

Evolução dos Processadores

Comparação das Famílias de Processadores Intel e AMD

Rafael Bruno Almeida
Instituto de Computação
Unicamp
rafaelbruno82@gmail.com

RESUMO

Em 1965 um dos fundadores da Intel, Gordon Moore, publicou um artigo sobre o aumento da capacidade de processamento dos computadores. Seu conteúdo ficou conhecido como a *Lei de Moore*. Desde que essa lei veio a público, todos os fabricantes de microprocessadores se sentiram na obrigação de dobrar a capacidade de processamento dos seus processadores a cada 18 meses, dando início à corrida pelo desempenho. Este artigo fornece um estudo sobre a história evolutiva dos processadores, comparando os modelos criados por dois dos maiores fabricantes, desde as primeiras gerações de processadores até as mais recentes tecnologias.

Palavras chave

processadores, evolução, Intel, AMD

1. INTRODUÇÃO

A criação do transistor anunciou que uma nova era da eletrônica estava surgindo. Comparado às válvulas termoiônicas, tecnologia dominante até o momento, o transistor provou ser significativamente mais confiável, necessitando de menos energia e, o mais importante, podendo ser miniaturizado a níveis quase microscópicos. [8] O primeiro transistor construído media aproximadamente 1,5cm e não era feito de silício, mas de germânio e ouro. Hoje eles chegam a medir até 45nm (nanômetros), cerca de 330.000 vezes menores. O primeiro microchip comercial foi lançado pela Intel em 1971 e batizado de Intel4004. Ele era um processador de 4 bits possuindo pouco mais de 2000 transistores. Desde então, a Intel se lançou inteiramente no caminho dos microprocessadores e se tornou a maior responsável pelas tecnologias utilizadas atualmente. Até 1978, a AMD desenvolvia suas próprias soluções e projetos proprietários, mas também licenciava e construía chips baseados na tecnologia de outras empresas, chegando inclusive a produzir chips para a Intel. Em 1978 a AMD obteve licença para produzir hardware construído de acordo com a especificação x86, incluindo direitos de produzir processadores 286 e derivados do 286.[1]

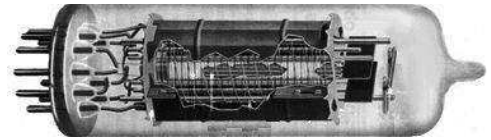


Figura 1: Válvula termoiônica.

Para ganhar popularidade nesse mercado onde poucos tinham sucesso, a AMD investiu em um mercado de baixo custo, onde se tornou referência.

Em 1990, o lançamento do Windows® 3.0 iniciou uma nova era na computação pessoal, acirrando ainda mais a disputa entre os diversos fabricantes de microprocessadores pela liderança do mercado.[1]

Este artigo trata da história evolutiva dos processadores comparando os modelos fabricados por duas das maiores e mais importantes indústrias de componentes eletrônicos para computadores. Da década de 70 até hoje os processadores estiveram em constante e rápida evolução, e com certeza os dados contidos neste artigo estarão desatualizados em pouco tempo.

No item 2 será introduzido um resumo dos fatos que possibilitaram a criação dos processadores. O item 3 traz uma comparação na linha do tempo entre as diversas versões de processadores lançados pela Intel e AMD, desde o lançamento do Intel4004 em 1971 até os Multi Cores de hoje.

2. HISTÓRIA

O componente básico de um processador é o transistor, e é exatamente o avanço na tecnologia de fabricação destes componentes que possibilitou a grandiosa evolução dos processadores. No século XIX, antes da invenção do transistor, outras tecnologias foram utilizadas com o intuito de criar um equipamento para fazer cálculos matemáticos com rapidez. O surgimento dos relés, dispositivos eletro-mecânicos que utilizam um magneto móvel entre dois contatos metálicos, possibilitou uma primeira tentativa de se criar este equipamento. Entretanto, seu alto custo, grandes dimensões e lentidão o tornavam pouco viáveis.

Na primeira metade do século XX surgem as válvulas termoiônicas, que baseavam-se no princípio termoiônico, utilizando um fluxo de elétrons no vácuo. Esses equipamentos (ver figura 1) possibilitaram a criação dos primeiros com-



Figura 2: Processador Intel4004™.

putadores, como o conhecido *ENIAC* (*Electronic Numerical Integrator Analyzer and Computer*), composto por cerca de 18 mil válvulas e capaz de processar 5000 adições, 357 multiplicações e 38 divisões por segundo. Ele foi utilizado para propósitos militares em cálculos de trajetórias de mísseis e codificação de mensagens secretas, porém eram extremamente caros e consumiam muita energia e muito espaço.

O primeiro transistor foi criado em Dezembro de 1947 pelos pesquisadores da empresa *Bell Laboratory* anunciando uma nova era da eletrônica de estado sólido. Esta invenção surgiu para substituir as válvulas, pois consumiam uma ínfima quantidade de energia e realizavam a mesma tarefa em muito menos tempo. [8] Os transistores eram feitos de germânio, um semicondutor metálico, porém na década de 50 se descobriu que o silício oferecia uma série de vantagens sobre o germânio. Em 1955, transistores de silício já eram comercializados.

Pouco tempo depois passaram a utilizar a técnica de litografia óptica, que faz uso da luz, máscaras e alguns produtos químicos para esculpir o silício na fabricação do transistor permitindo alcançar níveis incríveis de miniaturização e possibilitando o surgimento do circuito integrado, que são vários transistores dentro do mesmo encapsulamento formando um sistema lógico complexo. A invenção do circuito integrado se mantém historicamente como uma das inovações mais importantes da humanidade. Quase todos os produtos modernos utilizam essa tecnologia. [8]

3. EVOLUÇÃO

Em 14 de abril de 1965 o fundador da Intel, Gordon Moore, publicou na revista *Electronics Magazine* um artigo sobre o aumento da capacidade de processamento dos computadores. Moore afirma no artigo [5] que essa capacidade dobraria a cada 18 meses e que o crescimento seria constante. Essa teoria ficou conhecida como a “*Lei de Moore*” e se mantém válida até os dias de hoje.

3.1 1971

O primeiro microchip comercial produzido no mundo foi o Intel 4004™, figura 2, que foi desenvolvido para ser utilizado por uma empresa de calculadoras portáteis, a Japonesa *Busicom*. Até então, os dispositivos eletrônicos possuíam diversos chips separados para controle de teclado, display, impressora e outras funções, já o Intel 4004™ continha todas essas funcionalidades em um único chip. Por esse e outros motivos ele é considerado o primeiro processador do mundo.

Com uma CPU de 4 bits e cerca de 2300 transistores, tinha tanto poder de processamento quanto o *ENIAC*, que

ocupava mais de 900m³ com suas 18.000 válvulas.

3.2 1973

Em 1973 a Intel lança seu novo processador, o Intel 8008™, que possuía uma CPU de 8 bits implementada sobre as tecnologias TTL MSI e com aproximadamente 3.500 transistores. Sua nomenclatura foi definida com base no marketing, por ser o dobro do Intel 4004™. [3]

3.3 1974

Menos de um ano depois do lançamento do Intel 8008™, em 1974, a Intel lança o primeiro processador voltado para computadores pessoais. O Intel 8080™, com 4.800 transistores, herdava várias características do seu predecessor Intel 8008™, possuindo também uma CPU de 8 bits, porém, com uma frequência de operação maior, era capaz de executar 290.000 operações por segundo, oferecendo um performance cerca de 10 vezes maior que seu predecessor. Ele foi considerado o primeiro processador do mundo verdadeiramente de propósito geral. Enquanto o Intel 4004™ e o Intel 8008™ usavam a tecnologia P-channel MOS, o Intel 8080™ inovou com a utilização de um processo N-channel, resultando em maiores ganhos de velocidade, consumo de energia, densidade do projeto e capacidade de processamento. [3]

3.4 1978

Após o grande sucesso do processador Intel 8080™, que tornou viável a comercialização de computadores pessoais, a Intel investe em pesquisas para produzir o seu primeiro processador com uma CPU de 16 bits. Em 1978, o Intel 8086™ é lançado, contendo 29.000 transistores, sua performance era 10 vezes maior que o Intel 8080™, com frequência de 8MHz. [3]

Foi por volta de 1978 que a AMD surge no mercado de microprocessadores, conseguindo a licença para produzir hardware construído de acordo com a especificação dos processadores x86, incluindo direitos de produzir o hardware 286 e derivado do 286. Deste ano em diante a Intel passa a ter que dividir seu mercado com uma grande concorrente. [1]

3.5 1979

O Intel 8086™ foi seguido em 1979 pelo Intel 8088™, uma versão do 8086 com barramento de 8 bits. As encomendas para os novos chips crescia constantemente, mas uma poderosa concorrente desenvolveu um processador que possuía vantagens em diversos pontos chave do seu design. Foi então que a Intel lançou uma campanha para fazer da arquitetura 8086/8088 o padrão da indústria de computadores. [3] A escolha do Intel 8088 como a arquitetura do primeiro computador pessoal da IBM foi uma grande ajuda para a Intel. A estratégia da IBM era criar um padrão “aberto” de sistema computacional baseado no modelo de microprocessador da Intel. Esse padrão aberto é capaz de fornecer uma transição fácil à geração seguinte de microprocessadores, existindo assim a compatibilidade de softwares entre as gerações diferentes de microprocessadores. Isso fez com que a Intel conseguisse consolidar a especificação da arquitetura 8086/8088 como o padrão mundial de 16 bits. [3]

3.6 1982

A próxima geração da família Intel 8086TM inicia em 1982 com o lançamento do novo processador de 16 bits, o Intel 80286TM, mais conhecido como Intel 286TM. Ele possuía 134.000 transistores e estava tecnologicamente muito distante dos anteriores, com uma frequência máxima de 12 MHz. Porém, manteve a compatibilidade com os softwares criados para seus predecessores. Visando satisfazer as necessidades do mercado de processadores de 16-bits, que estava mais exigente quanto ao desempenho para gerenciar, desde redes de locais até dispositivos gráficos coloridos, o Intel 286TM era multitarefa e possuía uma função de segurança embutida que garantia a proteção dos dados. [3]

Neste mesmo ano a AMD consegue terminar e lançar seu processador baseado no Intel 286TM, o Am286[®]. Como ela implementava microprocessadores baseados em tecnologias criadas pela Intel, a AMD estava sempre um passo atrás de sua concorrente. Porém, o Am286[®] possuía alguns recursos interessantes que o Intel 286TM não era capaz de fazer. Ele tinha um emulador EMS (Expanded Memory Specification) e a capacidade de sair do modo de proteção. Ele era formado por 134.000 transistores e com frequência máxima de 16MHz. [1]

3.7 1985

Em 1985, após uma grande crise mundial da indústria de semicondutores e do mercado de eletrônicos, a Intel lança a grande inovação da década, o processador de 32 bits. Com 275.000 transistores, o Intel 386TM operava a uma velocidade máxima de 5 milhões de instruções por segundo (MIPS) e frequência de 33MHz. [3]

Em sequência, a AMD lança o Am386[®], sua versão do Intel 386TM, que possuía 275.000 transistores, frequência máxima de 40 Mhz e uma CPU de 32 bits. [1]

3.8 1988

Apesar do Intel 386TM ter sido uma grande revolução na indústria de microprocessadores, ele era voltado para usuários comerciais – muito poderoso, e caro, para o usuário comum. Por esse motivo a Intel lança em 1988 o Intel 386SXTM, chamado de “386 Lite”. Esse processador representa a adição de um novo nível na família Intel 386TM, com preço mais competitivo e, ao mesmo tempo, capaz de processar de 2,5 a 3 MIPS, sendo um upgrade natural ao Intel 286TM. Ele também possuía uma vantagem distinta, podia rodar softwares de 32 bits. [3] Os processadores de 32 bits colocam a *Lei de Moore* [5] novamente em evidência, acelerando ainda mais a corrida contra o tempo pela miniaturização dos transistores.

A exemplo da Intel, a AMD lança uma versão mais acessível aos usuários domésticos. [1]

3.9 1989

Em 1989, é lançada uma nova família de processadores. O Intel 486TM possuía 1.200.000 transistores e foi o primeiro com um coprocessador matemático integrado e cache L1. Ele trabalhava a uma frequência máxima de 50MHz.

Como o Intel 486TM, o Am486[®] da AMD é construído com um coprocessador matemático integrado. Porém, a frequência do seu barramento interno era de 40MHz, fazendo ele



Figura 3: Processador Intel Pentium[®].

ser mais rápido que as primeiras versões do Intel 486TM em diversos benchmarks. Ele proporcionou o início da popularidade da AMD.

3.10 1993

O lançamento do grande astro da Intel se deu em 1993. O Pentium[®] foi um marco na linha do tempo do avanço tecnológico, possuindo cerca de 3.100.000 transistores construídos com a tecnologia CMOS de 0,8 μ m. Em suas primeiras versões, trabalhava a uma frequência de 66MHz e executava cerca de 112 MIPS, posteriormente chegando aos 233MHz. Este processador incluía duas caches de 8Kb no chip e uma unidade de ponto integrada.

Após assistir ao lançamento do Pentium[®], a AMD lança o Am586[®], uma versão melhorada do Am486[®] que mesmo com sua frequência máxima de 150MHz e 1.600.000 transistores não era competitivo ao rival e não foi bem aceito pelos consumidores.

3.11 1995

A Intel investe no mercado de servidores lançando o Pentium[®] PRO. Ele introduziu a novidade da cache L2, rodava a 200MHz e possuía 5,5 milhões de transistores, sendo o primeiro processador a ser produzido com a tecnologia de 0,35 μ m. Neste mesmo ano a AMD decide sair da sombra da Intel e introduz o microprocessador AMD-K5[®], que foi a primeira arquitetura concebida independentemente, porém com software compatível com microprocessador x86.

3.12 1997

A AMD sabia que estava perdendo a batalha contra a gigante Intel e resolveu colocar novas idéias em desenvolvimento, e foi neste momento que souberam que uma empresa de microprocessadores estava vendendo sua tecnologia. Essa empresa possuía um core revolucionário em seu estágio final de desenvolvimento. A conclusão do projeto desse novo core deu origem ao AMD-K6[®], que oferecia um desempenho competitivo em aplicativos comerciais e desktop sem perder desempenho com o cálculo de ponto flutuante, que é uma funcionalidade essencial para os jogos e de algumas tarefas de multimídia. Esse processador possuía a tecnologia Intel[®] MMXTM, que amplia a arquitetura do processador para melhorar seu desempenho de processamento multimídia, comunicação, numérico e de outras aplicações. Essa tecnologia usa um SIMD (single-instruction, multiple-data) técnica para explorar o paralelismo possível em muitos algoritmos, produzindo um desempenho total de 1,5 a 2 vezes mais rápido do que as mesmas aplicações executando no



Figura 4: Processador AMD K6-2[®].

mesmo processador sem MMX. [7]

O AMD-K6 foi o processador mais rápido por alguns meses, mas a Intel já havia desenvolvido seu novo processador e tinha depósitos cheios dele, prontos para seu lançamento no final de 1997. É claro que, ao saber do sucesso do K6, a Intel decide antecipar o lançamento do Pentium[®] II.

Seguindo a *Lei de Moore* [5], o crescimento do desempenho dos processadores estava atingindo proporções incríveis, pois o Pentium[®] II possuía 7,5 milhões de transistores produzidos na tecnologia de $0.25\mu\text{m}$ e também incorporava a tecnologia Intel[®] MMX[™]. Foi introduzido também um chip de memória cache de alta velocidade. [4]

3.13 1998

O Intel[®] Pentium II Xeon[®] é concebido para satisfazer os requisitos de desempenho de médios e grandes servidores e estações de trabalho. Consistente na estratégia da Intel para prover, em um único processador, diversos produtos para segmentos de mercados específicos, o Xeon[®] possui características inovadoras e técnicas especificamente concebidas para estações de trabalho e servidores que utilizam aplicações profissionais exigentes, tais como serviços de Internet, armazenamento de dados corporativos, criação de conteúdos digitais e automação eletrônica e mecânica. Sistemas computacionais baseados nesse processador podem ser configurados para utilizar quatro, oito, ou mais processadores.

Neste ano surge o processador AMD-K6[®]-2, que acrescentou suporte para instruções SIMD (Single Instruction Multiple Data) e passou a usar uma forma mais avançada do Soquete 7, agora chamada Super Soquete 7. Esse novo formato acrescentava suporte para um barramento externo de 100 MHz. O AMD-K6-2 400 utilizou uma modificação de um multiplicador anterior, permitindo que ele operasse a 400 MHz mesmo em placas-mãe mais antigas. Operava em até 550MHz e foi o primeiro processador a incorporar a inovadora tecnologia AMD 3DNow![™], que proporciona uma excelente combinação de preço e desempenho, juntamente com um poderoso conjunto de instruções para processamento 3D. [1] O 3DNow![™] é um conjunto de 21 novas instruções projetadas para acabar com tradicional gargalo no tratamento de ponto flutuante e aplicações multimídia. Ele foi criado quando a AMD decidiu projetar do zero as instruções para processamento de ponto flutuante e instruções do MMX para seu novo processador. [6] Logo depois, a AMD acrescentou ao núcleo do K6-2[®] 256 KB de cache L2 incorporado ao die, o que resultou em um aumento significativo da performance.

Esse novo processador foi chamado de AMD-K6-3[®]. [1]

3.14 1999

Em 1999 a AMD toma a liderança na corrida pela performance, lançando o AMDK7[®], ou AMD Athlon[™], o primeiro processador com frequência acima de 1GHz. Com a criação do Athlon, a AMD rompe de vez com a criação de chips compatíveis com os Intel. Os processadores AMD Athlon[™] foram projetados especificamente do zero para executar sistemas Windows com performance excepcional. Eles oferecem várias inovações que os destacam em benchmarks com os produtos equivalentes da Intel e representam a primeira grande vitória da AMD sobre a Intel no mercado. Para substituir a única unidade de FPU sem pipeline do AMD-K6, a AMD criou uma FPU com vários pipelines, capaz de executar várias instruções de ponto flutuante em paralelo. As gerações posteriores introduziram o cache L2 incorporado com o mesmo clock do processador. [1]

Estes processadores possuíam excepcionais 37 milhões de transistores, porém ainda utilizavam a tecnologia de fabricação de $0.25\mu\text{m}$ e geravam muito calor. Pela primeira vez foi cogitado o fim da *Lei de Moore* [5], pois os processadores esbarraram na barreira térmica e ainda não existia tecnologia suficiente para diminuir ainda mais o tamanho dos transistores e conseqüentemente diminuir suas temperaturas.

Como resposta, a Intel lança o Pentium[®] III, que possuía 70 novas instruções, que aumentaram visivelmente o desempenho de gráficos avançados, 3D, streaming de áudio, vídeo e aplicações de reconhecimento de voz. Foi concebido para melhorar significativamente as experiências na Internet, permitindo aos usuários navegar em museus e lojas on-line e fazer download de vídeos de alta qualidade. Suas primeiras versões possuem 9.7 milhões de transistores operando a uma frequência de até 500MHz. Pouco antes, a Intel havia lançado uma nova versão do Pentium[®] II, que chega a 400MHz e foi o primeiro processador produzido com a nova tecnologia de $0.18\mu\text{m}$.

No terceiro trimestre de 2000, o processador AMD Athlon XP incluiu as instruções SSE, e a AMD tornou-se o primeiro fabricante de processadores de uso geral a suportar a memória DDR.

3.15 2000

No ano 2000 as novas tecnologias desenvolvidas, como a fabricação de transistores com fios de $0.18\mu\text{m}$, deram novo folego para a *Lei de Moore* [5] e possibilitaram a criação de processadores muito mais rápidos, com menos consumo de energia e dissipação de calor.

Foi baseado nessa tecnologia de fabricação que a Intel lança o Pentium[®] 4, um dos processadores mais vendidos na história. Com 42 milhões de transistores, suas primeiras versões chegavam a 1,5 Ghz de frequência, possibilitando usar computadores pessoais para edição de vídeos profissionais, assistir filmes pela internet, comunicar-se em tempo real com vídeo e voz, renderizar imagens 3D em tempo real e rodar inúmeras aplicações multimídia simultaneamente, enquanto navega na internet.

3.16 2001 a 2006

No período de 2001 a 2006, surgem diversas novas tecnologias e processadores, sempre confirmando a previsão de Gordon Moore [5]. Contudo, a partir de 2001, após o lançamento de novas versões do Pentium 4, a indústria já podia construir processadores com transistores tão pequenos (tecnologia de $0.13\mu\text{m}$) que tornou-se muito difícil aumentar o clock por limitações físicas, principalmente porque o calor gerado era tão grande que não podia ser dissipado pelos resfriadores convencionais.

Intel e AMD desenvolveram suas próprias arquiteturas 64 bits, contudo, somente o projeto da AMD (x86-64 AMD64) foi vitorioso. O principal fato para isso ter acontecido foi porque a AMD evoluiu o AMD64 diretamente do x86-32, enquanto que a Intel tentou criar o projeto (Itanium) do zero.

Com o sucesso do Athlon 64, o primeiro processador de 64 bits, as duas empresas criaram um acordo no uso desta arquitetura, onde a AMD licenciou a Intel para o uso do padrão x86-64. Logo, todos os modelos de processadores 64 bits atuais rodam sobre o padrão x86-64 da AMD.

Em 2004 surge a tecnologia de fabricação de 90nm, que possibilitou o lançamento do Intel Pentium M, para maior economia de energia em dispositivos móveis, e novas versões do AMD Athlon 64 mais econômicas e estáveis.

3.17 2006 – Na era do multi core

As barreiras térmicas que atrasavam o avanço dos processadores levaram os fabricantes a criar novas saídas para continuar desenvolvendo novos produtos com maior poder de processamento que os anteriores. Uma das saídas mais palpáveis foi colocar vários núcleos em um mesmo chip. Esses novos processadores ficaram conhecidos como multi core.

O primeiro processador dessa categoria foi o Intel Pentium® D, que nada mais é do que dois núcleos de Pentium 4 em um mesmo chip com adaptações para o compartilhamento do barramento. Suas melhores versões eram produzidas com a tecnologia de 65nm, possuía 2MB de cache de L2 por núcleo e seu barramento tinha frequência de 800MHz.

Porem, mais uma vez a AMD sai ganhando com o lançamento do seu primeiro multi core, o Athlon 64 X2, que tinha muitas vantagens sobre o Pentium D, como o HyperTransport. A tecnologia HyperTransport é uma conexão ponto-a-ponto de alta velocidade e baixa latência, projetada para aumentar a velocidade da comunicação entre os circuitos. Ela ajuda a reduzir a quantidade de barramentos em um sistema, o que pode diminuir os gargalos e possibilitar que os microprocessadores utilizem a memória de forma mais eficiente. [2]

A Intel lança sua nova linha de processadores multi core e deixa o Athlon 64 X2 para traz. Essa nova linha abandona a marca Pentium® e passa a utilizar a Core2®, trazendo também algumas melhorias que tornariam a Intel novamente a líder de mercado.

Com as mais novas tecnologias de fabricação de processadores, agora com transistores de 45nm (e diminuindo), os fabricantes investem em chips com mais e mais cores. Lan-

çamentos recentes para desktops chegam a possuir 4 cores (Intel Core2 Quad e AMD Phenom™ X4) e para servidores 6 cores (AMD Opteron™ Six-Core), enquanto já existem pesquisas em desenvolvimento na AMD e Intel para produzir processadores com dezenas de cores em um único chip.

4. CONCLUSÃO

A *Lei de Moore* [5] foi a grande responsável pelo vertiginoso crescimento da capacidade de processamento dos processadores. Porem, a competição pela liderança do mercado entre Intel e AMD, as duas maiores empresas do ramo de microprocessadores para computadores pessoais, também contribuiu para essa incrível e rápida evolução. A evolução na tecnologia de fabricação de transistores chegou a níveis de miniaturização tão grandes que, provavelmente, não é mais possível diminui-los, contradizendo a *Lei de Moore*. Porém, a indústria encontrou uma saída engenhosa para continuar o crescimento da capacidade de processamento, até que a ciência crie uma nova tecnologia de fabricação de transistores ou um novo paradigma de processadores.

5. REFERÊNCIAS

- [1] AMD. A evolução da tecnologia. Acessado em 14 de Junho 2009 de <http://www.amd.com>.
- [2] AMD. Hyper transport. Acessado em 16 de Junho 2009 de <http://www.amd.com>.
- [3] Intel. 20 years - intel: Architect of the microcomputer revolution. Corporate Anniversary Brochures, Acessado em 12 de Junho 2009 de <http://www.intel.com/museum>.
- [4] Intel. Intel museum. Acessado em 16 de Junho 2009 de <http://www.intel.com/museum>.
- [5] G. E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8):114–117, April 19 1965.
- [6] S. Oberman, G. Favor, and F. Weber. AMD 3DNow! Technology: Architecture and implementations. *IEEE MICRO*, 19(2):37–48, MAR-APR 1999.
- [7] A. Peleg and U. Weiser. MMX technology extension to the Intel architecture. *IEEE MICRO*, 16(4):42–50, AUG 1996.
- [8] B. Schaller. The origin, nature, and implications of "moore's law" the benchmark of progress in semiconductor electronics, 1996. Acessado em 16 de Junho 2009 de <http://research.microsoft.com>.