

MÉTODOS "PERT" E "CPM": PROBLEMAS E APLICAÇÕES

GRACIANO SÁ

"A escolha racional depende da construção de alternativas, das quais uma somente chega a realizar-se."
— BERTRAND RUSSELL.

Circunstâncias excepcionais decorrentes do desenvolvimento tecnológico à taxa exponencial dos dias de hoje têm sido causa de embaraços novos também em áreas administrativas, sobretudo as ligadas ao planejamento e controle da produção. Nesse particular faltam recursos às soluções rotineiras de outrora, seja para atribuir às variáveis sua verdadeira natureza aleatória, seja para atacar o problema de forma rigorosamente matemática, embora determinística.

De alguns anos para cá, os métodos PERT e CPM têm sido largamente difundidos como soluções novas dos problemas contemporâneos de planejamento e controle da produção. O artigo em pauta focaliza a natureza específica das situações às quais se aplicam PERT e CPM, indicando as severas limitações daqueles modelos na solução dos problemas que tentam aproximadamente resolver.

De oito anos para cá, no glossário próprio das técnicas de planejamento e controle da produção duas palavras — PERT e CPM — têm aparecido em relêvo de certa forma

GRACIANO SÁ — Instrutor de Ensino na Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul, atualmente servindo no Escritório de Pesquisa Econômica. Aplicada do Ministério e Extraordinário para o Planejamento e Coordenação Econômica.

merecido. Tenho observado, e não sem curiosidade, a presença, sobretudo de PERT, mesmo em periódicos brasileiros, onde, ao que parece, perdeu encanto a divulgação pura e simples do mistério que envolve siglas tão curtas, para ceder lugar a ambiciosas modificações nos modelos correspondentes. Mais recentemente, e de forma inequívoca, PERT e CPM têm sido citados em textos publicitários, como que para atestar a excelência técnica do anunciante.

Proponho-me neste artigo a conversar com o leitor sobre PERT e CPM, avançando a idéia, sem querer polemizar, de que talvez seja melhor observar PERT como instrumento próprio de controle da produção, e CPM como instrumento específico de planejamento.

Por planejamento entende-se uma rotina antecipada de ação. Controle, por sua vez, é o confronto periódico e sistemático, do planejado com o realizado e a adoção de medidas corretivas correspondentes. *Dados* fundamentais para o planejamento da produção, portanto, são o *roteiro* de execução, ou seja, a lista exaustiva e ordenada das operações necessárias à execução, os *tempos* de execução e o montante dos *recursos* disponíveis à produção.¹ Elementos pertinentes ao controle da produção, por sua vez, são os associados à organização burocrática do processo produtivo ou, mais precisamente, ao *sistema de informações* de que a gerência disponha para atuar antes — e nunca depois — de o fato estar consumado.

Isso pôsto, o leitor está a vê-lo, são triviais os problemas de planejamento em processos de produção altamente repetitivos, sobretudo porque nesses casos a experiência acumulada favorece a reunião dos dados relevantes necessários. Essa acumulação de experiências permite a estimativa dos tempos de produção com tão pequena margem de erro, em relação a um valor esperado, que as estimativas deixam de ser aleatórias para assumir configuração prá-

1) Talvez fôsse desejável, também, o conhecimento específico dos *lotes de produção*, mas para os fins a que se propõe êste contexto os lotes de produção não são relevantes.

tica determinística. Quer dizer, torna-se lícito afirmar "a tarefa realiza-se em 5 minutos", em lugar de afirmar, como é correto, "a tarefa realiza-se em *aproximadamente* 5 minutos". Tempos determinísticamente prevalentes e processos sólidos porque tradicionalmente operantes concedem ao planejador um estado de *informação perfeita* sobre o valor das variáveis que afetam a solução do seu problema. Daí a trivialidade dessa solução: o que se pede do planejador é, por erros e tentativas, ajustar recursos a tarefas, operação que ele executa normalmente, em face do grande número de soluções lógicas que o problema comporta, em função de uma análise subjetiva do problema alimentada primacialmente por sua própria experiência.

Se são triviais os problemas de planejamento num processo repetitivo de produção, são literalmente inexistentes os de controle. É evidente que parto, nesse particular, da pressuposição sã de que a empresa possui adequado sistema de informações. Logo, uma vez resolvidos os problemas do *que*, do *como*, do *quando* e do *quanto* produzir, a tarefa de controlar decorre de um fluxo de documentação que, em princípio, nada tem que ver com o planejamento propriamente dito, mas que só poderá funcionar bem se o planejamento tiver sido bem realizado.

Problemas de planejamento e controle realmente aparecem quando se procura planejar e controlar o desconhecido, isto é, quando um esquema de recursos deve ser aplicado a um esquema de ação para produzir uma coisa que não se sabe ao certo como será, não se tendo notícia, tampouco, de quanto tempo será necessário para produzi-la, nem ainda de quantos recursos deverão ser-lhe destinados. Sob essas condições, o estado que cerca o planejador é, para não dizer de ignorância, de, no mínimo, *informação imperfeita*.

Três estimativas logo despertam atenção:

- A primeira refere-se ao *custo* total do projeto, vinculado que está à destinação de recursos às macrotarefas em perspectiva (pois, é de supor, o pormenor só pode ser macroscópico sob condições de informação imperfeita).

- A segunda diz respeito ao *tempo* total de execução do projeto, êste dependente não só dos recursos aplicados a cada macrotarefa, como também da complexidade técnica que esteja ligada a essa macrotarefa.
- Finalmente, a terceira refere-se à excelência técnica do projeto, vinculada ao tempo e ao custo, num sem número de interdependências.

"Soluções" para o nôvo quebra-cabeça só podem ser aproximadas ao nível da aplicação prática, pois êsse é o estado atual da investigação acadêmica. O primeiro ditame da prática e a primeira e violenta simplificação consistem em isolar custo, tempo e excelência técnica como variáveis independentes, à procura, portanto, de soluções independentes. Ao nível de contrôle, as aproximações de maior repercussão que dizem respeito a custo e tempo são PERT/custo e PERT/tempo. Fala-se, também, de PERT/*performance* para atender, especificamente, aos problemas de engenharia do projeto; mas, embora conclusões de invulgar interêsse tenham sido obtidas academicamente, nada de prático foi ainda concretizado. Ao nível de planejamento, dizendo respeito exclusivamente à variável *custo*, CPM constitui solução de extraordinário valor, tanto sob o aspecto acadêmico quanto sob o prático, hipoteticamente restringindo o muito de ignorância que cerca o projeto.

PERT e CPM são criaturas do estágio atual de notável progresso tecnológico norte-americano. As inversões públicas norte-americanas em projetos especiais de defesa e nos projetos oriundos da corrida espacial são de volume assombroso. Essas inversões têm sido canalizadas ao setor privado da economia na forma de contratos de prestação de serviços com produtores que, afora razões de ordem política e social, têm suficiente capacidade produtiva (ou reputação técnica) para disputá-los na categoria de contratantes principais. Os contratantes principais, por sua vez, na grande maioria dos casos vêm-se inabilitados para realizar todo o empreendimento e passam a subcontratar empreendedores menores. O leitor poderá facilmente verificar que, dependendo do volume do empreendimento ou de sua

complexidade tecnológica, há uma verdadeira avalanche de subcontratos nas mais desconstruídas regiões do País, sendo às dezenas e até às centenas as companhias que colaboram na consecução de um mesmo projeto.

O único problema daí resultante é que, como os fundos são públicos, ao Governo resta a responsabilidade de controlar o emaranhamento de realizações. Sem falar no problema decorrente da qualidade técnica do projeto, fazer com que as estimativas de custo e tempo inicialmente elaboradas se coadunem com dispêndios realmente verificados e com as demoras inevitáveis do processo de produção é tarefa realmente gigantesca. Estudo realizado em 1962 sobre contratos vinculados ao programa de defesa norte-americana² mostra, em média, para 12 projetos analisados, dispêndios 3,2 vezes maiores que os estimados e tempos 1,36 vezes superiores aos previstos. Antes disso, em fins de 1959, um relatório da *Rand Corporation*³ referente à aquisição de material para a Força Aérea norte-americana indicou que de 22 projetos estudados dois apenas apresentavam dispêndios médios compatíveis com as estimativas. Nos 20 projetos restantes os custos haviam sido subestimados em montantes que variavam de 20 a 5,760 por cento. Somente seis projetos referentes a mísseis, por exemplo, responderam por erros de previsão de 1.760 por cento, em média. Outro estudo, também realizado em 1962,⁴ demonstrou que desvios dessa ordem eram previstos para projetos em realização naquela época. Em 26 projetos estudados, estimativas então correntes de dispêndios variavam para mais, chegando até 502 por cento das estimativas iniciais, com a média de desvio de 80 por cento.

- 2) FREDERIC SCHERER e MERTA PECK, *"The Weapons Acquisition Process"*, Cantabrigia, Mass.: *Research Graduate School of Business Administration*, Universidade de Harvard, 1962.
- 3) A. W. MARSHALL e W. H. MECKLING, *"Predictability of the Cost, and Success of Development"*, *RAND Corporation Report P 1821*, dezembro de 1959, pág. 22.
- 4) THOMAS FINCH, *"Factors that Influence Changes in Cost and Time Schedules of Research and Development Contracts"*, *M. S. Thesis, MIT School of Industrial Management*, junho de 1962.

A tentativa que vem sendo feita nas principais agências contratantes do Governo dos Estados Unidos (dentre as quais as três Secretarias das Fôrças Armadas, a *Comissão de Energia Atômica* e a NASA) no sentido de manter maior vigilância em relação a tempos e dispêndios contratualmente estimados é a do emprêgo sistemático de PERT.⁵

PERT (*Project Evaluation and Review Technique*) foi originalmente concebido por D. G. MALCOM e outros num programa de pesquisas financiado pelo *Escritório de Projetos Especiais* da Marinha Americana por volta de 1958.⁶ Supostamente, a técnica foi a causa fundamental do êxito do programa *Polaris*, e desde então os benefícios de sua aplicação em trabalhos de pesquisa e desenvolvimento têm tido desmedida publicidade.

CPM (*Critical Path Method*), por outro lado, é resultado de estudos numa área da pesquisa operacional a que se vem dando o nome de "fluxos em gráficos", e que tem recebido divulgação, por afinidade matemática, como tópicos aliado à programação linear. Estudos em CPM tiveram início por volta de 1956 por J. E. KELLEY para a *Du Pont*⁷ e foram concluídos com o modelo desenvolvido por FORD e FULKERSON para a *Rand Corporation*.

O fato de CPM manifestar-se como instrumento de planejamento e PERT como de contrôle parece ficar patente nas próprias designações que lhes são correspondentes. Por aliar-se a trabalhos de planejamento, CPM encontra menor campo de aplicação que PERT, em decorrência das premissas que devem ser adotadas para que o modelo tenha validade. Em princípio, o mundo em que CPM atua é determinístico, e o de PERT, probabilístico. *Dados* para a aplicação de CPM são o roteiro de fabricação e a relação funcional — para cada uma das tarefas do projeto —

-
- 5) "*PERT Guide for Management Use*", *Pert Coordinating Group, U.S. Printing Office*, 0-698-452, junho de 1963.
 - 6) D. G. MALCOM, J. H. ROSEBOOM, C. E. CLARK e W. FAZAR, "*Application of a Technique for Research and Development Evaluation*", *Operations Research*, setembro/outubro de 1959.
 - 7) J. KELLEY e M. WALKER, "*Critical Path Planning and Scheduling*", *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, Boston: 1959.

entre tempos e custos de execução. Em consequência, a aplicação de CPM parte da premissa de que se sabe como produzir, sendo o tempo de fabricação decorrência direta dos recursos aplicados a cada tarefa. Como resultado, CPM indica, em função de um tempo de execução total para o projeto, em face do qual o orçamento deva ser minimizado, quais os recursos (e, portanto, quais os custos) correspondentes a cada tarefa do empreendimento. A suposição do modelo — como, aliás, de todos os modelos de aplicação da programação linear — é que as variáveis em jôgo se verificam na prática deterministicamente, devendo, pois, tempos e custos ocorrerem tal como tiverem sido calculados. O leitor percebe, portanto, que CPM se restringe na prática a projetos de pequeno porte, onde as premissas do modelo não tornem falaciosas as conclusões. Explicação mais pormenorizada de CPM torna-se incompatível, pelo avanço do tratamento matemático que comporta, com o tipo de exposição que venho fazendo. O leitor interessado poderá valer-se da literatura especializada a que faço referência nas notas bibliográficas citadas nas margens inferiores destas fôlhas, sobretudo nas de números ⁸ e ⁹ logo abaixo.

PERT, CPM e outras técnicas correlatas têm sido vinculadas, mesmo em periódicos brasileiros, a uma representação desenhada do roteiro de ação do projeto, que, por força de expressão, tem recebido no contexto dos problemas de planejamento e contrôle a designação de "gráfico PERT". Trata-se de uma figuração constituída de setas e círculos cu pontos, tal como a que aparece na Figura 1. Cada seta representa uma específica *tarefa* ou *atividade* referente ao projeto. Cada círculo representa, por sua vez, um *evento*, ou seja, o término de uma ou mais tarefas. Na Figura 1 deixamos explícita a natureza das tarefas e até mesmo o significado de alguns eventos; mas, por via de regra, batizam-se os eventos por números e as tarefas pelos pares

-
- 8) L. R. FORD e D. R. FULKERSON, "*Flows in Networks*", Princeton University Press, 1952.
 - 9) D. R. FULKERSON, "*A Network Flow Computation for Project Cost Curves*", *Management Science*, janeiro de 1961.

ordenados de números correspondentes aos eventos inicial e final.

É interessante e de certo modo curioso que tanto PERT como CPM lancem mão desse gráfico de características peculiares como veículo comum de informação, pois, como fiz ver, duas equipes distintas trabalharam na concepção daqueles modelos, visando a objetivos fundamentalmente diferentes (planejamento *versus* controle) e partindo de premissas igualmente diferentes (determinísticas num, probabilísticas noutro). A presença desse tipo de gráfico nos meios que deram origem a CPM parece-me de certa forma natural, pois o modelo gráfico corresponde exatamente ao que se tinha em mente, há muito, para a representação de problemas de distribuição na área da programação linear. Acredito que MALCOM e seus companheiros tenham reconhecido pelo bom senso a excelência desse tipo de representação para efeitos de arrolamento, exaustivo e sistemático, dos eventos que supostamente terão lugar no projeto, assim como de suas interdependências.

Reluto em aceitar que PERT consista na aplicação e utilização desse gráfico de setas e círculos. Talvez esse conceito seja válido para CPM, onde o gráfico que se tem em mãos é lei, só faltando especificar *quem* ou *quantos* realizarão esta e aquela tarefa. Mas, identificar PERT com o gráfico implica na aceitação da tese, aliás sustentada por inúmeros autores de respeito, de que PERT seria instrumento também de planejamento, isto é, de que sua aplicação exigiria a elaboração de um roteiro de ação que lhe fôsse, de certa forma, peculiar. Isso, todavia, não me parece verdadeiro. O que torna PERT *sui generis* no conjunto das técnicas aplicadas à administração da produção é o repetido emprêgo de inúmeras variáveis cuja finalidade precípua é o controle da produção e que atraem a atenção da gerência do projeto para os focos de exceção, onde custos ou tempos tendam a contrariar as estimativas iniciais. Quando em trabalhos de pesquisa e desenvolvimento não se sabe bem o que deva ser feito, nem muito menos se conhecem os tempos e custos que realmente hajam de

prevalecer no empreendimento, a maneira mais própria de tornar o controle consentâneo com a fluidez de afirmações iniciais é aumentar a frequência com que a gerência observa o processo de produção. A mim me sabe a prévia aceitação de derrota o tratamento que prevê o controle maciço como solução ao problema da ignorância que acompanha certos empreendimentos. Fica implícita no procedimento a impossibilidade física de a administração antecipar-se ao fato consumado. Administra-se *a posteriori* (*after the fact*) e o máximo que se consegue, por judiciosa incorporação da experiência adquirida ao longo do projeto, é diminuir as inevitáveis discrepâncias entre novas estimativas e futuras realizações.

A verdadeira essência de PERT está, precisamente, nesse aspecto. O ataque que PERT propõe à incerteza das estimativas presume, primeiro, a concepção de instrumentos valiosos de equiparação e, segundo, a possibilidade física em empreendimentos que, ao nível microscópico de realização, atingem comumente dezenas de milhares de tarefas e eventos da realimentação e revisão das afirmações iniciais com a frequência que seria de desejar. Os instrumentos de equiparação são as variáveis que PERT introduziu. A habilidade física para controlar frequentemente e a baixo custo só se tornou possível com o computador eletrônico. O que PERT trouxe, portanto, ao cenário americano da pesquisa e do desenvolvimento foi, sobretudo, um fluxo novo de documentos originais entre contratantes principais, subcontratantes e agências governamentais de interesse. Esses documentos — chamados “relatórios PERT para custos” (ou “para tempos”) — permitem que a administração de projetos muito complexos seja feita em estrita obediência ao princípio da exceção. Mas, — e isto convém salientar — definidas as variáveis e projetados os documentos (isto é, definido o sistema de informações relevantes no qual se estribará a gerência para administrar), PERT — como, aliás, qualquer sistema de controle — prescinde de representação gráfica específica do plano de ação. Aí está porque considero impróprio associar PERT a um gráfico específico, ao invés de associar-

-lhe, como seria certo, uma filosofia de ação da gerência em face da incerteza.

PERT/TEMPO

A esta altura, pretendo fazer um apanhado das principais variáveis que PERT introduziu para o contrôlo da produção. Iniciá-lo-ei pelas variáveis referentes a PERT/tempo. Para não enfadar o leitor com abstrações omitirei as restrições que devem ser impostas na representação gráfica do projeto para que cada definição adquira consistência. Queira agora o leitor acompanhar-me numa análise do projeto proposto na Figura 1:

- Esse hipotético projeto refere-se à instalação de um computador eletrônico para prestação de serviços primordialmente a terceiros. A figura é resultado mais de introspecção do que de experiência desfrutada na realização de projetos semelhantes. Como tal, caracteriza com nitidez a situação para a qual PERT foi essencialmente concebido. A situação é de informação imperfeita, e o plano de ação traçado *a priori*, que inclui um esboço de cronograma, reflete as tendências e pressuposições do projetista em face do empreendimento, máxime ao partir do princípio de que o *bureau* ou "departamento de serviços" deve ter condições de faturamento tão logo o equipamento tenha sido instalado.
- Igualmente — note o leitor — certo grau de conhecimento sôbre o futuro mercado de trabalho do departamento aparece explicitamente na figura. Na realidade, a figura admite a hipótese, viável ou não, de que o departamento conta com quatro clientes potenciais, um dos quais é a própria empresa adquirente. Se alguém perguntar de que forma terá sido obtida essa informação, a resposta será: "depois do início do projeto". E se o projeto já tiver começado, convirá conceber o atual momento de introspecção como pertinente à primeira tarefa do empreendimento — "estudos e estimativas preliminares".
- O restante da figura, torna-se claro, não passa de exaustivo arrolamento de tudo o que, segundo as previsões

atuais, deverá ocorrer no futuro, com indicação das interações previstas entre as diversas tarefas. Os números sobrescritos a cada uma das tarefas indicadas na figura correspondem a estimativas dos tempos de duração no caso de aquelas tarefas serem de fato empreendidas. Para não complicar a argumentação mantenho, por ora, estimativas singulares. De que forma são obtidas na prática? Por inquirição direta do pessoal técnico sobre o qual recairá a responsabilidade de executá-las. Note-se que o tempo de realização de algumas tarefas do projeto foi considerado igual a zero. Essas pseudotarefas devem constar do projeto para indicar interdependências de natureza tecnológica.

- Estabelecidas essas premissas e dispondo-se de um esboço de plano e cronograma, recolhem-se os dados preliminares para a aplicação de PERT: são as variáveis de PERT específicas para o controle que agora pedem atenção. Chame-se (x, y) uma tarefa qualquer do projeto; $t(x,y)$ será o tempo estimado de realização, que aparece sobre as setas da Figura 1; x será o evento "início de (x,y) " e y o evento "fim de (x,y) ". Chamando-se t_x o *mais curto tempo possível* de ocorrência de x , o *mais curto tempo possível* para a ocorrência de y será:

$$t_y = t_x + t(x,y) \quad (\text{Expressão A}).$$

- Quando uma única tarefa (x,y) contribui para a ocorrência de y a Expressão A é suficiente; o mesmo não acontece quando diversas tarefas convergem para y , pois nesse caso a Expressão A deixa algo a desejar. Senão, vejamos: se diversas tarefas contribuem para a ocorrência de y , é axiomático que o *mais curto* tempo possível para y só pode ser o *mais longo* dos tempos mais curtos calculados independentemente para cada uma das tarefas do grupo que converge em y . Note-se, por exemplo, o tempo mais curto possível para o "início da instalação" (Fig. 1). Será necessário escolher o local e, eventualmente, empreender algum trabalho de construção. Mas os tempos correspon-

dentes a essas tarefas, tal como estão estimados, não prevalecem sobre o intervalo de tempo necessário para o transporte do equipamento, isto é, o período contratualmente estimado para o despacho desse equipamento do porto de origem até seu recebimento no ponto final de destino. Dessa forma, o que comanda o início da instalação são os problemas vinculados ao transporte do equipamento, e isso impede que a instalação se inicie antes de 95.^a semana, caso tudo suceda como foi estimado. A partir desse raciocínio e da sucessiva aplicação da Expressão A, podem-se calcular os mais curtos tempos para realização de cada evento do projeto, especialmente do último evento — o fim do empreendimento. Ora, como as estimativas da Figura 1 levaram em conta o número de dias úteis do calendário durante aquele período e previram compatível aplicação de recursos, salvo erros e omissões (que certamente serão observados, mas *a posteriori*), tudo indica que o departamento não operará antes de 124 semanas.

● Admitindo que o projeto, tal como tenha sido delineado, agrade à gerência, convenhamos que a gerência tenha mesmo fixado em 124 semanas o tempo total para a realização do empreendimento. Nesse caso 124 semanas é não só o mais curto tempo possível para a consecução do último evento, como também a *última oportunidade possível* para a ocorrência desse evento. Designemos por T_y a última oportunidade de ocorrência de y . Esse conceito passa a assumir relevância, uma vez que — retroativamente — é possível calcular T_x por esta expressão:

$$T_x = T_y - t(x,y) \quad (\text{Expressão B}),$$

com a ressalva de que, se diversas tarefas divergirem de x , T_x corresponderá ao *menor* dos tempos calculados segundo a Expressão B para cada uma das tarefas do grupo divergente. Particularmente com relação ao projeto da Figura 1, note-se que a última oportunidade para a assinatura do contrato com a companhia fornecedora do equipamento

ocorre no fim da 63.^a semana, ainda aqui em decorrência do prazo estimado para a entrega do equipamento. Caso fôsem predominantes as "providências preliminares de instalação", a assinatura do contrato poderia esperar pelo fim da 76.^a semana, sem perigo para a realização do projeto no prazo estipulado.

- Uma terceira variável de contrôle resulta das Expressões A e B: torna-se evidente que o *máximo tempo disponível para a realização* de (x,y) , vale dizer, $M(x,y)$, é:

$$M(x,y) = T_y - t_x \quad (\text{Expressão C}).$$

Quer dizer, a instalação pròpriamente dita do equipamento pode levar, no máximo, 14 semanas — mais, portanto, que as 6 estimadas. Em contrapartida, os "testes finais" têm o tempo máximo de realização de 15 semanas, exatamente igual ao prazo estimado para aquela tarefa. Tarefas que devam ser realizadas estritamente no prazo estimado — isto é, tarefas para as quais a variável $M(x,y)$ seja igual à variável $t(x,y)$ — são consideradas críticas para o projeto.

- A avaliação quantitativa de quão crítica seja uma tarefa para um projeto é obtida através do conceito de *folga*. Por folga — $f(x,y)$ — entende-se a variável de contrôle

$$f(x,y) = M(x,y) - t(x,y) \quad (\text{Expressão D}),$$

variável que, como se vê, mede a sobra estimada do tempo que se tem para realização da tarefa. Se a tarefa fôr crítica, a folga será nula. Chamemos F o último evento do projeto. Pode-se provar que, estabelecido por definição ser $T_F = t_F$, como o fizemos no exemplo em pauta (onde $T_F = t_F = 124$), então certamente existirá no projeto pelo menos uma cadeia de tarefas que ligará o comêço ao

fim do projeto e para a qual a folga em cada tarefa será nula. Essa cadeia (ou êsse conjunto de cadeias) recebe a designação de *caminho crítico* do projeto.¹⁰

Grande fonte de confusão entre PERT e CPM é precisamente a utilização do conceito de caminho crítico por ambos os métodos, embora em contextos e com finalidades basicamente diferentes. Em PERT caminho crítico é um gargalo de produção, um conjunto de tarefas que requerem controle especificamente apurado. Em CPM é um instrumento de cálculo, não de controle: é, por definição, a mais longa cadeia do gráfico para um específico tempo total de realização do projeto e de um orçamento específico. Em consequência, definida a pressa que se tenha de realizar o empreendimento, o caminho crítico de CPM torna explícitas as tarefas que requerem recursos adicionais para a execução do trabalho, sendo, daí, um passo para a obtenção do orçamento total do projeto, compatível com a pressa que se tenha estabelecido. Isso torna ainda mais nítida a distinção de que CPM planeja e PERT controla. Aliás, certo sentido de complementação entre PERT e CPM pode daí resultar. Já existem trabalhos nesse sentido. Veja-se, por exemplo, o que dizem BIDSON e GILLESPIE na obra citada da nota¹¹.

Finalmente, a derradeira variável de importância para o controle, que PERT/tempo prevê é a *folga livre* de uma tarefa, a qual se define pela igualdade

$$f_l(x,y) = t_y - t_x - t(x,y) \quad (\text{Expressão E}).$$

- 10) Se T_F for estabelecido diferente de t_F , poder-se-á entender como *caminho crítico* a cadeia de tarefas para a qual a folga constante seja a menor possível (se $T_F > t_F$) ou a maior possível (se $T_F < t_F$). Com essa precaução o caminho crítico (em PERT) será sempre o mesmo, independentemente de T_F .
- 11) R. A. BIDSON e J. R. GILLESPIE, "Critical Path Planning-PERT Integration", *Operations Research*, vol. 10 (1962), págs. 909 a 912.

Particularmente para a tarefa de construção e instalação de material elétrico e de refrigeração no projeto que estamos estudando, da folga calculada em 21 semanas existem apenas 13 semanas "livres". Para a maioria das tarefas do projeto a folga livre é nula.

Essas as principais variáveis que tornam PERT/tempo peculiar. Outras mais existem, mas sem a importância das que definimos. A gerência do empreendimento centraliza sua atenção no fato de serem ou não confirmados os valores estimados para essas variáveis, e através dessa constante equiparação reajusta os recursos para o atendimento dos interesses que tem em vista.

PERT/CUSTO

O muito da singularidade que caracteriza PERT/tempo como novo instrumento para controle de tempos não aparece em PERT/custo para o controle de custos. Reluto em aceitar que PERT/custo seja uma técnica original para o controle de custos e que mereça, dessa forma, rótulo especial. Toda a peculiaridade de PERT/custo em projetos cercados de incerteza reside no modo de definir agrupamentos de tarefas que mereçam controles orçamentários independentes. PERT/custo propõe um exame da representação gráfica do projeto ao nível de desmembramento mais microscópico possível. Desde logo, por exemplo, a perspectiva macroscópica da Figura 1 julgo-a incompatível com a utilização de PERT/custo.

Uma vez que se tenha em mãos o gráfico suficientemente pormenorizado do projeto, PERT/custo fraciona-o num número variável de partes, cada parte contendo uma coleção coerente de tarefas. Por seu turno, cada coleção — que se designa *coleção de trabalho* — recebe controle orçamentário específico e, portanto, confronto periódico entre dispêndios reais e previstos, em decorrência da natureza da discrepância. O critério de fracionamento do projeto em coleções parece ser bastante flexível.

Algumas agências norte-americanas ¹² propõem que o número de atividades numa coleção seja regido por um orçamento não superior a US\$ 100.000 e por um tempo de trabalho total para a coleção não superior a três meses. Isso, entretanto, não desmente que o nível de minuciosidade para o qual PERT/custo se aplica é fundamentalmente fruto de julgamento, variando de projeto a projeto, de parte a parte do mesmo projeto ou, ainda, de um estágio para outro de preparação ou execução em que o projeto se encontra. Para controlar custos dentro desse esquema de operações as variáveis fundamentais são as discrepâncias, positivas e negativas, de dispêndios e estimativas para cada coleção do projeto. Do relatório periódico que arrola as discrepâncias por coleções deve constar, ainda, a *discrepância estimada* para o total do empreendimento.

O MODELO ORIGINAL DE PERT/TEMPO E SUA MODIFICAÇÃO NA PRÁTICA

Insisti, desde o início, em que a natureza matemática de PERT, pelo menos no modelo original, é probabilística. Dessa forma foi possível salientar uma diferença básica fundamental entre PERT e CPM, pois em CPM prevalece um ambiente de constantes, isto é, de valores destituídos de incerteza. Como tudo neste mundo é incerto, o leitor tenderá a negar validade ao que CPM tenta implantar. Mas, em assim fazendo, terá igualmente de negar validade à maioria quase absoluta dos modelos de valor prático de que certamente faz uso. Veja-se, por exemplo, o que aconteceu com PERT, mesmo nesta descrição: embora tivesse enfatizado a característica da incerteza, apliquei sobre as tarefas da Figura 1 valores que nada aparentam ter de incertos, os quais ambigüamente tratados como "estimativas singulares dos tempos de duração", impregnaram com seu determinismo tôdas as variáveis de controle posteriormente calculadas.

12) "DOD and NASA Guide PERT/Cost", Office of the Secretary of Defense, Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos EUA, junho de 1962.

O exemplo, como aliás quase toda a aplicação de PERT na prática, constitui corruptela do ambicioso modelo que MALCOM e seu grupo conceberam inicialmente e que o próprio grupo foi levado a simplificar drasticamente para adaptá-lo ao nível de conhecimento dos usuários e a outras circunstâncias de natureza pragmática.

Em linguagem probabilística, diz-se de uma variável que assuma valores incertos que é *aleatória*. Em média, ela certamente assume determinado valor, que é seu *valor esperado*. Mas, o valor esperado da variável é u'a *média* dos valores que assume experimentalmente. Quando se diz de uma pessoa que "costuma chegar sempre com meia hora de atraso" a implicação matemática é que o *valor esperado do tempo de chegada* é de 30 minutos além do prazo estabelecido, e com isso se entende que algumas vezes o atraso será superior e, outras vezes, inferior a 30 minutos. A margem de erro em torno da estimativa natural que a média concede designa-se, probabilisticamente, *variância*. Quando a variância é pequena, pequena é também, em média, a discrepância verificada, ocorrendo o contrário quando a variância seja grande. Modelos determinísticos — para os quais tudo no mundo é constante — partem da premissa de que a variância é tão pequena que a adoção do valor esperado da variável como valor *certo* de ocorrência não torna falaciosas as conclusões.

Em trabalhos de pesquisa e desenvolvimento — para os quais PERT foi concebido — a hipótese da pequena variância para os tempos de duração das tarefas é obviamente precária. Quando se pede de um engenheiro que estime o prazo de conclusão do projeto de uma engrenagem cujas especificações requeiram uma liga metálica ainda desconhecida, o prazo estimado, digamos, de 20 semanas, reflete apenas o grau de complexidade com que o engenheiro avalia subjetivamente a tarefa. Concluir daí que o número 20 tenha algo de fatal é erro grosseiro.

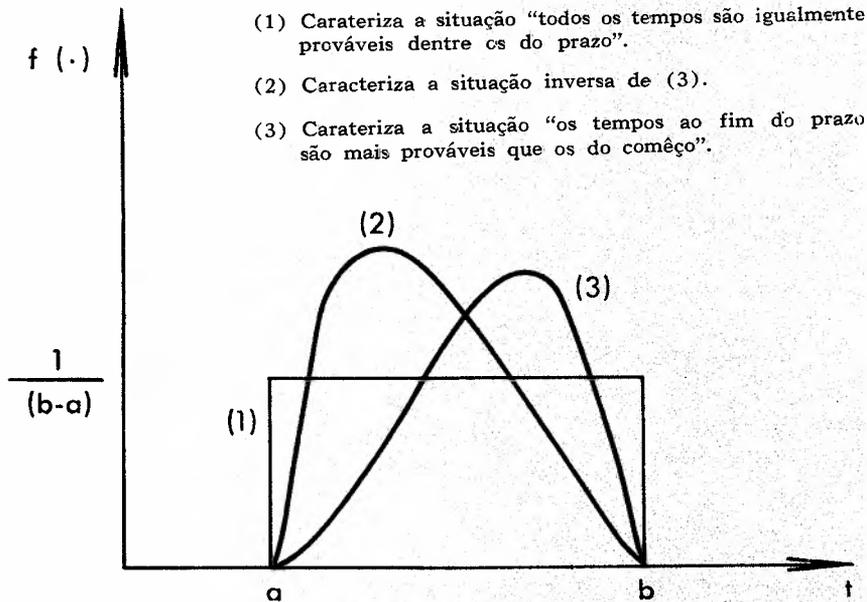
MALCOM e seu grupo levaram em consideração, inicialmente, a aleatoriedade das estimativas, sugerindo que ao projetista fôsse dada a prerrogativa de estimar não o tem-

po médio de realização da tarefa, mas a inteira *distribuição de probabilidades* dos tempos correspondentes.

Para haver coerência nas estimativas colhidas em diversas fontes o projetista deveria limitar-se a sugerir uma das funções de u'a mesma família de funções matemáticas chamadas *funções beta*. Como essa família é inexaurível, o projetista teria infinitas oportunidades de aliviar o espírito, sugerindo (tal como na Figura 2) proposições do tipo "qualquer tempo de duração dentre os do prazo é igualmente possível" ou, ainda, "pressinto que a probabilidade de que a tarefa termine mais perto do fim do prazo é maior do que a correspondente ao comêço".

Estimativas assim versáteis tornam o modelo interessante, mas dificilmente prático em projetos complexos. Determinar a média e a variância de distribuições beta não constitui problema matemático, mas a repetição do cálculo para

FIGURA 2: *Funções Beta*



diversos milhares de tarefas é certamente onerosa. Ademais, convencer o projetista, geralmente leigo em probabilidades, da informação que dêle se pretende colher é paradoxalmente mais difícil para estimativas versáteis do que para estimativas singelas. Essas dificuldades devem ter conduzido o grupo de MALCOM a sugerir do projetista, em lugar de uma completa distribuição de probabilidades que incluísse tôda a informação subjetiva que êle tivesse sôbre a tarefa, tão sômente três estimativas pontuais, às quais se deram os nomes de *estimativa otimista* (a), *pessimista* (b), e *mais provável* (m). O pensamento de MALCOM era acomodar uma distribuição beta àqueles parâmetros. Dificuldades matemáticas apareceram nesse ponto, exigindo novas premissas e simplificações. Aos poucos, o modêlo originalmente concebido como probabilístico foi perdendo sua flexibilidade, e a hipótese da distribuição beta de tempos, virtualmente destruída. Duas fórmulas mágicas apareceram em seu lugar, cuja dedução seria irrelevante introduzir nesta descrição. A primeira diz respeito ao tempo médio estimado para duração de uma tarefa,

$$E(t) = (a + 4m + b)/6 \quad (\text{Expressão } F),$$

e a segunda, à margem de êrro dessa estimativa, ou seja, à variância do tempo de duração,

$$V(t) = (b - a)^2/36 \quad (\text{Expressão } G).$$

Utilizando-se as Expressões F e G em conjunção com a Expressão A, pode-se determinar o tempo mais curto de ocorrência estimado para um evento e a variância correspondente. Isso permite que se estime, por exemplo, a probabilidade com que qualquer evento do projeto haja de ocorrer no prazo estabelecido. É fácil entender que essas estimativas são tão arbitrárias como o são as Expressões F e G, e, porisso, só têm valor num contexto onde o contrôle seja muito freqüente e apurado.

Com o decorrer do tempo a Expressão G perdeu quase inteiramente seu valor. Quanto à Expressão F, — indago — porque passar pelo dissabor de seu cálculo, se uma estimativa única pode ser obtida mais facilmente com idêntica arbitrariedade? Em 1963 travei contato com três usuários de PERT na área de Bóston, EUA: a *Procter & Gamble*, a *Raytheon* (companhia de pesquisas) e alguns técnicos envolvidos no Projeto *Apollo* no MIT. As variâncias não eram calculadas, e a *Raytheon* era a única que ainda usava três estimativas de tempo para cada tarefa, embora não de forma sistemática. Esse fato fêz-nos crer que a incerteza das estimativas que PERT utiliza deterministicamente na prática para o cálculo das variáveis de controle que introduzimos anteriormente é apenas mantida como pano-de-fundo no cenário do projeto.

Os métodos de cálculo que a prática de PERT introduziu não o tornam mais probabilístico do que CPM. Sucede, apenas, que o sistema que emprega PERT mantém viva a consciência de que tudo é incerto e fluido, e de que a única forma de atacar a ignorância do que venha a ocorrer ao longo do projeto é o maciço controle de suas etapas.

O emprêgo de PERT/tempo também sofreu substancial alteração na prática. Inicialmente concebido apenas como instrumento de controle do *absolutamente novo* — produtos de pesquisa e desenvolvimento —, aos poucos PERT despertou a atenção de outras áreas de atividade, sobretudo das que requerem processos de produção infreqüentemente repetidos. A construção civil, principalmente em obras de arte de médio e grande porte, procurou, desde logo, tirar proveito das variáveis de PERT. Hoje o repertório de aplicações de PERT/tempo é virtualmente inexaurível, seja em trabalhos de produção corrente, seja em trabalhos de produção intermitente. A mercadização de produtos novos, a administração orçamentária, a instalação e programação de sistemas eletrônicos de processamento de dados, a construção de abrigos em programas de defesa urbana, o lançamento de peças teatrais, os proble-

mas de manutenção etc. são alguns dos campos de aplicação que no passado não se pensava PERT pudesse ter.

Finalmente, conviria pedir a atenção do leitor para certos problemas que a aplicação de PERT envolve e que adquirem, na prática, pouca ou nenhuma relevância em virtude do fascínio despertado, normalmente, pela simples manipulação numérica e pelos demais mecanismos da técnica. A primeira observação é de natureza matemática. A segunda, muito mais importante, diz respeito ao âmago do problema que PERT tenta resolver.

- **Matematicamente, comete-se erro flagrante quando se escolhe o maior valor da Expressão A como o mais curto tempo possível para a ocorrência de um evento sobre o qual convirjam duas ou mais tarefas. É fácil entender porque. Proponho ao leitor que conceba o encontro de duas pessoas, digamos, entre 3 e 4 horas da tarde de certo dia. Suponhamos que nenhuma dessas pessoas tenha motivos para evitar o encontro com a outra e, ainda, que nenhuma delas telefone ou procure certificar-se, de alguma forma, sobre se a outra está ou não a caminho do local do encontro. Imaginemos, por fim, que ambas as pessoas não tenham o que fazer naquele período, estando, dessa forma, absolutamente indiferentes quanto ao momento de chegar ao local.**

A implicação dessas hipóteses é dupla: primeiro, as chegadas são ditas independentes; segundo, qualquer minuto no intervalo entre 3 e 4 horas é igualmente provável para a chegada de qualquer dos dois indivíduos. O problema corresponde, num gráfico PERT, a duas setas ("transporte de cada indivíduo ao local do encontro") que convergem para um círculo (representando o evento "encontro"). O que PERT prognostica é que o encontro se dará às 3:30 h, pois essa é a média do tempo de chegada não só do primeiro indivíduo, como também do segundo. Ocorre que a solução é simplista. Em verdade, o encontro terá lugar quando a pessoa mais atrasada chegar; portanto, o tempo da ocorrência do evento "encontro" depende exclu-

sivamente do tempo de chegada da pessoa mais atrasada. É possível provar que o horário médio de chegada da pessoa mais atrasada será o das 3:40 h e que somente a essa hora, em média, se dará o encontro. A tendência para o atraso, evidentemente, é fato da natureza e independe, no caso, da vontade de ambas as partes. PERT omite-se diante dessa realidade matemática e, por isso, estima tempos "mais curtos de duração" menores do que aqueles que, em média, certamente prevalecerão. Os resultados de PERT/tempo são, por isso mesmo, considerados "otimistas" e, convém alertar, a margem de otimismo em PERT pode atingir cifras de quase 40%, altamente significativas, portanto. O cálculo exato do tempo médio de ocorrência de determinado evento sobre o qual convirjam diversas tarefas não será difícil se as tarefas forem, como as chegadas do exemplo, efetivamente independentes. Se não o forem (como certamente será o caso), a determinação exata dos tempos de ocorrência será tarefa muito complexa. Talvez convenha adicionar que, quanto mais fortes as dependências — isto é, quanto mais hiperestático o gráfico —, tanto menor será a margem de erro de PERT.

Dir-se-á que, afinal de contas, um controle maciço, como o prognosticado, logo revelará a tendência otimista inevitavelmente incorporada na forma de aplicar a Expressão A, daí resultando revisões mais conservadoras de estimativas originais, à medida que o projeto se aproximar do fim. Acompanho o raciocínio. Afinal de contas, uma arbitrariedade a mais não faz diferença, desde que seja fonte de erro de natureza sistemática e previsível. O problema, entretanto, reside em outros elementos de erro, de natureza assistemática e imprevisível, que fazem parte integrante da própria estrutura do problema que PERT tenta resolver. E isso sugere a segunda observação no tópico.

- A forma de PERT atacar o problema do controle da produção daquilo que chamei "absolutamente novo" ou "infreqüentemente repetido" é, sob todos os aspectos, superficial, ingênua, simplista. Alguns pensadores americanos

— dentre êles, EDWARD ROBERTS,¹³ que é quem melhor tem estudado os problemas de pesquisa e desenvolvimento nos EUA — acusam PERT de enfatizar tecnicismos, em vez de compreender a verdadeira natureza do problema; acusam PERT de salientar o valor de resultados numéricos, arbitrários e falaciosos, que resultam em medidas igualmente falaciosas e arbitrárias porque deixam encoberto o verdadeiro mecanismo de causação circular que comanda o sistema.

ROBERTS chega ao ponto de considerar desperdício de talento humano a existência de PERT e técnicas similares, porque por causa dêles ficam drenados alguns recursos necessários ao estudo e à compreensão das causas da insegurança administrativa de tais empreendimentos. A superficialidade de PERT como *solução* fica a descoberto quando se examina, com um pouco mais de cuidado, o mecanismo de causação circular (*feed-back*), segundo o qual a discrepância entre o prazo desejado para o término de uma tarefa e aquêle que PERT sugere como viável origina uma tomada de decisões que redispõe os recursos; êstes, por sua vez, atuam no projeto dando origem a novas estimativas de progresso, as quais, por sua vez, em face do desejado, provocam nova redistribuição dos recursos, fechando o círculo. E isso não é tudo, pois inexitem fontes tangíveis e seguras para a medida do progresso em empreendimentos novos ou infreqüentemente repetidos, o que implica em a discrepância entre o *real* e o desejado deixar de ser a causa de decisões. Essas passam a ser tomadas em face do progresso *aparente* do projeto, e o progresso aparente decorre do fluxo de informações em múltiplos canais, onde incidem *demoras, ruídos e tendências*.

Por ingenuidade, PERT aceita que o projetista não é "racional" ou, como se tem dito, "econômico". Mas êle o é.

13) E. ROBERTS, "Toward a New Theory for Research and Development". *Industrial Management Review*, MIT School of Industrial Management, Vol. 4, n.º 1, outono de 1962.

Idem, *The Dynamics of Research and Development*, MIT PhD Thesis, junho de 1962.

Ele estima, alega ou insinua em face de seu esquema de valores e, sobretudo, em face do esquema de valores da empresa, principalmente no que diz respeito à política prêmio-penalidade por essa empresa adotada. O esquema de valores do projetista reflete-se nas tendências da gerência ao administrar o projeto, e novos círculos de *feed-back* se insinuam na verdadeira estrutura do problema. Na macro-escala do projeto ROBERTS observou que fatores como a propensão de risco da empresa, as demoras de financiamento do projeto, a habilidade da empresa para expandir-se sem perda de eficiência e a própria integridade da empresa são fatores mais marcantes para o sucesso do empreendimento que o controle apurado dos tempos de produção. Análises com a profundidade da que ROBERTS fez do problema de pesquisa e desenvolvimento decorrem de uma poderosa simulação em computadores eletrônicos, ainda largamente desconhecida no Brasil, a que se dá o nome de "Dinâmica-Industrial".¹⁴

CONCLUSÃO

Afinal, joguemos PERT à cesta, como talvez o pretenda ROBERTS? Não foi o que fizeram as agências governamentais norte-americanas no controle de seus projetos. Não é o que têm feito os milhares de usuários que desfrutam da técnica sobretudo como instrumento disciplinador do bom senso. Nem ROBERTS iria tão longe. Os resultados de uma análise mais profunda mostram apenas que PERT não resolve o problema *integralmente*. Diria que deve ser empregado com cuidado, que constitui verniz a encobrir superficialmente um problema de natureza virtualmente

14) Estudos de Dinâmica Industrial começaram, há cerca de oito anos atrás, com o Prof. JAY W. FORRESTER na *Escola de Administração do Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)*. O trabalho fundamental da disciplina é o livro de FORRESTER, *Industrial Dynamics, The MIT Press, 1961*. A Dinâmica Industrial enfatiza as características de causação circular de todas as atividades econômicas e administrativas, e estuda os meios pelos quais "a estrutura da organização, a amplificação das políticas de decisão e as demoras em ações e decisões interagem para influenciar o sucesso de um empreendimento".

desconhecida porque nêle incide, sobretudo, a complexidade do elemento humano.

Penso que a verdadeira importância tecnológica de PERT e métodos similares está em que são técnicas que "arrumam a casa", organizam o raciocínio.¹⁵ Não resolvem tudo mas forçam a solução de uma parte inicial do problema, que é muito importante para o sucesso do empreendimento: a que exige minuciosa introspecção do trabalho que jaz à frente, seja no que concerne à sua complexidade e aos dispêndios que eventualmente venham a ser enfrentados, seja no que se refere aos tempos de execução.

Êstes, a despeito da arbitrariedade e falácia que carregiam em boa dose, permitem à gerência sentir os pés no chão e dar início ao empreendimento com o que melhor se assemelha aos fatos sôbre os quais carece de informações.

15) GRACIANO SÁ, "A Study on the Solutions to PERT Networks", M. S. Thesis, MIT School of Industrial Management, junho de 1964.