

AVALIAÇÃO DA LEI DE MOORE E PROPOSTA DE UM MODELO DE PREVISÃO ALTERNATIVO BASEADO EM TÉCNICAS DE EXTRAPOLAÇÃO DE TENDÊNCIAS

Marcelo D'Emidio, Prof. Dr.

Chefe do Departamento de Marketing e Pesquisa de Mercado

Escola Superior de Marketing e Propaganda (ESPM), Brasil

marcelo@demidio.com.br

RESUMO

O objetivo deste estudo é averiguar se o modelo proposto por Moore (1975) descreve adequadamente a evolução tecnológica dos processadores; analisar se ainda é plausível utilizá-lo como ferramenta preditiva e, caso não seja, propor um modelo alternativo. Para tanto, utilizou-se o método de previsão tecnológica de extrapolação de tendências. Os testes estatísticos realizados apresentam fortes indícios de que o modelo proposto por Moore (1975) descreve de forma adequada a evolução do número de componentes dos processadores durante as décadas de 70, 80 e 90. Já em relação aos anos 2000, o mesmo não pode ser afirmado, pois detectou-se a necessidade de adaptações para que o modelo possa ser utilizado como ferramenta preditiva.

Palavras-chave: Lei de Moore. Previsão. Evolução tecnológica.

MOORE ´S LAW EVALUATION AND PROPOSAL OF AN ALTERNATIVE FORECASTING MODEL BASED ON TREND EXTRAPOLATION

ABSTRACT

This study's core objective is to validate whether the model proposed by Moore (1975) adequately describes the technological evolution of microprocessors. It further poses to verify whether this model is a feasible predictive tool and, finally, present an alternative model. To this extent, the forecasting technique method, based on historical data projections, will be applied. Statistical tests employed presented strong indications that the method proposed by Moore (1975) adequately described the evolution of processor component numbers during the 70s, 80s and 90s. As to the 2000s, however, the same cannot be affirmed and consequently the present study encountered grounding for the need to adapt the model to enable its application as a predictive tool.

Key-words: Moore's Law. Forecast. Technological evolution.

1 INTRODUÇÃO

Durante a década de 70, a crescente duplicação do número de componentes dos microprocessadores ficou conhecida como Lei de Moore. Este modelo foi proposto por Gordon Moore em 1965 e modificado dez anos depois. A chamada Lei de Moore sempre foi controversa, uma vez que o autor define o crescimento tecnológico de forma exponencial.

Entretanto, é importante notar que existem limites físicos para esta curva. Com base neste limite máximo, diversos trabalhos – como os de Reitter, 2003; Birnbaum & Williams, 2000; e McGrath, 2005 - cogitam a possibilidade do fim ou da adaptação da Lei de Moore.

Um exemplo disso é que, ao longo dos anos 2000, a publicação *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS) fez diversas revisões na taxa de crescimento descrita pela Lei de Moore.

Sutter (2005) e Gilder (1995) consideram que, por não ter descrito corretamente o desenvolvimento da indústria de semicondutores, a Lei de Moore não pode ser considerada uma lei, tampouco uma boa previsão.

Assim, o problema de pesquisa deste artigo está centrado na validação do modelo proposto por Moore (1975). Tem-se como objetivos:

- ✓ averiguar se o modelo proposto por Moore (1975) descreve adequadamente a evolução tecnológica dos processadores; e
- ✓ analisar se ainda é plausível utilizar este modelo como ferramenta preditiva e, caso não seja, propor um modelo alternativo.

2 A LEI DE MOORE

Moore (1965) – ciente de que a complexidade e o custo dos componentes dos semicondutores dobravam a cada ano desde a produção do primeiro chip - procura prever o desenvolvimento da indústria de semicondutores para a década de 70. Este rápido aumento no número dos componentes dos chips - mensurado tipicamente pelo número de transistores em 1965 - acabou ficando conhecido popularmente como Lei de Moore, que passou a ser muito utilizada para destacar a rápida mudança na tecnologia da informação.

De acordo com Moore (1965), uma das principais vantagens da produção específica de chips é a possibilidade de redução de custos. Esta vantagem é ampliada pelo desenvolvimento de tecnologias que possibilitam aumentar o número de funções num mesmo chip. Para o autor, conforme demonstrado no Gráfico 1, na produção circuitos mais simples, o custo por componentes é inversamente proporcional ao número de componentes, porém, o acréscimo de mais componentes tende a aumentar o custo por componente e a reduzir os ganhos. Assim, há um número ótimo de componentes, no qual o custo é mínimo. Este ponto varia conforme a tecnologia da época: para 1965 o número ideal era de aproximadamente 50 componentes; para 1970, contudo, Moore (1965) extrapolou a tendência em 1000 componentes. O autor previu que, em 1970, o custo de produção por componente seria 1/10 do valor de 1965.

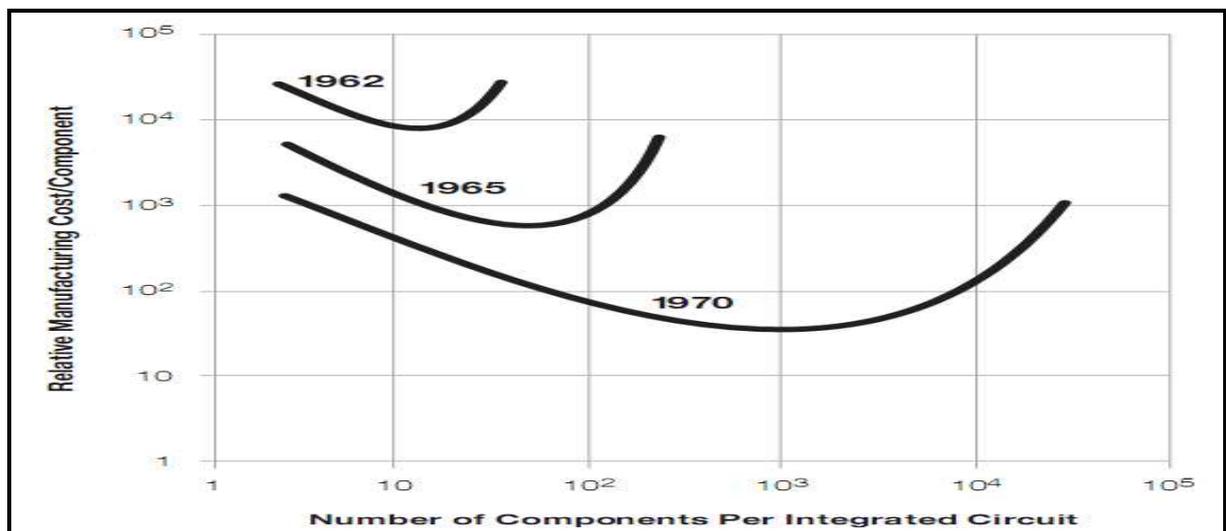


Gráfico 1: Número de componentes por circuito integrado

Fonte: Moore (1965)

Conforme demonstrado no gráfico 2, em 1965, Moore inferiu que o número ótimo de componentes estava dobrando a cada ano e que esta taxa manter-se-ia ou aumentaria em curto prazo. O autor manifestou dúvidas com relação à validade desta taxa para longo prazo, entretanto, não mencionou razões para que ela variasse na década seguinte (70). Com base nesta tendência de crescimento, em 1965, Moore previu que, em 1975, ter-se-ia um chip com 65.000 componentes a um custo mínimo de fabricação. É interessante notar que o autor baseou suas conclusões em uma série histórica com apenas quatro pontos.

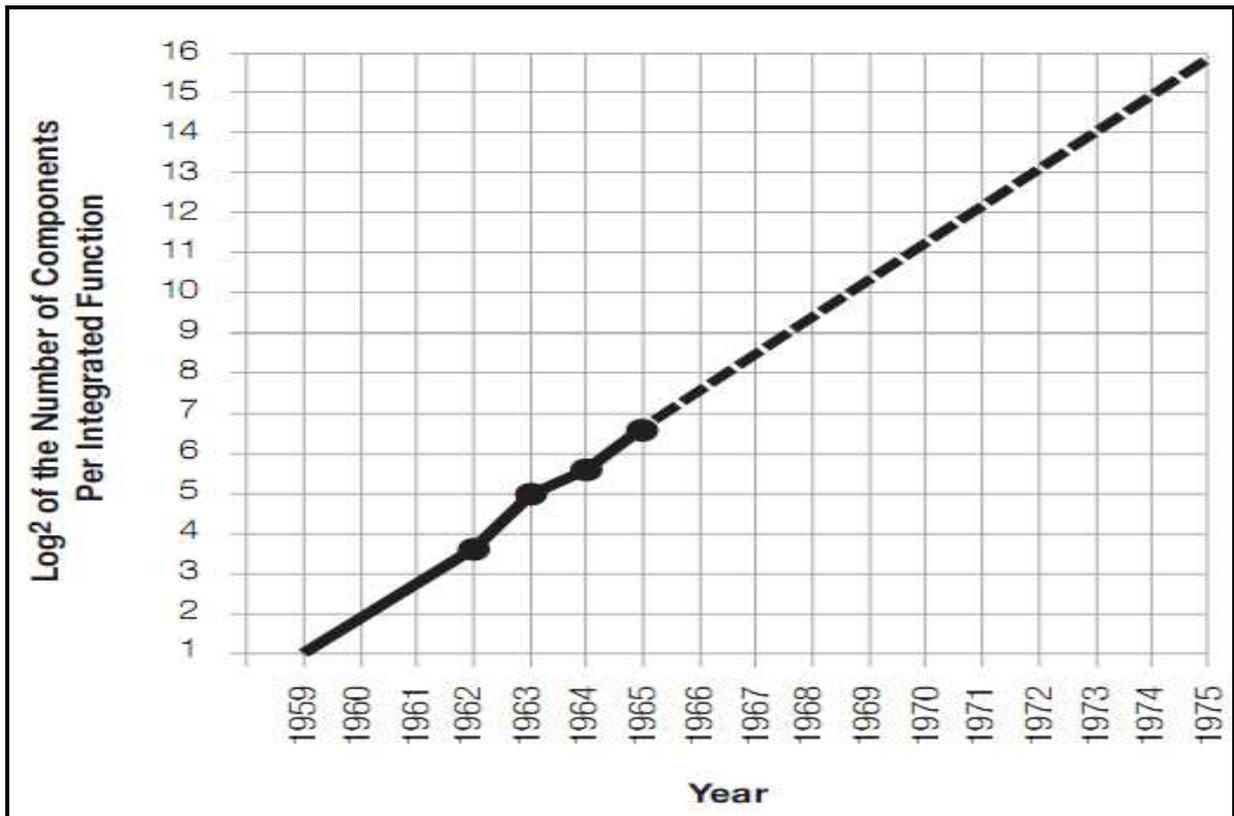


Gráfico 2: Número de componentes por circuito integrado

Fonte: Moore (1965)

Moore (1965) apresenta alguns fatos que poderiam interferir nesta taxa de crescimento (tais como a dissipação de calor nos circuitos), mas conclui que todos poderiam ser superados. Dentre os fatores que efetivamente poderiam impactar a taxa de crescimento dos componentes, o autor não citou investimentos em pesquisa e desenvolvimento para o avanço tecnológico. Tais investimentos, necessários para sobrepor barreiras técnicas, poderiam ser elevados e, por consequência, diminuir a taxa de crescimento.

Outro ponto não mencionado pelo autor é o pressuposto de que a taxa de crescimento do setor de semicondutores continuaria elevada, mantendo um alto nível de demanda. Este pressuposto é importante, pois possibilita o ganho de escala, que é fundamental para a redução de custos. Em 1965, tal fato poderia não ser um problema, porém, segundo Porter (1986), quando os setores crescem aumenta a concorrência e diminui a lucratividade. Assim, poder-se-ia esperar que, com a evolução do setor e o aumento da concorrência, a demanda para cada concorrente diminuiria, impactando negativamente sobre a taxa de crescimento do número de componentes.

Moore (1975) revisa a projeção elaborada 10 anos antes. O Gráfico 3 destaca diferentes tipos de chips que foram criados, demonstrando que o crescimento do número de componentes por circuito se comportou conforme o previsto. Em 1975, foi lançado no mercado um circuito com aproximadamente 65.000 componentes (chip de memória com 16 kbytes). Moore (1975) destaca algumas razões técnicas que contribuíram para esta evolução, dentre as quais, o advento do semicondutor de óxido de metal (MOS), possibilitando inserir mais componentes por chip; e a melhoria nos processos produtivos para reduzir a produção de chips defeituosos.

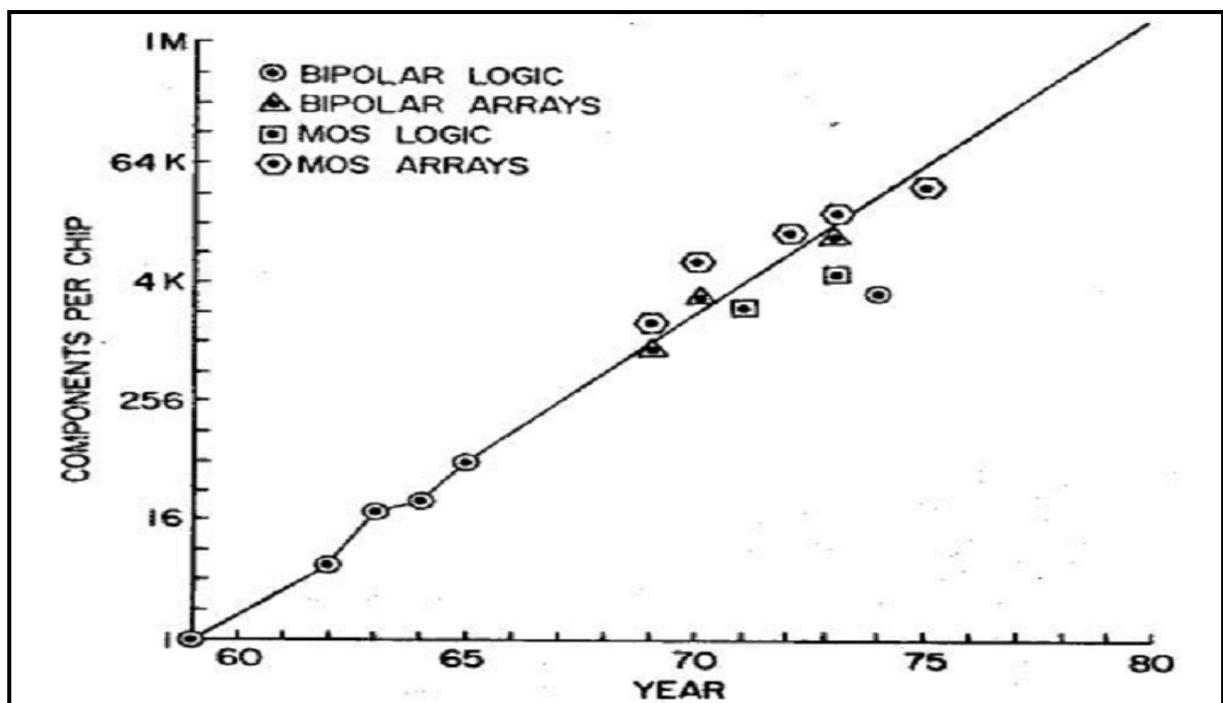


Gráfico 3: Número aproximado de componentes em circuitos integrados complexos vs ano de introdução

Fonte: Moore (1975)

Segundo Moore (1965), a evolução se daria em circuitos de baixo custo. Porém, Moore (1975) identifica o circuito com 65.000 componentes como um circuito complexo, e não como um componente de baixo custo. Em 1975, Moore extrapolou a tendência dos últimos 10 anos e, conforme o Gráfico 4, revisou a taxa de crescimento para a metade, ou seja, o número de componentes por chip iria dobrar a cada 2 anos. O autor destaca, no final do artigo, que o custo por componente continuaria sendo reduzido, o que ampliaria ainda mais a utilização de dispositivos eletrônicos por toda a sociedade.

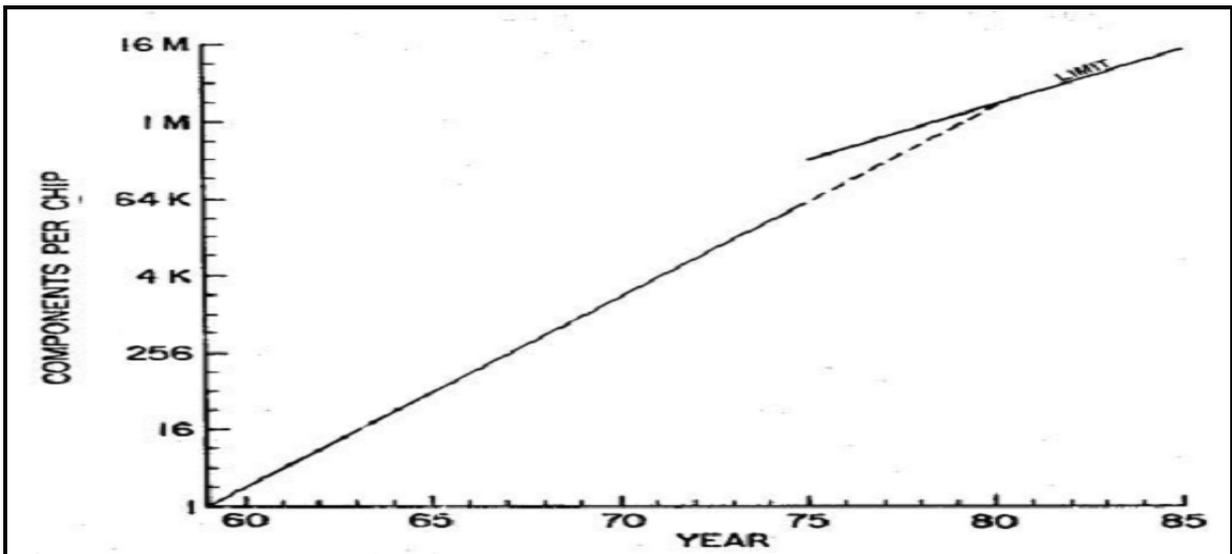


Gráfico 4: Projeção do número aproximado de componentes por chip

Fonte: Moore (1975)

Moore (1995) afirma que os chips mencionados são aplicados basicamente em memórias e processadores, sendo que a evolução do número de componentes dos processadores normalmente é mais lenta. É interessante notar que o autor não faz distinção entre os tipos de aplicação dos chips na previsão elaborada em 1975, o que compromete tal predição. Moore (1995) apresenta uma comparação entre os dados previstos e os reais, conforme apresentado no Gráfico 5.

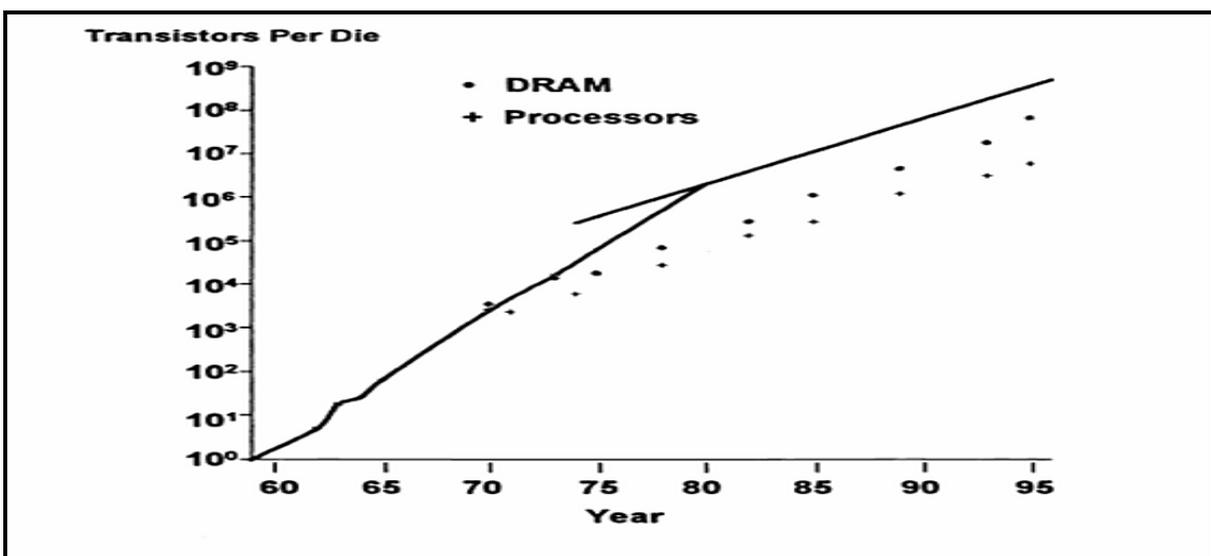


Gráfico 5: Comparação entre a previsão de Moore (1975) e o número de componentes em memórias DRAM e processadores produzidos até 1995.

Fonte: Moore (1995)

O autor afirma que sua predição foi superestimada porque ele supôs que a memória do tipo CCD de 16 Kbytes, produzida em 1975, chegaria a 64 Kbytes, talvez a 256Kbytes nos anos seguintes. Esta evolução corresponderia, em grande parte, à curva prevista em 1975, porém, um problema com a tecnologia utilizada nas memórias CCD inviabilizou este aumento e os produtos não foram lançados no mercado. Segundo Moore (1995), descontando tal fato - que impactou diretamente sobre sua previsão - pode-se observar que as retas previstas e as ocorridas são paralelas (Gráfico 5). Por isso, para o autor, a taxa de evolução do número de componentes, apesar do erro, foi semelhante à prevista. Adiante, este trabalho validará as afirmações do autor.

3 METODOLOGIA

Porter (1991) define tecnologia como conhecimento sistematizado e utilizado para alterar, controlar ou ordenar elementos do ambiente físico ou social. Já predição tecnológica designa a previsão de atividades que focam as mudanças tecnológicas. Este estudo analisa o modelo proposto por Moore (1965, 1975) e propõe um modelo preditivo da evolução dos microprocessadores para a próxima década. Para tanto, são utilizados modelos e métodos de previsão tecnológica.

Porter e Rossini (1987) afirmam que existem diversos métodos de previsão tecnológica: monitoramento, opinião de especialistas, extrapolação de tendências, modelagem e cenários. Este estudo se enquadra no método de extrapolação de tendências, haja vista que considera a continuidade das tendências e séries históricas já registradas. Os próprios autores destacam que esta classificação apresenta limitações. Uma das principais está no fato de o monitoramento não ser um método preditivo por si só, e sim uma técnica para o acúmulo sistemático e análise dos dados através dos quais são feitas as previsões.

Porter (1991) classifica os métodos em diretos, correlativos e estruturais.

- ✓ Os métodos diretos são aqueles que preveem diretamente os parâmetros mensuradores das características relevantes da tecnologia. Estes métodos não explicitam correlações com os contextos tecnológicos, econômicos, sociais e políticos, implicando

pressupostos maiores em relação à natureza e à permanência dos contextos. Alguns exemplos de métodos diretos aplicáveis são: a opinião de especialistas (através de pesquisas *Delphi* ou *Surveys*), análise de séries temporais, e extrapolação de tendências (através de curvas de crescimento, substituição ou ciclo de vida).

- ✓ Os métodos correlativos relacionam o desenvolvimento da tecnologia em questão com o crescimento ou mudança de um ou mais elementos de seu contexto. Alguns exemplos são: análise de cenários, impacto cruzado e analogias.
- ✓ Os métodos estruturais efetuam a previsão considerando a relação de causa e efeito entre a tecnologia e o contexto. É o caso de modelos causais, de simulação, entre outros.

De acordo com a classificação de Porter (1991), este estudo adotou métodos diretos, com a utilização de extrapolação de tendências, uma vez que baseia-se em pressupostos como a natureza e a permanência dos contextos tecnológicos ditados pela tendência histórica de dados. Segundo Porter (1991), para se elaborar um estudo baseado na extrapolação de tendências, é necessário definir claramente as variáveis de estudo e as suas séries históricas.

Para alcançar o objetivo deste estudo, adotou-se como variável o número de componentes dos processadores mais modernos, uma vez que a suposição de Moore (1965) – realizada com base em processadores de baixo custo – mostrou-se inviável para descrever o crescimento exponencial deste mercado, inclusive nos dados apontados por Moore (1975). A série histórica desta variável foi extraída da Intel (2007) e de Moore (1975). Com intuito de validar os dados, foram consultadas publicações do *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS, 2001, 2005) e de Yang (1998), que também utilizaram tal série histórica.

O primeiro passo proposto por Porter (1991) é identificar o modelo que melhor descreve os padrões de inovação da tecnologia em estudo. Conforme o autor, os modelos que descrevem curvas S (como *Fisher-Pry* e *Gompertz*) devem ser considerados, uma vez que descrevem grande parte dos padrões de evolução tecnológica. Outros modelos possíveis são curva de aprendizado, de crescimento exponencial ou linear.

O crescimento exponencial ocorre durante determinado período (Hamblin, Jacobsen & Miller, 1973 *apud* Porter, 1991); então, a taxa de crescimento muda e outra época emerge. É possível que, ao longo da evolução tecnológica de diferentes épocas, ocorra um crescimento exponencial contínuo, porém, com taxas de crescimento variáveis.

Assim, as funções que descrevem o progresso tecnológico normalmente têm o formato do Gráfico 6 - relativo à evolução da aviação - no qual se observa que o desenvolvimento de uma tecnologia começa lento devido aos diversos impedimentos a serem superados. Passado este período, a tecnologia apresenta um crescimento rápido. Depois volta a tornar-se lento, pois depende de grande esforço e altos investimentos. Neste momento, faz-se necessário o surgimento de uma nova tecnologia, por isso, os laboratórios de P&D focam seus esforços para desenvolvê-la: o ciclo se inicia.

Os autores concluem que cada ciclo pode ser descrito como uma curva S. Conforme será detalhado adiante, neste estudo, propõe-se ciclos tecnológicos - a serem descritos como curvas S - com período aproximado de 10 anos, os quais retratam a evolução tecnológica dos microprocessadores.

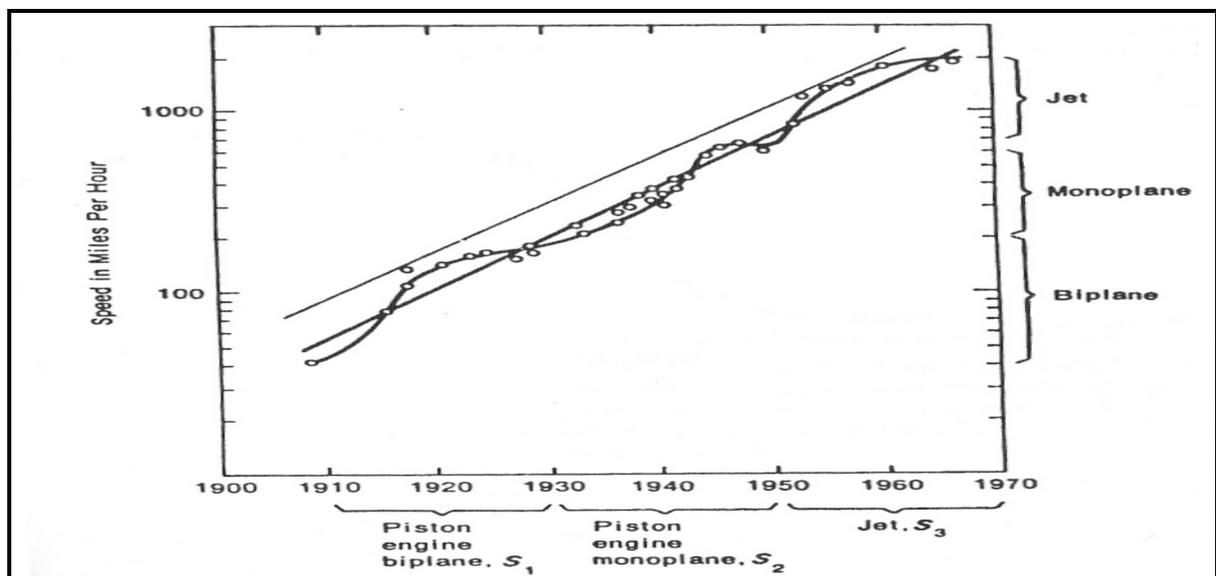


Gráfico 6: Desenvolvimento tecnológico

Fonte: Porter (1991)

Moore (1965, 1975) deixa claro que o padrão de crescimento da tecnologia em questão é exponencial e ininterrupto, de forma que o número de componentes do processador deveria dobrar a cada 2 anos. O autor explica que

o modelo é válido por várias décadas, porém, não determina um teto máximo ou uma desaceleração do crescimento. Este estudo valida o modelo proposto por Moore (1975) e, como descrito no segundo passo, testa diversos modelos alternativos.

O segundo passo evidenciado por Porter (1991) é testar a aderência dos diversos modelos aos dados. Neste estudo, elabora-se diversos testes de aderência e de significância estatística, com intuito de validar o modelo proposto por Moore (1975) e propor um modelo alternativo, que apresente melhor aderência à tendência tecnológica descrita pela série histórica.

O terceiro passo indicado por Porter (1991) é utilizar o modelo definido no passo anterior para projetar dados futuros. Neste trabalho, define-se, através de modelos de regressão estatística, as equações que regem a evolução tecnológica em questão. Posteriormente, compara-se os dados obtidos com os projetados por Moore (1975).

4 VALIDAÇÃO DA LEI DE MOORE

A partir dos dados históricos que contemplam todos os processadores lançados pela empresa, suas datas de lançamento e a evolução no número de transistores ou componentes, é possível verificar se o modelo proposto por Moore (1975) apresenta, ou não, grande descolamento em relação aos dados reais no intervalo entre 1975 e 2006.

A Tabela 1 e o Gráfico 7 apresentam a evolução do número de transistores com base no valor real do número de transistores do processador mais avançado em 1975, o Intel 8080. Uma análise preliminar da série histórica mostra que o erro acumulado ao longo dos anos apresenta grande oscilação e, em alguns casos, grande amplitude.

Um ponto a ser notado, ao analisar-se a série histórica, é que os valores previstos durante a década de 70 e 80 foram, no geral, inferiores aos observados. Durante a década de 90, no entanto, ocorreu a inversão desta tendência, com a superação do número de transistores previstos em relação aos observados. Isso fez com que a curva real se aproximasse da curva prevista por Moore.

Este fato pode ser confirmado pelos testes de hipóteses detalhados a seguir. Segundo Hammond (2004), um fato relevante, ocorrido no final da década de 80 (com o lançamento do processador 486), foi a inclusão da memória cache no cálculo dos transistores dos processadores Intel. Com isto, o número de transistores cresceu abruptamente, saindo de 275.000 para 1.200.000, um aumento de aproximadamente 350%, como pode ser notado na Tabela 1.

Tabela 1: Evolução dos processadores Intel

PROCESSADOR	ANO DE LANÇAMENTO	Nº. DE TRANSISTORES		DIFERENÇA	ERRO
		REAL	PREVISTO POR MORE		
8086	1978	29.000	18.000	(11.000)	-37,93%
8088	1979	29.000	27.000	(2.000)	-6,90%
80186	1980	92.000	36.000	(56.000)	-60,87%
Intel 286	1982	134.000	72.000	(62.000)	-46,27%
Intel 386	1985	275.000	216.000	(59.000)	-21,45%
Intel 486	1989	1.200.000	864.000	(336.000)	-28,00%
Intel Pentium	1993	3.100.000	3.456.000	356.000	11,48%
Intel Pentium 2	1997	7.500.000	13.824.000	6.324.000	84,32%
Intel Pentium 3	1999	9.500.000	27.648.000	18.148.000	191,03%
Intel Pentium 4	2000	42.000.000	36.864.000	(5.136.000)	-12,23%
Intel Itanium	2001	220.000.000	55.296.000	(164.704.000)	-74,87%
Pentium D	2005	230.000.000	221.184.000	(8.816.000)	-3,83%
Pentium Core 2 Duo	2006	291.000.000	294.912.000	3.912.000	1,34%

Fonte: Intel (2007)

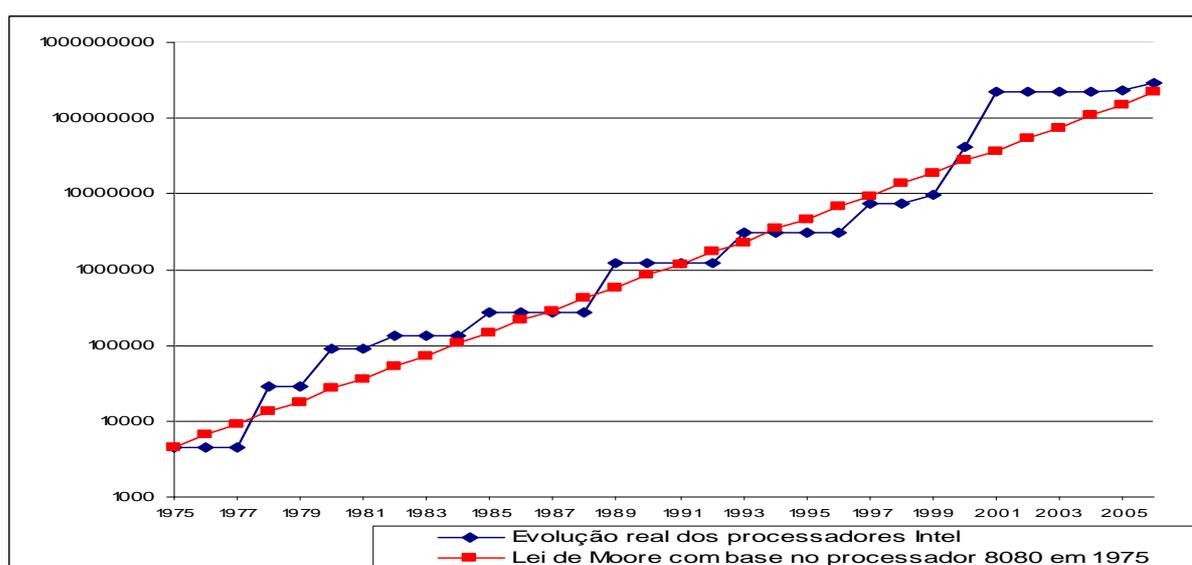


Gráfico 7: Evolução no número de componentes dos processadores

Fonte: Intel (2007)

Ao analisar o erro dos últimos dois anos (2005 e 2006), nota-se que estes são os menores erros históricos. Isto pode induzir a conclusão errônea de que o modelo proposto por Moore (1975) adapta-se melhor a atualidade do que aos anos anteriores. Tal conclusão não é correta porque os valores previstos são acumulados. A análise dos valores demonstra que, na década de 70 o número de transistores dobrou a cada 20 meses; na década de 80 a cada 24 meses; na de 90 a cada 34 meses; e nos anos 2000 a cada 26 meses. Assim, o crescimento apresentado nos anos 2000 é o maior da série histórica, o que traz indícios da necessidade de adaptação do modelo proposto por Moore (1975).

Com intuito de auxiliar na validação do modelo proposto por Moore, elaborou-se diversos testes de hipótese para medir a existência, ou não, de uma relação entre os valores reais e os previstos por Moore (1975). Os testes foram divididos em 3 períodos: de 1975 a 1979, de 1980 a 1989, de 1990 a 1999, e 2000 a 2006. Assim, tem-se como hipótese nula (H_0) a existência da correlação entre os dados previstos por Moore (1975) e os dados reais observados no período; e como hipótese alternativa (H_1) a inexistência de correlação entre os dados previstos por Moore (1975) e os dados reais observados no período.

Tabela 2: Coeficientes de correlação de Pearson

PERÍODO	COEF. DE COREL DE PEARSON
Década de 70	0,910
Década de 80	0,839
Década de 90	0,952
Anos 2000	0,674*
1975 a 2006	0,865

*Não apresentou relevância estatística

Conforme pode ser observado na Tabela 2, dentro de um nível de significância de 5%, rejeita-se a hipótese nula; com isto, aceita-se a existência de correlação entre os dados preditos por Moore (1975) e os dados reais das décadas de 70. De forma análoga, também existe correlação com os dados reais das décadas de 80, 90, e o período de 1975 a 2006. Em se considerando os anos 2000, não se pode rejeitar a hipótese nula e, com isto, afirmar que existe correlação entre o modelo proposto e a realidade.

Concluindo, há indícios de que o modelo proposto por Moore (1975) foi válido para as décadas passadas, em especial para prever o crescimento no número de componentes dos processadores na década de 90, porém, precisa ser adaptado para a atualidade.

5 ANÁLISE DA SÉRIE HISTÓRICA

Segundo Hair (1998), existe inúmeras funções com as quais se pode ajustar um conjunto de dados. A questão principal é: que função representa o melhor ajuste, ou seja, apresenta maior aderência aos dados observados. Um método pelo qual se pode avaliar a qualidade do ajuste é o coeficiente de correlação de Pearson ou R^2 . Assim, testou-se a aderência dos modelos mais prováveis à série histórica real, conforme recomendado por Porter (1991), bem como as curvas que apresentam crescimento exponencial, de acordo com os indícios dos estudos de Moore (1965 e 1975), e recomendações de Porter (1991). Deste modo, foram utilizadas as curvas: logarítmica, quadrática, cúbica, logística, Gompertz e Fisher-Pry.

Tabela 3: Aderência das funções à série histórica real

FUNÇÃO	R ²				
	TODO PERÍODO	DÉCADA DE 70	DÉCADA DE 80	DÉCADA DE 90	ANOS 2000
Logarítmica	0,251*	0,602	0,314*	0,603	0,668
Gompertz	0,686	0,797	0,555	0,887	0,572
Fisher-Pry	0,809	0,000*	0,566	0,913	0,482
Quadrática	0,821	0,810	0,695	0,921	0,688
Cúbica	0,892	0,893	0,824	0,923	0,753
Logística	0,961	0,750	0,794	0,906	0,957

* Não apresentou relevância estatística

A tabela 3 apresenta os resultados R^2 para todo o período da série histórica (de 1975 a 2006) e para cada década. Foram elaborados testes de significância estatística para as 4 curvas e, dentro de um intervalo de confiança de 95%, apenas a curva logarítmica não apresenta aderência estatística relevante em relação à década de 80 e ao período compreendido entre 1975 e 2006.

Apesar da forte aderência da curva logística, conforme citado anteriormente e destacado por Porter (1991), as funções que descrevem o progresso tecnológico normalmente têm o formato do Gráfico 6, assim, têm-se, para períodos diferentes da evolução tecnológica, curvas S que melhor o representam. Segundo o autor, para definir os períodos a serem estudados, deve-se analisar quais pontos da série histórica apresentam grandes mudanças tecnológicas.

Embora se tenha identificado relevância estatística e forte aderência da curva logística à série histórica (principalmente em relação ao último período da série), optou-se por uma análise complementar, com intuito de encontrar intervalos da série histórica nos quais fosse possível ajustar curvas logísticas com grau ainda maior de aderência.

Hammond (2004) afirma que as grandes evoluções tecnológicas dos processadores ocorreram aproximadamente a cada 10 anos desde 1975. Por isso, testou-se a aderência de curvas logísticas nos intervalos de 1975-1985, 1986-1995 e 1996-2006.

Tabela 4: Testes de aderência das curvas logísticas em relação à série histórica

PERÍODO	R2
1975-1984	0,917
1985-1994	0,873
1995-2006	0,906

Conforme se pode observar na Tabela 4, o modelo definido pelos intervalos entre 1975 e 1985, 1986 e 1995, 1996 e 2006 apresentou melhor aderência em relação à série histórica. A seguir as equações que descrevem o modelo:

$$y_{75-84} = \frac{1}{\frac{1}{135000} + (0,0022 * 0,3323^t)}$$

Equação 1: Curva Logística para o período de 1975 a 1984

$$y_{85-94} = \frac{1}{\frac{1}{10000000} + (0,0000072 * 0,66^t)}$$

Equação 2: Curva Logística para o período de 1985 a 1994

$$y_{95-06} = \frac{1}{\frac{1}{300000000} + (0,0000012 * 0,4758^t)}$$

Equação 3: Curva Logística para o período de 1995 a 2006

É importante destacar que foram elaborados estudos para períodos diferentes dos apresentados, sendo que o período adotado demonstrou melhor aderência dentre os testados.

Para que seja possível a extrapolação da tendência descrita pela série histórica, é preciso definir uma curva única, que represente a tendência de crescimento dos componentes para a próxima década. Para isto, é importante notar que a curva logística é dada pela equação 4 e tem sua forma definida por 3 parâmetros: U, B₀ e B₁, conforme a Tabela 5.

$$y = \frac{1}{\frac{1}{U} + (B_0 * B_1^t)}$$

Equação 4: Curva logística

Tabela 5: Parâmetros U, B₀ e B₁ para as curvas Logísticas dos períodos em estudo

PERÍODO	75-84	85-94	95-06
U	135000	10000000	300000000
B ₀	0,0022	0,0000072	0,0000012
B ₁	0,3323	0,6600	0,4758

Dessa forma, faz-se necessário definir os parâmetros U, B₀ e B₁ da curva que representará o período de 2007 a 2015. Para tanto, testou-se a aderência das curvas linear, logarítmica, S, exponencial, e a potência em relação aos 3 períodos de cada parâmetro. A tabela 6 apresenta as curvas, os R² e as equações (em função do período de análise), que apresentaram os melhores ajustes para os parâmetros U, B₀ e B₁.

Tabela 6: Curvas com os melhores ajustes para os parâmetros U, B₀ e B₁

PARÂMETRO	CURVA COM MELHOR AJUSTE	R ²	EQUAÇÃO
U	Exponencial	0,9954	$Y_p = 3329,4e^{3,8531p}$
B ₀	Potência	0,9796	$Y_p = 0,0017p^{-6,9919}$
B ₁	S	0,7560	$Y_p = e^{(-0,4885+(-0,5814/p))}$
PARÂMETRO	CURVA COM MELHOR AJUSTE	R ²	EQUAÇÃO
U	Exponencial	0,9954	$Y_p = 3329,4e^{3,8531p}$
B ₀	Potência	0,9796	$Y_p = 0,0017p^{-6,9919}$
B ₁	S	0,7560	$Y_p = e^{(-0,4885+(-0,5814/p))}$

6 PROPOSTA DE MODELO

A partir das equações que descrevem as tendências de cada um dos parâmetros, é possível definir a forma da curva logística que descreve o quarto período, de 2007 a 2015. A equação abaixo apresenta o modelo proposto.

$$y_{07-15} = \frac{1}{\frac{1}{1100503357} + (0,0000000243 * 0,5305^t)}$$

Equação 4: Modelo proposto para o período de 2007 a 2015

A partir da equação 4, é possível extrapolar a tendência para o período compreendido entre 2007 a 2015. A Tabela 7 e o Gráfico 8 comparam os valores propostos pelo modelo de Moore (1975) aos valores provenientes do modelo proposto por este estudo.

Tabela 7: Comparativo entre o modelo proposto e Moore (1975)

ANO	LEI DE MOORE	MODELO PROPOSTO
2007	448.614.292	335.167.739
2008	598.152.389	402.552.970
2009	897.228.583	527.330.795
2010	1.196.304.777	754.888.724
2011	1.794.457.166	1.158.582.253
2012	2.392.609.555	1.840.850.021
2013	3.588.914.332	2.904.610.879
2014	4.785.219.110	4.371.189.768
2015	7.177.828.665	6.083.994.470

Através do Gráfico 8 é possível verificar que o modelo proposto por este estudo apresenta uma taxa de crescimento reduzida em relação à Lei de Moore. Enquanto Moore (1975) prevê que o número de componentes dos processadores dobrará a cada 2 anos, o modelo proposto neste estudo prediz uma desaceleração nesta taxa para aproximadamente 2,8 anos.

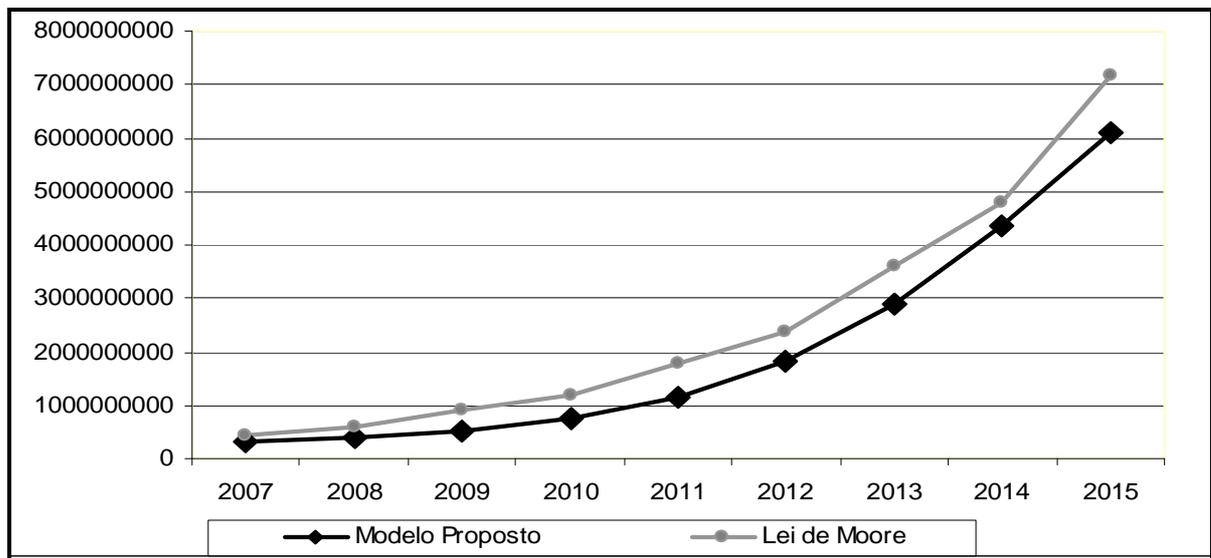


Gráfico 8: Comparativo entre o modelo proposto e Moore (1975)

Em âmbito mundial, o principal estudo que referencia a Lei de Moore é o *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS). Este estudo, coordenado pela *Semiconductor Industry Association* (SIA) desde 1999, busca analisar e prever as evoluções tecnológicas do setor de semicondutores para os próximos 15 anos. O processo de elaboração do ITRS é responsabilidade de um comitê composto por quatro membros de cada país patrocinador, ou seja, 4 membros do Japão, 4 da Coreia, 4 de Taiwan, 4 dos Estados Unidos e 4 da Comunidade Europeia. Os estudos são elaborados por especialistas do setor: foram 940 especialistas em 2003, e 1288 em 2005.

O ITRS (2003) previu uma desaceleração na taxa de crescimento proposta por Moore (1975), predizendo que o número de componentes de um processador deveria dobrar a cada 3 anos nos próximos 15 anos. Em 2006, os especialistas revisaram a taxa de crescimento para 2,5 anos, com base na evolução tecnológica experimentada entre 2004 e 2005. ITRS (2005) apresenta também os principais fatores tecnológicos que estão contribuindo para a desaceleração da taxa de crescimento em questão.

Vale ressaltar que os resultados encontrados pelo renomado estudo ITRS - elaborado por centenas de especialistas europeus, americanos e asiáticos - está em linha com os resultados encontrados neste estudo.

7 CONCLUSÕES

Os testes estatísticos realizados neste estudo apresentam fortes indícios de que o modelo proposto por Moore (1975) descreveu de forma adequada a evolução do número de componentes dos processadores durante as décadas de 70, 80 e 90. Já em relação aos anos 2000, o mesmo não pode ser afirmado, pois o presente estudo detectou a necessidade de adaptação para que o modelo possa ser utilizado como ferramenta preditiva.

Com base na série histórica, que traça a evolução do número de componentes dos processadores de 1975 a 2006, foi possível identificar 3 períodos de evolução tecnológica (de 1975 a 1984, de 1985 a 1994, de 1995 a 2006), sendo estes melhor descritos por funções logísticas. A forte aderência apresentada pelas curvas logísticas possibilitou a extrapolação da série histórica com alto grau de confiabilidade. Assim, o modelo proposto neste estudo prevê uma desaceleração na taxa de crescimento de 2 anos, predita por Moore (1975), para aproximadamente 2,8 anos.

Cabe ressaltar que o modelo proposto por Moore (1975) apresenta algumas inconsistências. A taxa de crescimento prevista deveria descrever a evolução dos processadores de custo ótimo e, conforme as análises efetuadas neste estudo, o modelo descreve a evolução dos processadores recém-lançados, que são os de maior custo.

Outro ponto importante é que o autor não definiu nitidamente um período para sua previsão. Por isso, quando se analisa um período de 31 anos, o modelo apresenta forte oscilação em relação aos dados reais, apesar de sua boa aderência aos pontos iniciais e finais da série histórica. Nitidamente, o autor desconsiderou os diversos ciclos de evolução tecnológica que ocorreram ao longo do período em estudo.

Relevados estes fatos, fica claro que o modelo proposto por Moore (1975) tem um grande mérito, uma vez que previu, com base em uma série histórica de 10 pontos, o comportamento e a evolução dos processadores para os próximos 25 anos.

REFERÊNCIAS

- Birnbaum J. & Williams R.S. (2000, janeiro). Physics and the information revolution. *Physics Today*, 38-42.
- Gilder, G. (1995, agosto). The coming software shift: Telecosm. *Forbes ASAP*, 147-162.
- Hair, J.F.; Anderson, R.E.; Tatham, R.L. & Black, W.C. (1998). *Análise multivariada de dados*. Porto Alegre: Bookman.
- Hamblin, R.; Jacobsen, B. & Miller, J.L.L. (1973). A mathematical theory of social change. In A. Porter et al. (orgs.; 1991). *Forecasting and Management of Technology*. Nova York: John Wiley & Sons.
- Hammond, M.L. (2004, abril). Moore's Law: the first 70 years. *Semiconductor International*, 51.
- INTEL-Intel Timeline by Date. Recuperado em 05 de outubro de 2007, de www.intel.com/museum/archives/history_docs/mooreslaw.htm.
- ITRS-International Technology Roadmap for Semiconductors, 2001 Edition. Recuperado em 18 de outubro de 2007, de <http://public.itrs.net/>.
- ITRS-International Technology Roadmap for Semiconductors, 2003 Edition. Recuperado em 18 de outubro de 2007, de <http://public.itrs.net/>.
- ITRS-International Technology Roadmap for Semiconductors, 2005 Edition. Recuperado em 18 de outubro de 2007, de <http://public.itrs.net/>.
- Mcgrath, D. (2005, maio). Rethinking Moore's Law. *InformationWeek*, 16.
- Moore, G.E. (1965, abril). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*.
- Moore, G.E. (1995, fevereiro). Lithography and the future of Moore's Law. *Microlithography Symposium*.
- Moore, G.E. (1975, junho). Progress in digital integrated electronics. *IEDM Technical Digest*, 11-13.
- Porter, A. et al. (1991). *Forecasting and management of technology*. Nova York: John Wiley & Sons.
- Porter, A. & Rossini, F.A. (1987). *Technological forecasting*. encyclopedia of systems and control. In A. Porter et al. (1991). *Forecasting and Management of Technology*. Nova York: John Wiley & Sons.
- Porter, M. (1986). *Estratégia competitiva: técnicas para análise de indústrias da concorrência*. Rio de Janeiro, Campus.
- Thomas, R. (2003, março). Breaking Moore's Law. *Pulp & Paper*, 27.
- Yang, C.H. (1998). *Prioritized model checking*. Tese de Doutorado, Universidade de Stanford, EUA.