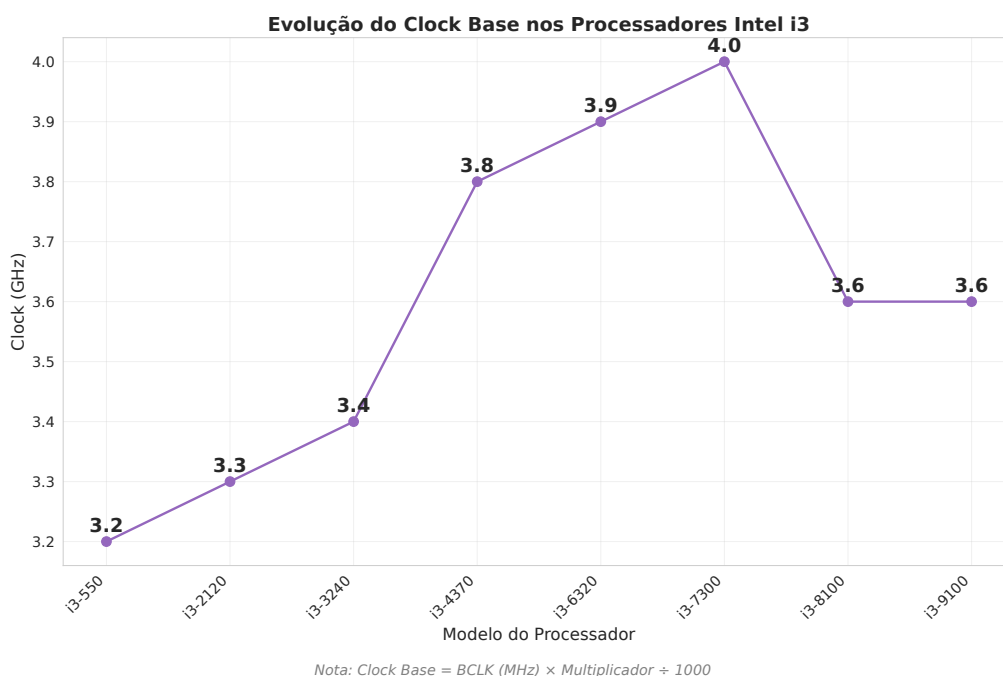


Figura 18. Frequência base de operação dos processadores Intel Core i3.

A Figura 18 mostra a trajetória da frequência base. O *clock* evoluiu de 3.2 GHz (i3-550) até atingir seu pico de 4.0 GHz na 7ª Geração (i3-7300). Notavelmente, essa tendência de alta é revertida na 8ª Geração (i3-8100), que apresenta uma redução de

clock para 3.6 GHz. Essa queda coincide com o aumento de núcleos (Figura 15) e é fundamental para explicar a anomalia no desempenho *single-thread* (SPEED) na suíte SPEC CPU2017.

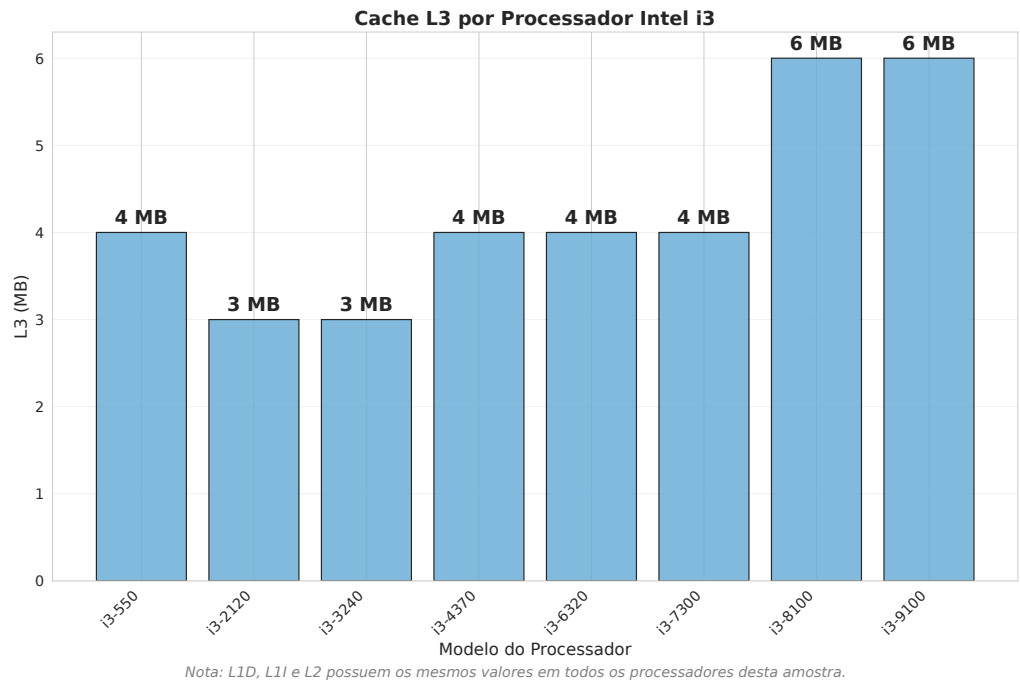


Figura 19. Tamanho da cache L3 (em MB) ao longo das gerações.

A Figura 19 (*Cache L3*) mostra que o tamanho do *cache L3* oscilou entre 3 MB e 4 MB durante as sete primeiras gerações. A mudança mais relevante, assim como nos núcleos, ocorre na 8ª Geração (i3-8100), onde o *cache L3* sofre um aumento de 50%, saltando de 4 MB para 6 MB.

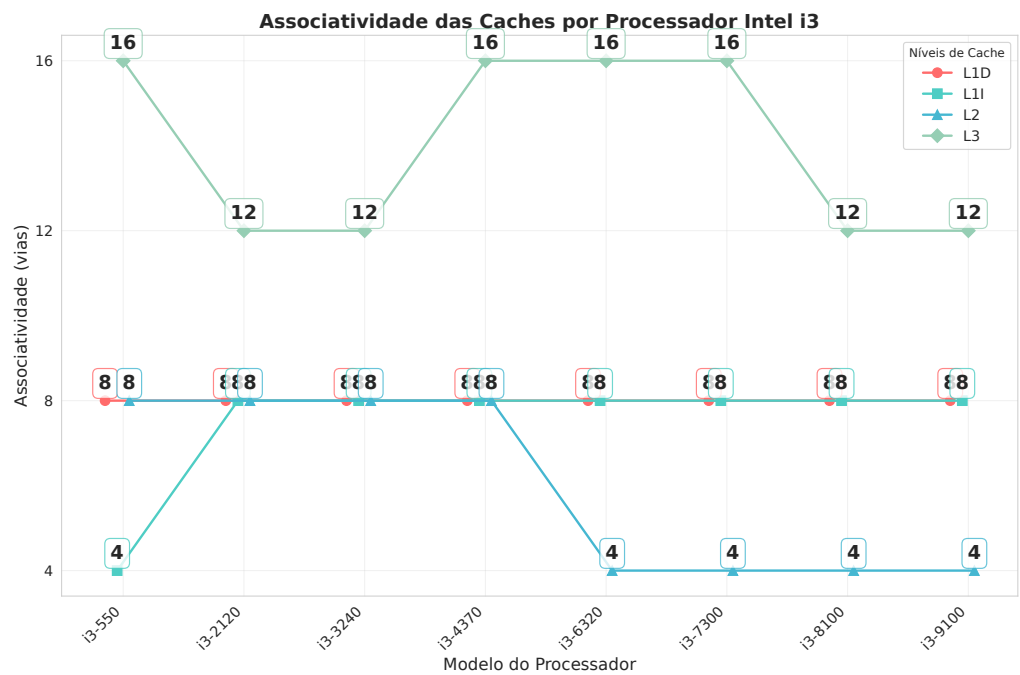


Figura 20. Associatividade das caches (L1, L2 e L3) em diferentes gerações.

A Figura 20 (Associatividade das *Caches*) revela que, enquanto a associatividade L1 e L2 (8-way) permaneceu estável a partir da 2ª Geração, a associatividade do *Cache* L3 (linha cinza) foi mais volátil, alternando entre 16 vias (ex: i3-550, i3-6320) e 12 vias (ex: i3-2120, i3-8100).

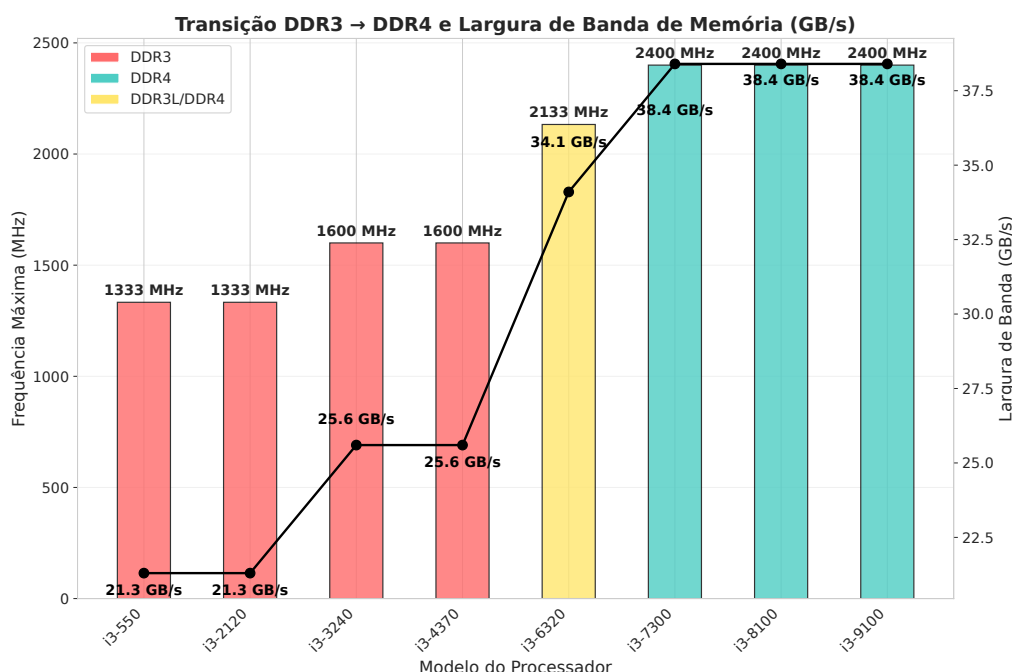


Figura 21. Transição entre gerações de memória DDR e respectivas larguras de banda.

Finalmente, a Figura 21 (Transição *DDR*) ilustra a evolução da memória principal e sua largura de banda teórica. O principal ponto de inflexão ocorre na 6ª Geração (i3-6320, Skylake), com a transição da memória *DDR3* para a *DDR4*. Esta mudança resultou em um salto de +33% na largura de banda, de 25.6 GB/s (*DDR3*-1600) para 34.1 GB/s (*DDR4*-2133). A largura de banda continuou a crescer para 38.4 GB/s na 8ª Geração, tornando-se um fator chave para explicar o desempenho em testes *multithread* (RATE).

4.2. Discussão

A análise conjunta dos resultados obtidos permite compreender o ritmo da evolução de desempenho dos processadores Intel Core i3 no período de 2010 a 2019. Os dados revelam que o ritmo não foi “constante” ou “moderado”, mas sim caracterizado por **duas fases distintas**: uma primeira fase (2010-2016) impulsionada por ganhos de IPC e memória, e uma segunda fase (2017-2019) marcada por uma mudança abrupta para o paralelismo (aumento de núcleos).

Na primeira fase, analisada pela suíte **SPEC CPU2006** (Figuras 1-6), o desempenho foi ditado por avanços microarquiteturais. O salto de 32,4% no CINT Speed (Figura 1) do i3-2120 (2ª Ger), por exemplo, não encontra justificativa nas especificações de *Clock* (Figura 18) ou Núcleos (Figura 15), mas sim nas melhorias de IPC do “*Tock*” (Tabela 1). Além disso, a Figura 4 (CFP Rate) expõe uma volatilidade extrema, com um pico de 45,9% no i3-6320 (6ª Ger) explicado pela introdução da **DDR4**, que aumentou a largura de banda em 33% (Figura 21).

Em contraste, a segunda fase, analisada pelo **SPEC CPU2017** (Figuras 7-12), mostra uma clara mudança de estratégia da Intel. O desempenho *single-thread* (SPEED) foi sacrificado em favor do *multithread* (RATE). Isso é comprovado pela Figura 18, que mostra uma **redução de 10% no clock** (de 4.0 para 3.6 GHz) na 8ª Geração, causando a perda de desempenho de -17,1% no CINT Speed (Figura 7).

Esta redução de *clock* foi o *trade-off* necessário para a mudança mais importante do período: a **duplicação de núcleos físicos** de 2 para 4 (Figura 15) na 8ª Geração. O impacto desta decisão é o cerne da análise do SPEC CPU2017:

- O CINT Rate (Figura 8) teve um ganho massivo de **41,7%**, provando que o ganho de núcleos superou a perda de *clock*.
- O CFP Speed (Figura 9) não sofreu como o CINT Speed (teve ganho de 14,7%), pois foi compensado pelo aumento de **50% no Cache L3** (Figura 19), que saltou de 4 MB para 6 MB.

De modo geral, os resultados confirmam que o aumento no número de núcleos e *threads* (Figura 15), aliado à expansão das memórias *cache* (Figura 19) e à adoção de padrões *DDR* mais rápidos (Figura 21), contribuiu para os ganhos observados. As frequências base (Figura 18), por outro lado, apresentaram variações e até reduções, reforçando que o desempenho evoluiu mais por aprimoramentos estruturais do que por simples elevação de *clock*.

5. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo analisar o ritmo da evolução de desempenho dos processadores Intel Core i3 entre os anos de 2010 e 2019, buscando compreender de que forma as mudanças arquiteturais influenciaram os resultados obtidos em *benchmarks* padronizados.

A partir da análise dos dados das suítes SPEC CPU2006 e SPEC CPU2017, conclui-se que o ritmo de evolução **não foi gradual nem constante**, mas sim **volátil e dividido em duas fases distintas**. A evolução não foi “moderada”, mas apresentou saltos abruptos, como os ganhos de **30% a 54%** impulsionados pela microarquitetura Sandy Bridge (2ª Ger), e quedas de desempenho, como a de **-17,1%** no CINT Speed (SPEC CPU2017) na 8ª Geração.

Assim, ao responder à pergunta central deste trabalho — *Como foi o ritmo da evolução de desempenho dos processadores Intel entre os anos de 2010 e 2019?* — a conclusão é que o ritmo foi impulsionado por uma **série de gargalos e rupturas tecnológicas**:

- **Avanços Microarquiteturais (IPC):** A primeira fase foi definida por avanços de IPC (“*Tock*”), como o salto de 32,4% no CINT Speed do i3-2120, que não foi justificado por *Clock* ou *Cache*.
- **Gargalo de Memória:** A evolução foi limitada pela largura de banda da *DDR3* (como visto no ganho de apenas 8,0% no CFP Rate do i3-4370), e “liberada” pela introdução da *DDR4* na 6ª Geração (Skylake), que causou o pico de 45,9% no CFP Rate.
- **Ruptura na Litografia:** O período viu a transição tecnológica de 32nm para 14nm (Tabela 1). No entanto, a estagnação no processo de 14 nm (o ciclo *PAO*) a partir de 2015 coincidiu com a desaceleração dos ganhos de *single-thread* (IPC).

- **Mudança para Paralelismo:** Em resposta à estagnação do 14nm e à pressão competitiva, a Intel mudou sua prioridade. Na 8ª Geração, sacrificou o desempenho *single-thread* (reduzindo o *clock* em 10%) para **dobrar os núcleos físicos** (de 2 para 4), resultando em um ganho massivo de 41,7% no CINT Rate.

O ganho de desempenho, portanto, não ocorreu por aumentos de *clock* (que se mantiveram estáveis ou diminuíram), mas sim por melhorias estruturais focadas em diferentes gargalos em momentos distintos: primeiro o IPC, depois a largura de banda de memória e, finalmente, o paralelismo (contagem de núcleos).

Como continuidade, futuros trabalhos podem expandir a análise para outras famílias de processadores (como Core i5 e i7), ou incluir métricas adicionais relacionadas à eficiência energética e desempenho por watt, permitindo uma visão mais abrangente sobre a evolução tecnológica da linha Intel Core.

Referências

- [1] Anthropic. Claude. <https://claude.ai>, 2023. Acesso em: 21 out. 2025.
- [2] Cutress, Ian. The Intel Skylake Review: Core i7-6700K and i5-6600K Tested. <https://www.anandtech.com/show/9483/intel-skylake-review-6700k-6600k-ddr4-ddr3-ipc-6th-generation/>, 2015. Acesso em: 21 out. 2025.
- [3] HWCooling.net. 14nm forever jokes coming true: Intel goes back to decade old tech. <https://www.hwcooling.net/en/14nm-forever-jokes-coming-true-intel-goes-back-to-decade-old-tech/>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [4] Intel. Intel Unveils World's Best Processor. <https://web.archive.org/web/20070403081121/http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/20060727comp.htm?cid=rss-83642-c1-135841>, 2006. Acesso em: 21 out. 2025.
- [5] Intel. Intel Unveils All New 2010 Intel® Core™ Processor Family. https://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2010/20100107comp_sm.htm, 2010. Lançamento oficial da família Intel Core de 2010, estabelecendo novos padrões de desempenho inteligente e eficiência energética. Acesso em: 01 dez. 2025.
- [6] Intel. Especificações do produto: Processador intel® core™ i3-8100. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/126688/intel-core-i38100-processor-6m-cache-3-60-ghz/specifications.html>, 2017. Acesso em: 21 out. 2025.
- [7] OpenBenchmarking.org. Benchmark Test Profiles - OpenBenchmarking.org. <https://openbenchmarking.org/tests>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [8] OpenBenchmarking.org. Official Test Suites - OpenBenchmarking.org. <https://openbenchmarking.org/suites>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [9] OpenBenchmarking.org. OpenBenchmarking.org Corporate Info, Upload Firewall. <https://openbenchmarking.org/corporate>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.

- [10] OpenBenchmarking.org. OpenBenchmarking.org Features. <https://openbenchmarking.org/features>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [11] David A. Patterson and John L. Hennessy. *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. Morgan Kaufmann, Waltham, MA, 6th edition, 2018. Arquitetura de Computadores - Uma Abordagem Quantitativa.
- [12] Phoronix Test Suite. Phoronix Test Suite - Linux Testing & Benchmarking Platform, Automated Testing, Open-Source Benchmarking. <https://www.phoronix-test-suite.com/>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [13] Puget Systems. Haswell vs. Skylake-S: i7 4790K vs i7 6700K. <https://www.pugetsystems.com/labs/articles/haswell-vs-skylake-s-i7-4790k-vs-i7-6700k-641/>, 2015. Acesso em: 21 out. 2025.
- [14] Quora. Are AMD processors beating Intel in 2019? <https://www.quora.com/Are-AMD-processors-beating-Intel-in-2019>, 2019. Acesso em: 21 out. 2025.
- [15] Sexton, Michael Justin Allen. The History Of Intel CPUs: Updated! (Page 3). <https://www.tomshardware.com/picturestory/710-history-of-intel-cpus-3.html>, 2018. Acesso em: 21 out. 2025.
- [16] Sexton, Michael Justin Allen. The History Of Intel CPUs: Updated! (Page 4). <https://www.tomshardware.com/picturestory/710-history-of-intel-cpus-4.html>, 2018. Acesso em: 21 out. 2025.
- [17] Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC). SPEC CPU®2017 Overview / What's New? <https://www.spec.org/cpu2017/Docs/overview.html>, 2017. Acesso em: 21 out. 2025.
- [18] Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC). SPEC Benchmark Results and Data Repository. <https://spec.org/cgi-bin/osgresults>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [19] Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC). SPEC CPU® 2006 Results. <https://spec.org/cpu2006/results/>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [20] Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC). SPEC CPU® 2017 benchmark. <https://spec.org/cpu2017/>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [21] Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC). SPEC CPU® 2017 Results. <https://spec.org/cpu2017/results/>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [22] Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC). SPEC Frequently Asked Questions. <https://spec.org/spec/faq/>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [23] Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC). SPEC: The Standard Performance Evaluation Corporation. <https://spec.org/spec/>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [24] TechPowerUp. Intel core coffee lake lineup specs confirmed in leaked distributor event. <https://www.techpowerup.com/236222/>

intel-core-coffee-lake-lineup-specs-confirmed-in-leaked-distributor
2017. Acesso em: 21 out. 2025.

- [25] Tom's Hardware. Intel's 10nm Is Broken, Delayed Until 2019. <https://www.tomshardware.com/news/intel-cpu-10nm-earnings-amd,36967.html>, 2018. Acesso em: 21 out. 2025.
- [26] Value Smart Trading Limited. The Evolution of Ryzen CPUs from First-Gen to Today. <https://vstl.info/the-evolution-of-ryzen-cpu/>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [27] WikiChip. Core i3 - intel. https://en.wikichip.org/wiki/intel/core_i3, 2025. Acesso em: 21 de outubro de 2025.
- [28] WikiChip. Process-architecture-optimization model. <https://en.wikichip.org/wiki/intel/process-architecture-optimization>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [29] Wikipedia. Intel core 2. https://pt.wikipedia.org/wiki/Intel_Core_2, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [30] Wikipedia. Pentium d. https://pt.wikipedia.org/wiki/Pentium_D, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.
- [31] Wikipedia. Ryzen - Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Ryzen>, 2025. Acesso em: 21 out. 2025.