

Em busca das fronteiras tecnológicas

Robert Stuart Goodrich

Prof. Titular do Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
São José dos Campos SP

Arnaldo Rodrigues Barbalho Jr.

Kleber Grasso Rodrigues

Oficial Engenheiro da Divisão de Eletrônica do IPD/CTA,
São José dos Campos SP

Resumo

Este artigo aborda uma técnica de previsão, conhecida como Curva de Envelope, com o objetivo de ilustrar a sua utilidade na estimativa de especificações de projeto (parâmetros técnicos) para a próxima geração de uma tecnologia determinada. A Curva de Envelope representa o limite do parâmetro sendo analisado e, quando extrapolado para o futuro, fornece um limite superior para as especificações de projeto da nova tecnologia considerada. A primeira parte do trabalho revê a literatura disponível sobre a Curva de Envelope e explica os conceitos teóricos e a metodologia desta técnica. A segunda parte do artigo ilustra, passo a passo, a aplicação da técnica na previsão dos parâmetros técnicos de computadores de bordo na aviação de aeronaves. As Curvas de Envelope estabelecidas pelo ajuste da equação de Gompertz no limite para a memória (k bytes) e velocidade (k OPS) dos computadores mostram duas ondas tecnológicas, sendo a segunda extrapolada até o ano 2000 para fornecer as futuras especificações de projeto.

Palavras-chave:

- previsão tecnológica
- curva de envelope
- curvas S
- aviação militar
- computadores de bordo

INTRODUÇÃO

Suponha-se o seguinte cenário: você é um gerente técnico que foi escolhido para gerenciar um programa de desenvolvimento de um produto que permitirá à sua firma competir no mercado internacional. O produto deve ser uma geração de computadores de bordo radicalmente nova, capaz de controlar os mais avançados sistemas aviônicos das futuras aeronaves de combate.

Você é considerado o *expert* técnico no assunto na sua empresa devido à sua experiência na área de computadores, porém, nunca desenvolveu exatamente esse tipo de produto anteriormente.

O Diretor Técnico espera que você apresente os objetivos de desempenho para essa nova geração de computadores de bordo na próxima reunião do Conselho Executivo, daqui a dois meses, para que o programa possa ser oficialmente formalizado.

Como poderá definir esses objetivos de desempenho, que visam atingir um alvo daqui a cinco anos, se você nem mesmo tem certeza de como aquele alvo é hoje?

Este não é um cenário incomum no mundo dinâmico da tecnologia de ponta. Para designar hoje os padrões da tecnologia de amanhã, há que se confiar mais do que apenas na experiência e intuição de como as coisas provavelmente serão desenvolvidas. Dever-se-á fazer uso da informação passada e presente de forma sistemática, lógica e reproduzível, que permita diagnosticar, com o menor grau de incerteza possível, em que sentido as coisas pareçam estar direcionadas.

Só assim, são obtidas as condições para aplicar-se o julgamento normativo, com base na própria experiência e intuição, avaliando as projeções em termos de suas probabilidades de execução e aceitabilidade, e definindo o que se acredita representar o futuro **estado da arte**, a fronteira tecnológica, na época em que essa nova geração de produtos estiver concluída para ser comercializada.

Desta forma, pode-se traçar os objetivos de desempenho para a futura geração de computadores que, seguramente, residirão em uma de três hipóteses:

- avançar além da fronteira tecnológica projetada (a que custo? com qual risco de falha técnica?);
- permanecer dentro dos limites projetados para o estado da arte (onde se sabe que a competição será acirrada); ou
- decidir trabalhar bem abaixo da fronteira tecnológica projetada, para se reduzir custos e riscos de desenvolvimento, aumentando a confiabilidade (com menores chances de vender o produto).

Aqui estão sendo abordadas técnicas de previsão tecnológica que identificam os estágios passados (tendências históricas) possibilitando projetar para onde está aprovada a evolução da tecnologia (tendências extrapoladas).

O objetivo deste artigo é tratar a primeira parte do problema de previsão tecnológica, isto é, o estabelecimento de tendências que caracterizem a futura fronteira tecnológica, não abordando, portanto, a tendência média da tecnologia em questão.

Para tanto, será demonstrada a utilidade de uma técnica

conhecida como a Curva de Envelope ou envolvente que, conceitualmente, é muito simples, porém pouquíssimo empregada em previsão de tecnologia.

O conceito e a metodologia da Curva de Envelope serão descritos na próxima seção. Como exemplo, a técnica será aplicada ao caso descrito no cenário introdutório, ou seja, à definição da tendência de desempenho máximo para as próximas gerações de computadores de bordo de aeronaves de combate. Todos os dados utilizados e principais cálculos efetuados nesta análise estão apresentados como um guia para o leitor interessado em aplicar esta técnica nos anexos 1, 2 e 3.

A CURVA DE ENVELOPE

Conceituação

Há muito que os tecnólogos estão cientes de que qualquer processo de desenvolvimento de tecnologia pode ser caracterizado pela **Curva em S**. Este nome origina-se de sua forma, que aparece em gráfico quando dispostos os principais parâmetros de desempenho de uma tecnologia como função do tempo ou dos recursos investidos.

Quando traçados, no mesmo gráfico, os parâmetros técnicos dos desenvolvimentos tecnológicos individuais, restritos a um mesmo campo de tecnologia, freqüentemente se observa uma sucessão de curvas em S, geralmente se sobrepondo em suas extremidades, ilustrando o ritmo de avanço desse campo como um todo.

Ayres (1968) foi um dos primeiros a empregar esse fenômeno na previsão tecnológica e descreveu a utilidade da curva tangencial às curvas individuais em S, denominada Curva de Envelope, para prever o nível de desempenho máximo da próxima geração de tecnologia nesse campo.

O conceito de Curva de Envelope é ilustrado na figura 1. Nessa concepção, a Curva de Envelope é uma grande curva em S superposta sobre várias curvas em S menores, definindo o limite superior do desempenho técnico para essas tecnologia

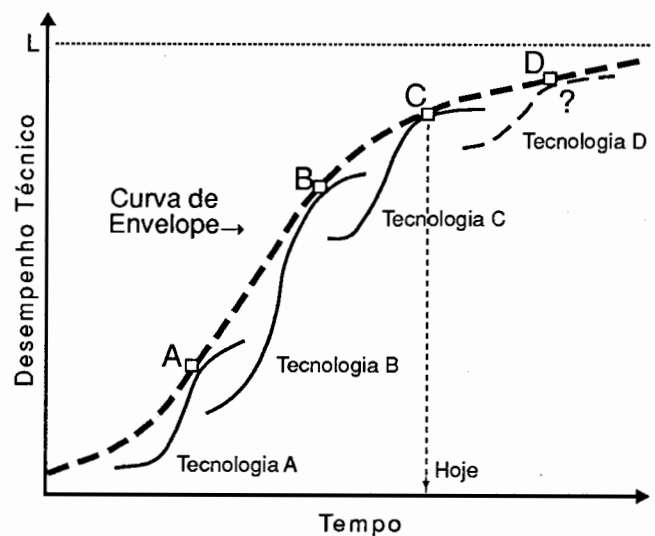


Figura 1: A Curva de Envelope e a Postulação da Próxima Geração de Tecnologia (Ponto D)

(pontos A, B e C) e, o que é importante, indiferentemente das suas configurações individuais e composições tecnológicas específicas.

A questão óbvia, então, seria indagar se é razoável extrapolar a curva A-B-C para prever o provável desempenho máximo (ponto D), em certa época, no futuro.

Jones & Twiss (1986) oferecem a seguinte resposta à questão: "Existem exemplos suficientemente citados pela literatura, resultantes de pesquisa histórica, que dão, a quem vai fazer a previsão; alguma confiança quanto à provável manutenção dessa relação no desenvolvimento futuro de um parâmetro, pelo menos a curto prazo, se for possível estabelecer uma linha de tendência das várias tecnologias anteriores".

Ayres (1968) acrescenta: "Embora uma Curva de Envelope possa não ter sua continuidade no futuro, como teve no passado, é usual assumir que tal curva tenha uma evolução suave e uniforme, quando não existirem razões específicas em contrário. Isto baseia-se no fato de que uma taxa de mudança, uma vez estabilizada, adquire uma espécie de inércia. Em outras palavras, a curva é auto-sustentada."

Um argumento convincente para o uso das Curvas de Envelope no estabelecimento dos objetivos técnicos de um programa, semelhante ao caso descrito no cenário da introdução deste artigo, é dado por Ayres (1968), que apresenta uma Curva de Envelope cobrindo 25 anos de desenvolvimento de computadores, durante os quais apenas dois modelos (um destinado a aplicações técnicas e outro a comerciais), que se situaram acima da Curva de Envelope, fracassaram e representaram tentativas malsucedidas de se adiantarem ao seu setor industrial. Inversamente, uma especificação significativamente abaixo da Curva de Envelope indicaria um novo modelo com pouca chance de competir comercialmente no futuro mercado.

Assim, o autor conclui ser possível estimar o risco associado à comercialização de um futuro produto, verificando-se quanto distante da Curva de Envelope os parâmetros de desempenho projetados para esse produto se localizam.

Outra característica das curvas de envelope, apontada por Jantsch (1967), é a maior facilidade de identificação da melhoria de desempenho em um particular campo tecnológico através de sua Curva de Envelope, do que pelo tratamento isolado das tecnologias componentes.

Isto é ilustrado na figura 1, onde a curva ajustada através dos pontos A, B e C e extrapolada até D mostra o efeito de saturação pela presença de um limite superior L. Este limite pode permanecer constante no tempo, por exemplo, devido a uma lei física da natureza ou, eventualmente, no caso de limites de engenharia, ser ultrapassado pelo surgimento de inovação radical, tipo *breakthrough*.

Desta forma, quem faz a previsão é forçado a refletir sobre os motivos que levam uma curva à saturação quando é extrapolada a níveis mais elevados de desempenho. Isto pode, inclusive, fornecer indícios úteis sobre o surgimento de uma nova geração de tecnologia.

Metodologia

A metodologia em questão difere pouco daquela descrita

nos livros textos sobre o uso da análise de regressão para séries temporais de dados. Basicamente, busca-se estabelecer uma curva matemática através de uma série de pontos de dados com o melhor ajuste possível.

Adotado esse procedimento, com o rigor da estatística, pode-se extrapolar essa função até um horizonte de tempo futuro que seja razoável para fornecer a previsão requerida.

Para o leitor que não estiver familiarizado com as funções matemáticas básicas usadas no ajuste de séries temporais, sugere-se consultar Jones & Twiss (1986).

A única diferença real entre a Curva de Envelope e a análise padrão de séries temporais é a maneira de se escolher os dados para o ajuste da curva. Para exemplificar, deve-se usar alguns dos dados, apresentados no Anexo 1, para o caso dos computadores de bordo utilizados nos aviões de combate entre 1956 e 1988.

Assim, traça-se o gráfico do parâmetro memória, em *kilobytes*, para cada modelo de computador *versus* o ano em que foi posto em operação pela primeira vez. Utilizando-se uma base semilogarítmica(*) deve-se obter um gráfico que se pareça com a figura 2.

Se fossem usados todos os pontos de dados na análise de regressão, poder-se-ia esperar a tendência média como aquela tracejada na figura 2, devido à multiplicidade de dados em certos anos. Entretanto, interessa estabelecer o envelope desta tecnologia e, então, considerar apenas aqueles pontos de dados representando o único ou os dois melhores espécimes (pontos vazados) de cada ano na análise, desprezando-se dados que estão consideravelmente acima ou abaixo de quaisquer pontos, a fim de estabelecer uma curva matematicamente simples e suave que represente razoavelmente todo o período de desenvolvimento tecnológico em questão.

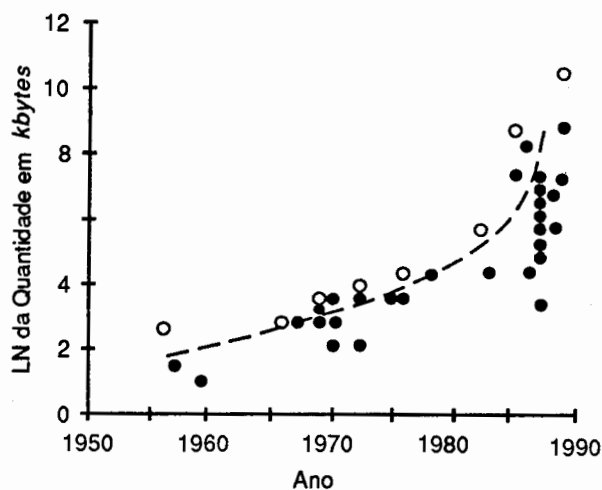


Figura 2: Capacidade de Memória dos Computadores de Bordo

(*) Comumente feito para tecnologias de crescimento rápido (exponencial) a fim de reduzir a diferença de espaço entre maior e menor valores de parâmetro e ajudar a linearizar estes plots de dados.

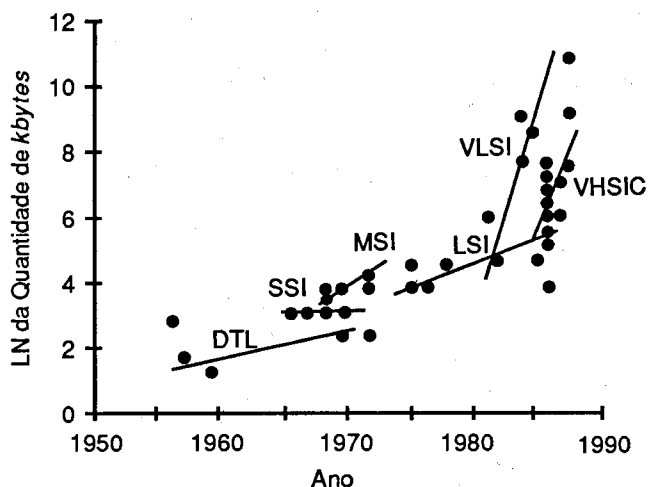


Figura 3: Capacidade de Memória dos Computadores de Bordo - Tecnologias Individuais

Para tanto, é necessário realizar uma seleção de pontos amostrais relativos às tecnologias envolvidas. No caso do estudo efetuado, observa-se, na figura 3, a sucessão de pequenas ondas tecnológicas associadas a cada uma das tecnologias individuais.

Esse critério de seleção de dados e o uso de menor número de pontos no cálculo, torna a Curva de Envelope menos confiável estatisticamente do que uma análise padrão de regressão. Isto, contudo, é o preço que a previsão deve pagar por um benefício maior, ou seja, fornecer um panorama de como um campo tecnológico está se desenvolvendo, sem que se tenha de especificar como um desempenho particular será alcançado a nível tecnológico individual.

Somente após a determinação, pela Curva de Envelope, dos prazos e características gerais da próxima geração de tecnologia, seria feita uma previsão a nível detalhado.

APLICAÇÃO DA TÉCNICA NA AVIÔNICA MILITAR

Definição dos parâmetros técnicos

A literatura especializada estabelece vários atributos típicos para um computador digital aviônico. Entre esses, a pesquisa realizada considerou os seguintes:

- velocidade de processamento;
- capacidade de memória;
- comprimento de palavra;
- confiabilidade;
- tecnologia de circuitos eletrônicos;
- volume;
- massa; e
- custo.

Ao se observar o comportamento dos atributos pesquisados, apresentados na tabela do Anexo 1, conclui-se que aqueles que maior influência sofrem devido ao avanço tecnológico são a velocidade de processamento, a capacidade de memória e o comprimento da palavra.

Por esse motivo, a aplicação dos métodos quantitativos de previsão tecnológica concentrou-se nesses atributos, visando a caracterização dos computadores de bordo mais modernos que provavelmente estarão disponíveis no mundo ocidental até o ano 2000.

Considerando o suporte fornecido pela literatura, pode-se afirmar que os atributos examinados são independentes entre si, isto é, enfocam aspectos diferentes da tecnologia.

Em função da evolução da tecnologia de circuitos eletrônicos, por exemplo, observa-se que tanto a velocidade de processamento quanto a capacidade de memória aumentam.

Isto poderia ensejar que os dois atributos fossem interdependentes. No entanto, a velocidade é limitada intrinsecamente pelos fenômenos elétricos nas camadas de dopagem dos semicondutores, enquanto a capacidade de memória é limitada pela dissipação de potência nos circuitos.

Procedimento

Ao ser ajustado um modelo de previsão tecnológica de cada um dos atributos selecionados, foram seguidos os seguintes passos:

- selecionar o parâmetro de medição do atributo;
- ordenar a série histórica relativa ao atributo;
- traçar os gráficos do valor do parâmetro e do seu logaritmo, a partir da série histórica;
- inspecionar visualmente os gráficos e interpretar qualitativamente as tendências;
- realizar crítica, separação ou censura dos dados utilizados, bem como decidir sobre a existência de ondas tecnológicas diferentes, em função dos valores máximos observados no desempenho;
- escolher o modelo de crescimento mais adequado para ajuste de cada onda tecnológica, incluindo a seleção de valores limites de crescimento, se existirem. Isto deve ser realizado em função do comportamento dos atributos segundo a série histórica ou a partir de opiniões de especialistas;
- realizar transformação de variáveis segundo o modelo escolhido para obtenção de uma relação linear envolvendo desempenho e tempo;
- aplicar a regressão linear;
- decidir sobre a qualidade do ajuste através da avaliação do coeficiente de determinação (r^2). Repetir os passos anteriores (a partir do 5º), se julgado necessário;
- escolher um intervalo de confiança adequado à qualidade do ajuste do modelo;
- realizar a antitransformação de variáveis;
- traçar os gráficos definitivos de:
 - valor do parâmetro do atributo;
 - logaritmo neperiano do valor do parâmetro do atributo;
 - modelo linear ajustado;
 - valor esperado do parâmetro do atributo, nas datas de previsão, segundo o modelo adotado.

Extrapolação das tendências tecnológicas

A análise de cada atributo foi considerada satisfatória,

conforme o método acima estabelecido: tanto o modelo de Gompertz, para a velocidade e capacidade de memória, como o modelo linear, para o caso do comprimento de palavra. A título de exemplo, apresentam-se no Anexo 2 os cálculos efetuados para o parâmetro capacidade de memória e no Anexo 3 está apresentado o modelo de crescimento de Gompertz.

Análise de tendência dos parâmetros

Da análise realizada concluiu-se que existem duas ondas tecnológicas:

1ª Onda Tecnológica

- Inicia-se na década de 50 com a descoberta dos semicondutores, envolvendo as seguintes tecnologias:
 - componentes semicondutores discretos (diodos e transistores);
 - tecnologia de circuitos integrados (SSI, MSI e LSI).
 Isto é, engloba as 2ª, 3ª, 4ª e 5ª gerações de circuitos eletrônicos.

2ª Onda Tecnológica

- Iniciando-se na década de 80, com a utilização de circuitos integrados em larga escala e envolvendo as tecnologias VLSI e VHSIC, engloba as 6ª e 7ª gerações de circuitos eletrônicos.

Embora se saiba que o surgimento de cada tecnologia de circuito integrado diferente provocou uma microonda tecnológica, a curva em S individual, os dados coletados não permitem precisão de observação capaz de discriminar esses efeitos de *per se*. Assim, justifica-se o modelamento de duas macroondas, como descritas acima.

A figura 4, relativa à capacidade de memória, mostra claramente os perfis de duas ondas tecnológicas, cada uma delas ajustada com um modelo de crescimento do tipo Gompertz.

Os futuros sistemas

A partir dos resultados da pesquisa pode-se afirmar, com

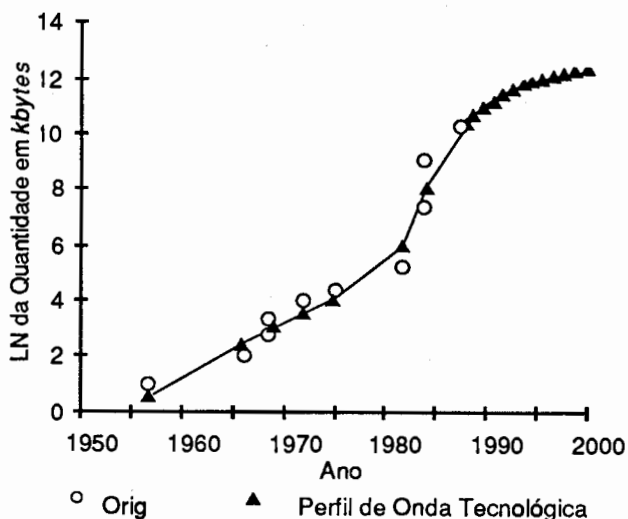


Figura 4: Capacidade de Memória dos Computadores de Bordo projetadas até o ano 2000 - Ondas Tecnológicas

grau de confiança de 80%, que os futuros sistemas aviônicos das aeronaves de combate do ano 2000 incorporarão computadores tais que sua velocidade de processamento, capacidade de memória e comprimento de palavra poderão atingir as cifras listadas a seguir:

- velocidade de processamento:
 - mínima: 20.000 kOPS
 - mais provável: 42.000 kOPS
 - máxima: 75.000 kOPS
- capacidade de memória:
 - mínima: 110.000 k bytes
 - mais provável: 170.000 k bytes
 - máxima: 190.000 k bytes
- comprimento de palavra:
 - mínimo: 42 bits
 - mais provável: 68 bits
 - máximo: 94 bits

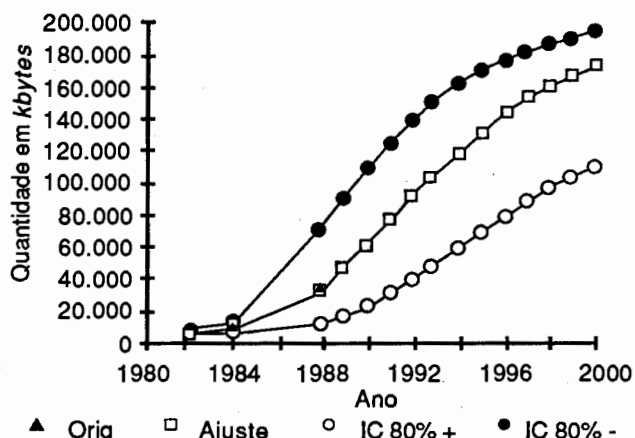


Figura 5: Curvas de Presivão Tecnológica Projetadas até o ano 2000 - Capacidade de Memória dos Computadores de Bordo

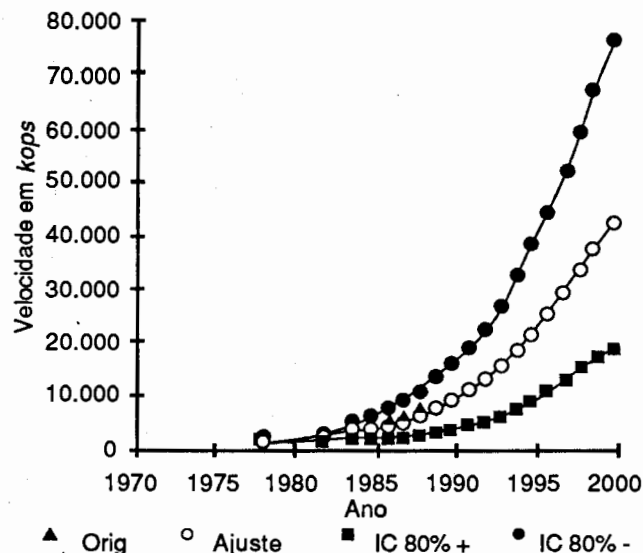


Figura 6: Curvas de Previsão Tecnológica Projetadas até o ano 2000 - Velocidade de Processamento dos Computadores de Bordo

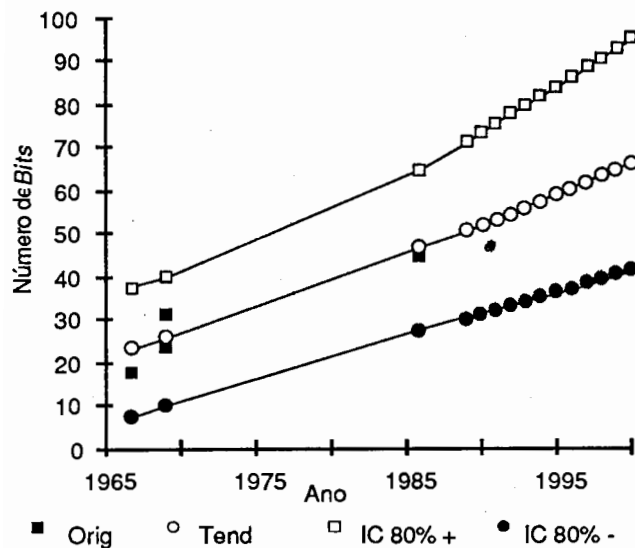


Figura 7: Curvas de Previsão Tecnológica Projetadas até o ano 2000 - Comprimento de Palavras dos Computadores de Bordo

São apresentadas nas figuras 5, 6 e 7 as curvas de previsão para a capacidade de memória, velocidade de processamento e comprimento de palavra projetadas até o ano 2000.

RESUMO E PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A previsão adequada de vantagens técnicas em indústrias de tecnologia de ponta é especialmente importante porque os prazos necessários para se colocar um produto complexo no mercado são muito longos.

Essas vantagens técnicas geralmente se apresentam na forma de uma série de curvas em S quando colocadas em gráfico em função do tempo.

Uma técnica apropriada para previsão da provável evolução de um campo particular de tecnologia é a Curva de Envelope. A Curva de Envelope é uma curva hipotética, tangente ao limite superior de cada curva em S, individual, em uma dada série. Assim, a Curva de Envelope descreve o desempenho máximo a ser obtido para um parâmetro funcional particular com relação à especificidade da tecnologia

futura.

Por conseguinte, a Curva de Envelope permite a previsão da fronteira superior ou desempenho máximo da próxima geração de vantagens técnicas em um dado campo tecnológico.

Este artigo demonstrou a utilidade da Curva de Envelope através de sua aplicação a um caso de tecnologia de ponta: a evolução da aviação, particularmente, dos computadores de bordo em aeronaves militares até o ano 2000.

Foram coletados dados de 46 sistemas de computadores de bordo de aeronaves militares que surgiram entre 1956 e 1988. A partir deles, três parâmetros técnicos primários (velocidade de processamento em KOPS, capacidade de memória em KBYTES e comprimento de palavras em BITS) foram analisados em função do ano de introdução desses sistemas no mercado, bem como vários outros parâmetros secundários.

Essa análise mostrou que a evolução dos parâmetros velocidade e memória ocorreram em duas ondas: a primeira saturando em meados dos anos 70 e a segunda acelerando rapidamente durante a metade da década de 80. Cada uma dessas ondas é composta de várias tecnologias de circuitos eletrônicos empregados nos computadores (componentes discretos, SSI, MSI, LSI, VLSI e VHSIC).

As Curvas de Envelope foram estabelecidas para cada onda da seguinte maneira:

- seleção dos valores máximos dos parâmetros em cada onda como sendo valores para uma previsão formal;
- ajuste da função matemática de Gompertz e função linear a esses valores pelo método dos mínimos quadrados;
- cálculo estatístico do ajuste (estimativa da variância, desvio padrão, coeficiente de correlação e intervalo de confiança de 80%).

A Curva de Envelope da segunda onda e seus intervalos de confiança são, então, extrapolados até o ano 2000 visando fornecer previsões dos máximos valores dos parâmetros operacionais dos computadores de bordo dos futuros sistemas aviônicos das aeronaves de combate.

Através dessa análise, mostrou-se como o simples conceito da Curva de Envelope pode ser quantificado e aplicado à previsão da fronteira superior ou máximo desempenho da próxima geração de tecnologia de ponta.

Anexo 1:
Parâmetros Técnicos dos Computadores de Bordo de Aeronaves Militares

Ano	Computador (Nome)	Fabricante (Nome)	Tecnologia (Tipo)	Aeronave (Tipo)	Desempenho (kOps)	Memória (k Bytes)	Palavra (Bits)	MTBF (Horas)
1956	Digitar	HUGHES	VALVULA	F-106	2	13.3	19	10
1957			DTL	C-130 AWADS, C-141		4	25	
1959	APQ-81	WESTINGHOUSE	DTL	USN EAGLE AERIES	90	2.7		2
1966	CP-2	IBM	SSI	F-111	150	16	18	750
1967	TC-2	IBM	SSI/TTL	A-7 D		16	16	
1967	CP-2	IBM	SSI/TTL	F-111 D/F,FB-111 A		16	16	
1969	HCM-231	HUGHES	MSI	F-15		16	24	
1969	AP-1	IBM	MSI/TTL	F-15		24	32	
1969	2520-2	TEXAS INST.	MSI/TTL	F-15		32	16	
1970	1601	ROLM			148			
1970	NDC-1060	NORDEN	MSI/DTL	T-43 UNTS		8	28	
1970	AP-1	IBM	MSI	F-15	430	16	32	1000
1970	SKC-2037	SINGER	MSI/TTL	JA-37 VIGGEN		32	32	
1972	LC-4516	LITTON	MSI/TTL	B-1		8	16	
1972	SKC-2070	SINGER	MSI/TTL	B-1		32	32	
1972	AP-2	IBM	MSI/TTL	B-1		48	16	
1973	1602	ROLM			429			
1974	M-362 F	DELCO	LSI CUSTOM	F-16	400	32	16	2000
1975	362 F	DELCO	LSI	F-16		32	16	
1975	AN/UYK-30	HUGHES	LSI	DAIS DISPLAYS	370	64	16	20000
1976	1650	ROLM			429			
1978	AP-101 C	IBM	LSI/MSI	B-52 G/H	500	64	32	2131
1982	SK-3140	SINGER		AM-X	740	64	16	3600
1982	750 A	TELEDYNE	VLSI	F-20	650	256	16	4000
1984	1666B	ROLM			410	2048	16	
1984	HAWK 32	ROLM	VLSI		1300	8000	32	
1985	HSM 1750 A	SANDERS			1780	64		
1985	D 80	ERICSSON	VLSI	JAS39,SEA HARR,EFA	1000	4000	32	
1986	LSI-11 M	NORDEN	LSI		200	32	16	
1986	SKCV-3007	SINGER	LSI	A-7 D/K	700	128	16	2560
1986	AN/AYK-18	SINGER	LSI	F-111	700	128	16	3026
1986	PDP 11/34 M	NORDEN	LSI		400	128	16	
1986	MAGIC V	DELCO	VLSI		1000	192	16	
1986	750 V	TELEDYNE	VHSIC	F-16, F-20	2000	256	32	
1986	SECS 80	SES			355	512	16	
1986	MSE/14MICRO	ROLM			225	832	16	
1986	M 572	DELCO	VLSI	F-111	5000	1000	48	
1986	PDP 11/70 M	NORDEN			850	2000	32	
1987	ULISS 91	SAGEM	LSI		830		16	
1987	UCG 90	SAGEM			1000	256	16	
1987	MIL 1750 A	FERRANTI			6000	1000	32	
1988	VHSIC TECH	TELEDYNE			4000			
1988	7000	GOULD	VLSI		6000		32	
1988	1750 A	TEXAS INST.	VHSIC		7000	1700	16	
1988	MIL VAX II	NORDEN			1500	8000	32	
1988	860	RAYTHEON			4800	32000	32	

Anexo 2:
Ajuste de Curvas pelo Método dos Mínimos Quadrados

Ajuste da 1ª Onda Tecnológica

Atributo: Capacidade de Memória
Parâmetro: Milhares de bytes
Intervalo: 1956 a 1975

Atributo (Parâm) Ano	Desempenho (kOps)	Palavra (Bits)	Memória (k Bytes)	Tecnologia (Tipo)	Custo (1000 US \$)	MTBF (Horas)	Volume (Pes Cub)
1957	150	25	4	DTL	85.0	750	0.83
1966		18	16	SSI			
1969		32	24	MSI/TTL			
1969		16	32	MSI/TTL			
1972	370	16	48	MSI/TTL	5.0	20000	0.02
1975		16	64	LSI			

Massa (Libras)	Computador (Nome)	Fabricante (Nome)	Aeronave (Tipo)	Bibliografia (Número)	Sort Order
47	CP-2	IBM	C-130 AWADS, C-141	11.12	2
	AP-1	IBM	F-111	3	4
	2520-2	TEXAS INST	F-15	11.14	8
	AP-2	IBM	F-15	11.16	9
1	AN/JYK-30	HUGHES	B-1	11.21	16
			DAIS DISPLAYS	6	20

(Função de Zim)

Ano	Memória (K Bytes)	Zim	In (Zim)	Yim	T ^{1/2}	Ti*Yim	Yic	(T-Tmed) ²
1957	4	4	1.386294	1.247388	3829849	2441.139	1.377251	121
1966	16	16	2.772588	0.739527	3865156	1453.911	0.591458	4
1969	24	24	3.178053	0.524421	3876961	1032.585	0.329527	1
1969	32	32	3.465735	0.337756	3876961	665.0417	0.329527	1
1972	48	48	3.871201	-0.00367	3888784	-7.24374	0.067596	16
1975	64	64	4.158883	-0.34439	3900625	-680.173	-0.19433	49
1989					3956121		-1.41667	441
1990					3960100		-1.50398	484
1991					3964081		-1.59129	529
1992					3968064		-1.67861	576
1993					3972049		-1.76592	625
1994					3976036		-1.85323	676
1995					3980025		-1.94054	729
1996					3984016		-2.02785	784
1997					3988009		-2.11516	841
1998					3992004		-2.20247	900
1999					3996001		-2.28978	961
2000					4000000		-2.37709	1024

(Função Inv de Yim)

Ano	(Ym-Yc) ²	(Yc-Ymed) ²	Smed(R,T)	Smed(F,T)	Y+	Y-	Zic	Z+	Z-
1957	0.0168644	0.922394718	0.1442419	0.2165984	1.708647	1.045856	2.468328	0.519985	7.551151
1966	0.0219243	0.030492387	0.0699676	0.1760812	0.860863	0.322054	21.34702	12.21094	32.70652
1969	0.0379834	0.007623096	0.0669888	0.1749190	0.597153	0.061901	32.36970	21.12789	44.86584
1969	0.0000677	0.007623096	0.0669888	0.1749190	0.597153	0.061901	32.36970	21.12789	44.86584
1972	0.0050794	0.121969549	0.0807916	0.1806555	0.343999	-0.20880	44.59406	31.72027	57.74184
1975	0.0225171	0.373531745	0.1049514	0.1926757	0.100459	-0.48912	57.06276	43.02819	70.41270
1989			0.2536158	0.3007160	-0.95658	-1.87677	102.0044	88.52909	111.5476
1990			0.2648930	0.3102861	-1.02925	-1.97872	104.0938	90.94548	113.2150
1991			0.2762022	0.3199950	-1.10170	-2.08089	106.0460	93.24507	114.7453
1992			0.2875395	0.3298304	-1.17396	-2.18325	107.8672	95.43039	116.1473
1993			0.2989017	0.3397814	-1.24605	-2.28578	109.5635	97.50436	117.4297
1994			0.3102861	0.3498380	-1.31797	-2.38848	111.1415	99.47025	118.6010
1995			0.3216904	0.3599914	-1.38975	-2.49132	112.6074	101.3315	119.6695
1996			0.3331124	0.3702337	-1.46139	-2.59430	113.9678	103.0919	120.6431
1997			0.3445505	0.3805577	-1.53290	-2.69741	115.2289	104.7553	121.5292
1998			0.3560030	0.3909569	-1.60430	-2.80063	116.3967	106.3255	122.3349
1999			0.3674687	0.4014255	-1.67560	-2.90396	117.4774	107.8066	123.0669
2000			0.3789463	0.4119581	-1.74679	-3.00738	118.4764	109.2023	123.7315

Será procedido ajuste do modelo: GOMPERTZ como segue:

$$Z = L * \exp(-a * \exp(-b * t))$$

Legenda

t — Ano
 Z — Capacidade de memória em kbytes
 L — Limite de crescimento da capacidade de memória em kbytes

Queremos ajustar o seguinte modelo linear: $Y = A + B * t$ com:

Transformação	Antitransformação
$Y = \ln(-\ln(Z/L))$	$Z = L * \exp(-\exp(Y))$
$A = \ln(a)$	$a = \exp(A)$
$B = -b$	$b = -B$

Supondo-se limite de crescimento $L=130$

Temos $n=$ 6 dados
 Temos $GL=$ 4 graus de liberdade

Soma $T=$	11808	$Tmed=$	1968
Soma $T^2=$	23238336	$Ymed=$	0.416838095
Soma $T*Y=$	4905.2606465	$B=$	-0.08731034
Soma $Y=$	2.5010285738	$A=$	172.2436026

Estimativa da variância, desvio padrão, coeficientes de determinação e correlação

Soma $(T_i - T_{med})^2 =$ 192
 Soma $(Y_{im} - Y_{ic})^2 =$ 0.104436
 Soma $(Y_{ic} - Y_{med})^2 =$ 1.463634

$S^2(Y,T) =$ 0.0174061025 $S(Y,T) =$ 0.131932189
 $S^2(Y_{ic}) =$ 0.2439390990 $r^2(Y,T) =$ 0.933398040
 $S^2(Y_{im}) =$ 0.2613452015 $r(Y,T) =$ 0.966125271

$Smed^2(Y,T) =$ 0.0261091537 $Smed(Y,T) =$ 0.161583271
 $Smed^2(Y_{cm}) =$ 0.0043515256 $Smed(Y_{cm}) =$ 0.065966094
 $Smed^2(B) =$ 0.0001359852 $Smed(B) =$ 0.011661268

Desejando-se um intervalo de confiança de 80% com 4 graus de liberdade, tem-se da distribuição de STUDENT:

t student = 1.53

Ajuste da 2ª Onda Tecnológica

Atributo: Capacidade de Memória
 Parâmetro: Milhares de bytes
 Intervalo: 1982 a 1988

Atributo (Parâm) Ano	Desempenho (kOps)	Palavra (Bits)	Memória (k Bytes)	Tecnologia (Tipo)	Custo (1000 US \$)	MTBF (Horas)	Volume (Pes Cub)
1982	650	16	256	VLSI		4000	0.30
1984	410	16	2048				1.50
1984	1300	32	8000	VLSI	150.0		1.38
1988	4800	32	32000				0.88

Massa (Libras)	Computador (Nome)	Fabricante (Nome)	Aeronave (Tipo)	Bibliografia (Número)	Sort Order
16	750 A	TELEDYNE	F-20	7.1	24
90	1666B	ROLM		5.2,14	25
90	HAWK 32	ROLM		5.1,12	26
83	860	RAYTHEON		4	46

(Função de Zim)

Ano	Memória (K Bytes)	Zim	In (Zim)	Yim	Ti ²	Ti*Yim	Yic	(T-Tmedy) ²
1982	256	256	5.545177	1.896253	3928324	3758.375	1.820114	6.25
1984	2048	2048	7.624618	1.522016	3936256	3019.680	1.402628	0.25
1984	8000	8000	8.987196	1.169032	3936256	2319.359	1.402628	0.25
1988	32000	32000	10.37349	0.605725	3952144	1204.182	0.567656	12.25
1989					3956121		0.358912	20.25
1990					3960100		0.150169	30.25
1991					3964081		-0.05857	42.25
1992					3968064		-0.26731	56.25
1993					3972049		-0.47605	72.25
1994					3976036		-0.68480	90.25
1995					3980025		-0.89354	110.25
1996					3984016		-1.10228	132.25
1997					3988009		-1.31103	156.25
1998					3992004		-1.51977	182.25
1999					3996001		-1.72851	210.25
2000					4000000		-1.93726	240.25

(Função Inv de Yim)

Ano	(Ym-Yc) ²	(Yc-Ymed) ²	Smed(R,T)	Smed(F,T)	Y+	Y-	Zic	Z+	Z-
1982	0.0057971	0.272335573	0.1483894	0.2450571	2.283272	1.356956	417.1748	10.99391	4112.220
1984	0.0142534	0.010893422	0.1000441	0.2191858	1.816889	0.988367	3429.601	425.5491	13619.09
1984	0.0545672	0.010893422	0.1000441	0.2191858	1.816889	0.988367	3429.601	425.5491	13619.09
1988	0.0014492	0.533777723	0.1844723	0.2684466	1.075020	0.060291	34267.25	10678.84	69142.59
1989			0.2237055	0.2967789	0.919825	-0.20199	47777.04	16272.31	88342.55
1990			0.2646920	0.3287787	0.771561	-0.47122	62569.99	22992.67	107133.7
1991			0.3067296	0.3634785	0.628401	-0.74554	77883.04	30682.92	124442.4
1992			0.3494392	0.4001767	0.489017	-1.02365	93026.69	39157.97	139635.6
1993			0.3926016	0.4383716	0.352462	-1.30458	107457.0	48218.87	152479.6
1994			0.4360824	0.4777043	0.218058	-1.58766	120798.9	57665.40	163026.8
1995			0.4797950	0.5179158	0.085315	-1.87240	132835.9	67306.51	171496.7
1996			0.5236813	0.5588163	-0.04612	-2.15845	143481.6	76968.46	178183.4
1997			0.5677011	0.6002650	-0.17653	-2.44553	152745.8	86500.01	183394.1
1998			0.6118255	0.6421558	-0.30610	-2.73344	160702.7	95775.30	187414.4
1999			0.6560335	0.6844074	-0.43498	-3.02204	167464.2	104694.3	190493.1
2000			0.7003092	0.7269570	-0.56331	-3.31121	173160.5	113182.0	192837.0

Será procedido ajuste do modelo: GOMPERTZ como segue:

$$Z = L * \exp(-a * \exp(-b * t))$$

Legenda

t — Ano
 Z — Capacidade de memória em kbytes
 L — Limite de crescimento da capacidade de memória em kbytes

Queremos ajustar o seguinte modelo linear: $Y = A + B * t$ com:

Transformação

$$Y = \ln(-\ln(Z/L))$$

$$A = \ln(a)$$

$$B = -b$$

Antitransformação

$$Z = L * \exp(-\exp(Y))$$

$$a = \exp(A)$$

$$b = -B$$

Supondo-se limite de crescimento $L=20.000$

Temos $n=$ 4 dados
 Temos $GL=$ 2 graus de liberdade

Soma	T =	7938	Tmed =	1984.5
Soma	T ² =	15752980	Ymed =	1.298257003
Soma	T*Y =	10301.597977	B =	-0.20874312
Soma	Y =	5.1930280154	A =	415.5489862

Estimativa da variância, desvio padrão, coeficientes de determinação e correlação

Soma (Ti-Tmed) ² =	19
Soma (Yim-Yic) ² =	0.076067
Soma (Yic-Ymed) ² =	0.827900

S2 (Y,T) =	0.0190167907	S (Y,T) =	0.137901380
S2 (Yic) =	0.2069750358	r2 (Y,T) =	0.915851865
S2 (Yim) =	0.2259918265	r (Y,T) =	0.957001496

Smed2 (Y,T) =	0.0380335814	Smed (Y,T) =	0.195022002
Smed2 (Ycm) =	0.0095083954	Smed (Ycm) =	0.097511001
Smed2 (B) =	0.0020017674	Smed (B) =	0.044741115

Desejando-se um intervalo de confiança de 80% com 2 graus de liberdade, tem-se da distribuição de STUDENT:

t student = 1.89

Anexo 3: O Modelo de Gompertz

O modelo de Gompertz é dado pela equação abaixo,

$$Z = L e^{-a} e^{-b t}$$

com:

- Z — Parâmetro técnico
- L — Limite de Crescimento do Parâmetro
- a,b — Constantes Arbitrárias
- e — 2.718281828...

A curva de Gompertz tem a forma apresentada na figura abaixo e apresenta um ponto de inflexão em $t = (\ln a) / b$ correspondendo a um valor $Z = L/e$. Para $t = 0$, a ordenada $Z = \exp(L/b)$.

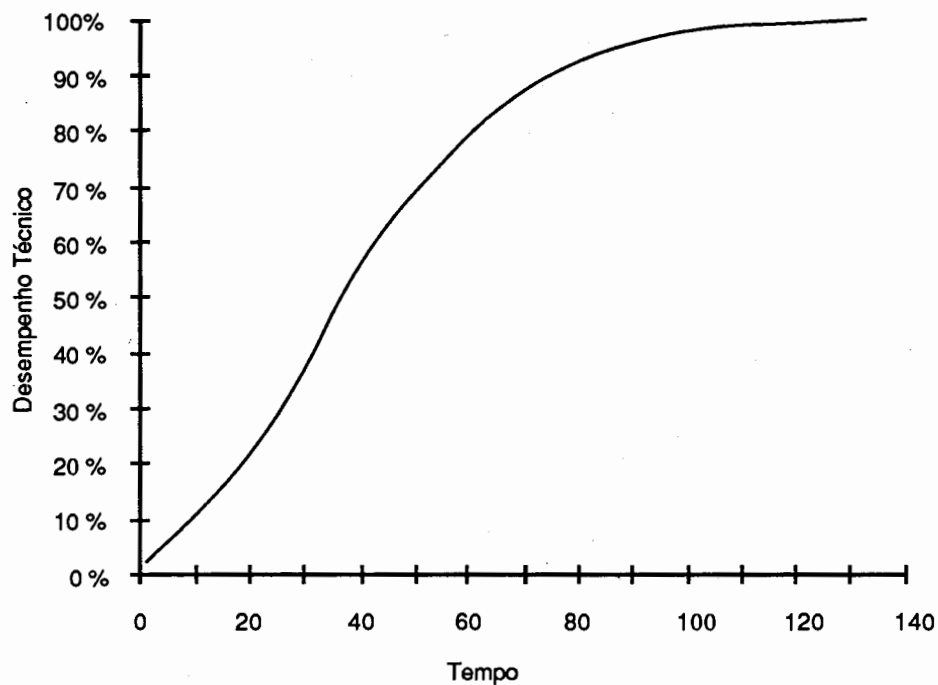


Figura: Curva de Gompertz

Quando do ajuste de regressão linear, é possível fazer uma transformação de variáveis no modelo de Gompertz para linearizá-lo na forma:

$$Y = A + B t$$

Para tanto, as seguintes transformações de variáveis são válidas:

$Y = \ln(-\ln(Z/L))$	$Z = L \cdot \exp(-\exp(Y))$
$A = \ln(a)$	$a = \exp(A)$
$B = -b$	$b = -B$

Abstract

This paper elaborates on a forecasting technique known as the Envelope Curve for the purpose of illustrating its utility in estimating design specifications (technical parameters) of the next generation of a specific technology. The Envelope Curve represents the leading edge of the technical parameter being analyzed and, when extrapolated into the future, provides an upper bound for the design specification of the new technology under consideration. The first half of the paper reviews the sparse literature available on the Envelope Curve and explains the theoretical concepts and methodology of the technique. The second half of the paper illustrates step by step the application of the technique to forecast the technical parameters of on-board computers in the avionics of aircraft. Envelope Curves established by fitting the Gompertz equation to leading edge data for computer memory (k bytes) and velocity (k OPS) show two technological waves, the second of which is extrapolated to the year 2000 to provide the future design specifications.

Uniterms:

- technological forecasting
- envelope curve
- S curves
- military avionics
- on-board computers

Referências Bibliográficas

AYRES, R. U. Envelope curve forecasting in *Technology forecasting for industry and government*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc, 1968.

JONES, H. & TWISS, B. C. *Previsão tecnológica para decisões de planejamento*. Rio de Janeiro, Zahar, 1986.

JANTSCH, E. *Technological*

forecasting in perspective. Paris, Organization for Economic Cooperation and Development, 1967.

Recebido em novembro/89