



Controle Estatístico de Projeto: Gráficos de controle no monitoramento do prazo de projetos

Rodrigo Votto

Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Produção
Av. Professor Almeida Prado, Travessa 2, 128
rodrigovotto@gmail.com

Linda Lee Ho

Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Produção
Av. Professor Almeida Prado, Travessa 2, 128
lindalee@usp.br

Fernando Berssaneti

Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Produção
Av. Professor Almeida Prado, Travessa 2, 128
fernando.berssaneti@gmail.com

RESUMO

Este trabalho propõe uma abordagem de controle estatístico de projetos utilizando gráficos de controle para o monitoramento de prazo de projetos. As variáveis monitoradas são os indicadores de desempenho das metodologias *Earned Value Management* (EVM) e *Earned Schedule Management* (ESM).

Esta abordagem contribui para melhorar a capacidade do EVM e ESM em interpretar os desvios dos indicadores de desempenho na execução do projeto e distinguir desvios esperados, quando o projeto está em estado de controle, e desvios não esperados, que devem ser interpretados como uma evidência de risco de atraso do projeto. Para construir os gráficos de controle são atribuídas funções de distribuição de probabilidade para descrever a incerteza da duração das atividades. Os limites de controle dos gráficos propostos foram obtidos através de simulação de Monte Carlo.

PALAVRAS CHAVE: Earned Value, Incerteza, Simulação de Monte Carlo

Tópicos: SIM – Simulação; EST - Estatística

ABSTRACT

This paper proposes a statistical control approach using control charts to monitor the duration of capital goods projects. The monitored variables are the performance indicators from the Earned Value Management (EVM) and Earned Schedule Management (ESM).

This approach contributes to improve the capacity of EVM and ESM to interpret the deviations in a project execution phase distinguishing between the expected deviations, when project is in statistical control, and the unexpected deviations, which can be interpreted as evidence of a real risk of the project delays.

To build the control charts, probability distribution functions are assigned to describe the uncertainty in the activities duration and the control limits determined by Monte Carlo simulation. Numerical examples illustrate the current proposal.

KEYWORDS. Earned Value, Uncertainty, Monte Carlo Simulation

Paper topics: SIM – Simulation; EST – Statistics;



1. Introdução

O controle de projetos tem como objetivo medir e avaliar o progresso e o desempenho atual de um projeto, comparando-o com um cronograma ou linha de base, analisando eventuais desvios e tomando as ações necessárias para corrigir antecipadamente esses desvios de forma a concluir o projeto no prazo planejado [Acebes et al. 2013; Acebes et al. 2015; Willems e Vanhoucke 2015].

A metodologia mais utilizada para o monitoramento do desempenho do projeto em Gerenciamento de Projetos é o *Earned Value Management* (EVM). Desde seu desenvolvimento na década de 1960 como uma metodologia unificada para controle de custos e cronograma dos projetos do Departamento de Defesa dos EUA, o EVM tem recebido muita atenção tanto na literatura acadêmica [Anbari 2003; Vandevorde e Vanhoucke, 2006] quanto em contextos mais práticos [Fleming e Koppelman 2005; PMI 2008]. Esta metodologia integra o controle de escopo, custo e cronograma sob a mesma estrutura e fornece indicadores de desempenho que permitem aos gerentes de projeto detectar desvios de custos e prazos dos projetos [Pajares e López-Paredes 2011; Acebes et al. 2014; Acebes et al. 2015]. Mais recentemente, esta abordagem foi estendida para dar mais ênfase no controle do prazo do projeto. Lipke [2003] introduziu o conceito de *Earned Schedule Management* (ESM) para melhorar a previsibilidade dos indicadores de desempenho de prazo dos projetos.

Neste contexto, assumindo o caráter probabilístico da duração das atividades, este trabalho tem o objetivo de apresentar uma abordagem de controle estatístico de projetos usando gráficos de Controle Estatístico de Processo (SPC) para monitorar os indicadores de desempenho de prazo de projeto das metodologias *Earned Value Management* (EVM) e *Earned Schedule Management* (ESM) e apresentar uma aplicação no ambiente de projetos de bens de capital por encomenda. Portanto, este trabalho é uma extensão dos estudos de aplicação de gráficos de controle em gestão de projetos pelos métodos EVM e propõe três contribuições baseadas nas lacunas encontradas na literatura: a utilização de dois diferentes indicadores de desempenho de prazo de projeto e a comparação entre eles, a utilização da função de distribuição triangular para descrever a incerteza da duração das atividades e a aplicação prática deste método em projetos de bens de capital sob encomenda.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. Na seção 2 apresentamos uma breve revisão bibliográfica. As notações, variáveis e indicadores de desempenho utilizados neste artigo são apresentados na Seção 3. Na seção 4, a abordagem de controle de projetos e os princípios de controle estatístico são apresentados. A Seção 5 um exemplo numérico ilustra uma aplicação da proposta. A Seção 6 apresenta conclusões gerais e destaques para pesquisas futuras.

2. Revisão Bibliográfica

Os cálculos de valor agregado são baseados nos valores periódicos dos custos e durações planejadas e realizadas das atividades do projeto. Tanto na fase de planejamento quanto na execução do projeto, as informações das atividades individuais são muito detalhadas e difíceis de serem controladas individualmente e precisam ser somadas e controladas por meio de variáveis e indicadores de desempenho no nível do projeto [Colin e Vanhoucke 2014]. Estes indicadores, que serão apresentados na Seção 3, comparam os valores planejados de duração e custo do projeto com os valores atuais e valores agregados, que representam a porcentagem realmente executada do projeto até o momento da medição de desempenho.

Embora, inicialmente, o foco tenha sido principalmente no controle de custo, uma vez que o *Earned Value Management* (EVM) utiliza apenas os dados de custo planejado, real e agregado para avaliação de desempenho do projeto, o controle de prazo do projeto gradualmente passou ganhar mais atenção da comunidade acadêmica a partir do artigo de Lipke [2003], que introduziu o conceito de *Earned Schedule Management* (ESM) como uma extensão do EVM. O autor definiu uma nova métrica para medir o *status* atual do cronograma do projeto, o *Earned Schedule* (ES), para ser comparado com o cronograma de linha de base.

O EVM e sua extensão ESM definem indicadores de desempenho para detectar desvios do cronograma de linha de base. Se durante a execução, o projeto exibir um comportamento



anormal comparado a uma situação predefinida, o gerente de projeto deve ser capaz de detectar rapidamente estes desvios. Se houver uma lacuna inaceitável entre o planejamento e o desempenho real, um sinal de alerta deve ser gerado e interpretado para desencadear estas ações corretivas. No entanto, essa interpretação é geralmente dificultada pela dinâmica intuitiva desses indicadores de desempenho e o uso das metodologias de valor agregado é muitas vezes caracterizado na prática pela tomada de decisão a partir de experiência prática dos gerentes de projeto [Colin e Vanhoucke 2014; Colin e Vanhoucke 2015].

Um fator que dificulta a interpretação dos sinais de alerta é a forma de lidar com incerteza no planejamento da duração das atividades. A incerteza é uma realidade da gestão de projetos durante a estimativa de recursos, custos e prazos. A questão não é de reconhecimento sobre a existência da incerteza, mas sim de medição e de como lidar com a incerteza na alocação de recursos e na gestão do risco inerente às estimativas feitas. Em gestão de projetos, risco e incerteza podem ser tomados como sinônimo de variabilidade, que pode ser estimada como a variação do tempo ou do custo da execução e conclusão do projeto [Elmaghraby, 2005].

No entanto, embora a incerteza e a variabilidade sejam fatos comuns em todas as atividades dos projetos reais [Pajares e López-Paredes, 2011], as metodologias tradicionais de valor agregado utilizam abordagens determinísticas que não são capazes de lidar com a incerteza e os riscos de projetos, uma vez que assumem certeza sobre os valores planejados da duração das atividades do projeto e não especificam se os desvios dos valores planejados são derivados das variabilidades esperadas do projeto [Batselier e Vanhoucke 2015].

Vanhoucke [2011] afirma que a análise de risco de cronograma (*Schedule Risk Analysis*), com a utilização de valores estocásticos para as durações das atividades, em conjunto com a tradicional simulação de Monte-Carlo, permite determinar uma função de distribuição de probabilidade empírica para a duração total do projeto e os valores esperados dos indicadores de desempenho de EVM ao longo do tempo. Vanhoucke [2012] define as quatro etapas da análise de risco de cronograma (Figura 1), iniciando por uma fase de planejamento do projeto para a elaboração de um cronograma de linha de base. Em uma segunda etapa, a incerteza deve ser definida por meio da definição das funções de distribuição de probabilidade para a duração de cada atividade. A seguir, é realizada a simulação de Monte Carlo para o progresso do projeto com base nas estimativas de incerteza das atividades. Na última etapa, os resultados da simulação e seus indicadores precisam ser interpretados em função das particularidades de cada projeto específico.

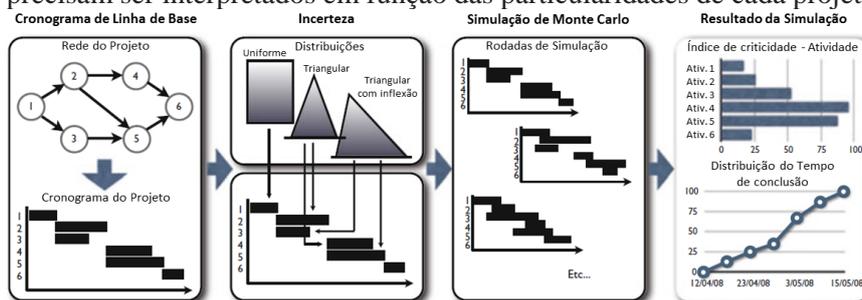


Figura 1. Modelo de Análise de Risco de Cronograma de Projeto [adaptado de Vanhoucke 2012]

Técnicas probabilísticas proporcionam funções de distribuição de probabilidade para as possíveis durações das atividades [Batselier e Vanhoucke, 2015]. Recentemente, alguns estudos têm focado na integração de EVM com a análise de riscos e incertezas de projetos e na introdução de ferramentas de decisão com base em limites de controle para indicadores de desempenho para decidir se os desvios do cronograma do projeto são causados por problemas estruturais ou se eles são compatíveis com o intervalo esperado de variabilidade, derivada da natureza estocástica do projeto [Pajares e López-Paredes 2011; Acebes et al. 2015].

Embora possam ser utilizadas diferentes metodologias para definir os limites de controle para os indicadores de valor agregado, alguns autores introduziram o uso do método tradicional de controle estatístico de processo (SPC) para o controle de projetos.

Introduzido por Shewhart na década de 1920, os gráficos do controle foram aplicados extensamente a uma grande variedade de indústrias e processos. Um gráfico de controle é uma



representação gráfica de uma característica de qualidade que foi medida ou calculada a partir de uma amostra *versus* o número da amostra ou o tempo. O gráfico contém uma linha central, representando o valor médio da característica da qualidade que corresponde ao estado sob controle, quando apenas causas aleatórias estão presentes, e duas outras linhas, o limite superior de controle (LSC) e o limite inferior de controle (LIC), adotados de forma que, se o processo está sob controle, praticamente todos os pontos amostrais estarão entre os limites de controle. No entanto, um ponto que esteja fora dos limites deve ser interpretado como evidência de que o processo está fora de controle e investigação e ações corretivas são necessárias para encontrar e eliminar as causas atribuíveis responsáveis por esse comportamento [Montgomery 2009].

Trabalhos pioneiros sobre os gráficos de controle SPC para controle estatístico de projeto foram as contribuições de Wang et al. [2006], Leu e Lin [2008] e Aliverdi et al. [2013]. Esses autores utilizam dados históricos de projetos semelhantes como amostra dos indicadores de desempenho, definem os parâmetros de distribuição populacional [geralmente, μ (média) e σ (desvio padrão)] e determinam os limites de controle superior e inferior (LSC e LIC) para cada indicador. Posteriormente, os gráficos são utilizados para monitorar novos projetos, diferenciando sinais de alerta anormais, que indicam problemas reais dos projetos, daquelas variações esperadas que não influenciam o sucesso do projeto. Durante a execução do projeto, se uma medição periódica é um sinal de alerta (por exemplo, menor do que o LIC), significa que há um atraso no cronograma ou um desvio de custo fora de controle.

Diferente dos estudos anteriores, que utilizam dados históricos para a criação dos limites de controle, Colin e Vanhoucke [2014] apresentam uma diferente abordagem estatística de controle de projetos, utilizando os gráficos SPC para os indicadores EVM com base em intervalos de tolerância produzidos por meio de uma amostra simulada do indicador de controle de prazo de projeto SPI (*Schedule Performance Index*) da metodologia EVM. Os autores empregam uma função de distribuição de probabilidade uniforme para descrever a duração das atividades, utilizam a simulação de Monte Carlo para simular a execução do projeto sob condições aceitáveis de variação da duração das atividades e o prazo final do projeto, calculam os valores periódicos do indicador de desempenho de prazo do projeto SPI para definir os limites de controle e criam os gráficos de controle estatístico de projeto. Em seguida, durante a execução de um projeto real, o progresso pode ser medido e as observações periódicas podem ser plotadas contra os limites de controle no gráfico de controle do projeto para identificar os desvios que estejam entre os valores esperados, ou seja, para as variações normais da duração das atividades, dos desvios estruturais, quando o projeto tende a se desviar significativamente do cronograma de linha de base e sinais de alerta precisam ser emitidos para que as ações corretivas sejam implementadas.

Nas próximas seções, será apresentada uma extensão desta abordagem, com a medição de mais de um indicador de desempenho de prazo, a utilização de uma distribuição de probabilidade triangular para descrever melhor a incerteza da duração das atividades, além da sua aplicação prática no ambiente de projetos de bens de capital sob encomenda.

3. Notações

Para desenvolver a nossa abordagem de controle estatístico de projetos, as seguintes notações para parâmetros, variáveis e indicadores de desempenho foram empregados:

$P = \{1, 2, 3, T_0, T\}$	Conjunto de períodos de revisão do projeto, onde: $t \in P$ é o período ou data atual. $T_0 \in P$ é a data planejada de término do projeto de acordo com o cronograma de linha de base. $T \in P$ é a data real de término do projeto.	
$N = \{1, 2, 3 \dots n\}$	Conjunto de atividades do projeto, onde $i \in N$.	
Atividade		
μBPD_i	Activity Baseline Planned Duration. Duração planejada da atividade i (constante).	Parâmetro
μBPV_i	Activity Baseline Planned Value. Custo planejado total da atividade i no cronograma de linha de base do projeto.	Parâmetro
μPV_{it}	Activity Planned Value. Custo planejado da atividade i até o período t .	Parâmetro
AC_{it}	Activity Actual Cost. Custo real acumulado do trabalho realizado da atividade i até o período t .	Variável Aleatória



EV_{it}	Activity Earned Value. Valor agregado é uma variável aleatória do custo planejado acumulado do trabalho realizado da atividade i até o período t .	Variável Aleatória
Projeto		
μBPD	Baseline Planned Duration. Duração planejada do projeto no cronograma de linha de base. $\mu BPD = \sum_{i=1}^{i=n} \mu BPD_i$	Parâmetro
μPV_t	Planned Value. Custo planejado acumulado do projeto até o período t . $\mu PV_t = \sum_{i=1}^{i=n} \mu PV_{it}$	Parâmetro
μBAC	Budget at Completion. Custo planejado total do projeto no período de conclusão T_0 . $\mu BAC = \sum_{i=1}^{i=n} \mu BPV_i$	Parâmetro
AC_t	Actual Cost. Custo real acumulado do trabalho realizado do projeto até o período t . $AC_t = \sum_{i=1}^{i=n} AC_{it}$	Variável Aleatória
EV_t	Earned Value. Valor agregado - uma variável aleatória do custo planejado acumulado do trabalho realizado do projeto, até o período t . $EV_t = \sum_{i=1}^{i=n} EV_{it}$	Variável Aleatória
$PC_t(\%)$	Percentage Complete. Variável aleatória contínua, tal que $0 \leq PC_t \leq 100\%$. Indica a porcentagem de conclusão do projeto no período t , comparado ao cronograma de linha de base. $PC_t = \frac{EV_t}{\mu BAC}$	Variável Aleatória
ES_t	Earned Schedule. Representa o momento em que o valor agregado do projeto no período t (EV_t) estava planejado ocorrer, de acordo com o cronograma de linha de base do projeto. Ou seja, o EV no momento t , é igual ao PV no momento ES. $\mu PV_{ES_t} = EV_t \text{ ou } ES_t = \mu PV_{EV_t}^{-1}$ Onde $PV_{EV_t}^{-1}$ denota a função inversa da curva PV no ponto EV_t	Variável Aleatória
Indicadores de Desempenho		
SPI_t (EVM)	Schedule Performance Index. Índice de desempenho de Cronograma até o período t . $SPI_t = \frac{EV_t}{\mu PV_t}$	Variável Aleatória
$*TPI_t$ (ESM)	Time Performance Index. Índice de desempenho de Prazo até o período t . $TPI_t = \frac{ES_t}{t}$	Variável Aleatória

Tabela 1. Notações das metodologias EVM e ESM utilizadas neste trabalho

* O indicador de desempenho de prazo da metodologia ESM é frequentemente denominado SPI(t). Neste trabalho será adotado a terminologia TPIt (*Time Performance Index*) [Barraza et al. 2004] para evitar conflito com o indicador metodologia EVM - SPIt.

4. Controle estatístico de projeto

A abordagem de controle estatístico de projeto sob risco e incerteza se baseia no modelo de análise de risco de cronograma (*Schedule Risk Analysis*) proposto por Vanhoucke [2012], apresentado na Figura 1. Ela requer uma fase de planejamento do projeto para a elaboração de um cronograma de linha de base que serve como um ponto de referência durante os próximos três passos. O cronograma de linha de base é composto da rede do projeto com suas atividades, dependências, durações e custos. Nesta etapa, a duração (μBPD_i) e custo (μBPV_i) de cada atividade são escolhidos de forma determinística.

A segunda etapa é a definição do nível de incerteza associada a cada atividade por meio dos parâmetros das funções de distribuição de probabilidade associadas a cada atividade. Os parâmetros podem ser definidos pela avaliação e dados históricos, para projetos com boas referências, ou pela opinião de especialistas, caso não existam dados disponíveis para determinado projeto.

A terceira etapa é a simulação de Monte Carlo para simular o progresso do projeto com base nas distribuições de probabilidades utilizadas para descrever as incertezas das atividades. Este



modelo permite obter uma função de distribuição de probabilidade empírica da duração total do projeto e os valores esperados dos indicadores periódicos de desempenho de EVM ao longo do tempo, a partir da utilização de valores estocásticos para as durações das atividades em conjunto com a tradicional simulação de Monte Carlo.

Na última etapa, diferente do método proposto por Vanhoucke [2012], em que os resultados são analisados em função da criticidade de cada atividade para a duração total do projeto, o método proposto neste trabalho utiliza o resultado do experimento de simulação para determinar os limites de controle dos indicadores de desempenho periódicos de prazo do projeto para a construção dos gráficos de controle.

5. Estudo de Caso – Projeto Expansão

Nesta seção será apresentado um estudo de caso da criação dos gráficos de controle para o controle estatístico de projetos de bens de capital sob encomenda. Uma característica destes projetos é o regime de contratação EPC (*Engineering, Procurement and Construction*). Esta é uma forma particular de contratação usada em algumas indústrias onde o fornecedor EPC é responsável por todas as atividades do projeto, desde a engenharia, passando pelo fornecimento de todos os equipamentos comprados e fabricados, pela construção civil das instalações e montagem dos equipamentos, pelo comissionamento e entrega do projeto para o usuário final ou proprietário do bem de capital.

Figura 2 mostra a rede do projeto com as 33 atividades do “Projeto Expansão”. O número acima de cada nó representa sua duração planejada (determinística).

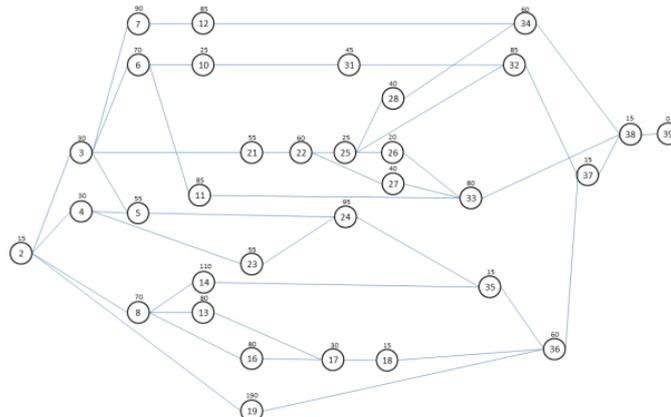


Figura 2. Rede – “Projeto Expansão” (criado pelo autor)

Figura 3 mostra o Gráfico de Gant do “Projeto Expansão” com a duração e o custo planejados para cada atividade. A estrutura analítica do projeto (WBS, *Work Breakdown Structure*) está dividida em cinco categorias de atividades dos projetos EPC (*engineering, procurement and construction*): Engenharia (*engineering*), Compras e Manufatura (*procurement*) Construção Civil e Montagem de Campo (*construction*).

A duração planejada do projeto (μBPD), considerando as durações deterministas é de 300 dias e o custo total planejado (μBAC) é R\$ 120.000.000.

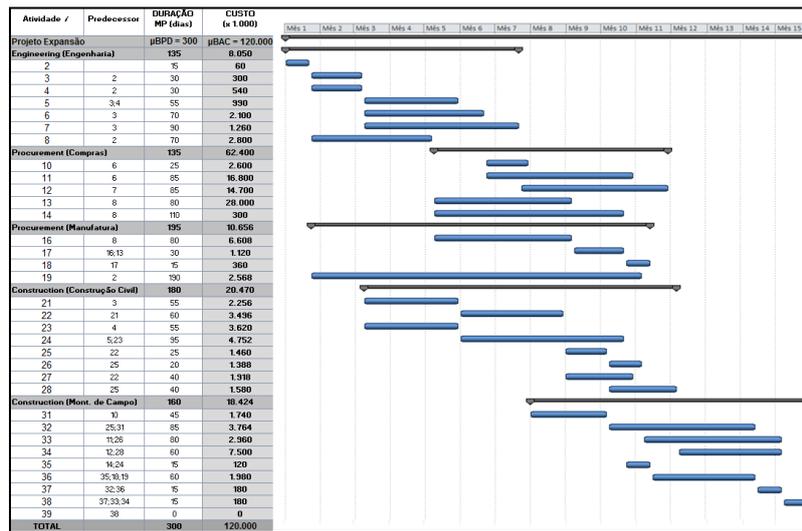


Figura 3. Gráfico de Gant – “Projeto Expansão”

Os parâmetros da distribuição de probabilidade da duração para cada atividade foram definidos com base em dados históricos. Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros da função de distribuição de probabilidade para a duração das atividades (μBPD_i), considerando que a duração da atividade siga uma distribuição triangular. Os parâmetros da distribuição triangular são: a, b e c que representam respectivamente, a duração mínima, a máxima e a mais provável. A média e desvio padrão de uma distribuição triangular são dados conforme as expressões (1) e (2).

$$\mu\text{BPD}_i = \frac{(a + b + c)}{3} \quad 1$$

$$\sigma\text{BPD}_i = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc}{12}} \quad 2$$

Atividade /	Predecessor	DURAÇÃO (dias)			CUSTO (x 1.000)	
		Min (a)	MP (c)	Max (b)	$\mu\text{BPD}_i = \frac{(a+b+c)}{3}$	μBAC_i
Projeto Expansão					135	120.000
Engineering (Engenharia)					135	8.050
2			10	15	20	60
3			2	25	30	300
4			2	20	30	540
5			3,4	45	55	55,0
6			3	60	70	70,0
7			3	80	90	90,0
8			2	50	70	80,0
Procurement (Compras)					135	62.400
10			6	20	25	25,0
11			6	70	85	85,0
12			7	70	85	85,0
13			8	70	80	80,0
14			8	100	110	110,0
Procurement (Manufatura)					195	10.656
15			8	70	80	80,0
17			16,13	25	30	30,0
18			17	12	15	15,0
19			2	170	190	190,0
Construction (Construção Civil)					180	20.470
21			3	45	55	55,0
22			21	50	60	60,0
23			4	45	55	55,0
24			5,23	60	95	95,0
25			22	20	25	25,0
26			25	18	22	20,0
27			22	35	40	40,0
28			25	30	40	40,0
Construction (Montagem)					160	18.424
31			10	35	45	45,0
32			25,31	75	85	85,0
33			11,26	75	80	80,0
34			12,28	45	60	60,0
35			14,24	12	15	15,0
36			35,19,19	50	60	60,0
37			32,36	12	15	15,0
38			37,33,34	12	15	15,0
39			38	0	0	0,0

Tabela 2. Parâmetros da Distribuição da Duração e Custo das Atividades – “Projeto Expansão”

Foram simuladas 1000 execuções do “Projeto Expansão” para obter dados de desempenho do projeto e os indicadores de desempenho de valor agregado apresentados na Seção 3. A variação da duração de cada atividade apresenta impacto no desempenho do projeto ao longo do tempo. O indicador de desempenho de cronograma (da metodologia EVM) denotada por SPI_t e o indicador de desempenho de prazo, (da metodologia ESM), denotada por TPI_t , serão utilizadas para monitorar o desempenho do projeto.



Com os dados da simulação, é possível calcular as variáveis AC_t , e EV_t e compará-las com o valor planejado PV_t para cada período de revisão t . O período de revisão foi definido em um mês (20 dias úteis), que é um período usual de avaliação de um projeto deste porte, com duração de mais de um ano. Na vida real, a cada mês, a equipe de projeto deve calcular o avanço real do projeto, comparar com o avanço planejado, identificar os desvios e oportunidades e definir os planos de ação para tratar os desvios que estejam além do aceitável.

Figura 4 apresenta um exemplo da avaliação do progresso do projeto no décimo primeiro mês do projeto ($t = 220$ dias). Na Tabela 3 estão destacados os valores de PV_t , AC_t e EV_t acumulados até o período e o cálculo da porcentagem de conclusão.

$$PC_t = \frac{EV_t}{BAC} = \frac{101.702}{120.000} = 84,8\% \quad 3$$

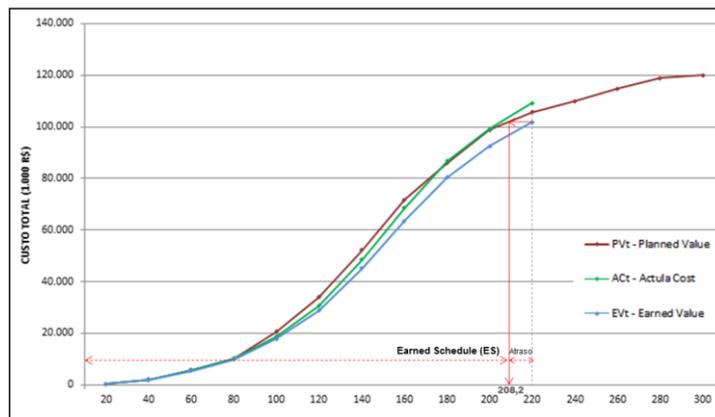


Figura 4. *Earned Value / Earned Schedule Management* – “Projeto Expansão” – Período $t = 220$ dias

É possível verificar visualmente pela diferença das curvas que, no período $t = 220$ dias, o projeto apresenta desvio de cronograma, uma vez que a linha EV_t está abaixo da linha PV_t . É possível calcular estas diferenças por meio do SPI_t :

$$SPI_{220} = \frac{EV_{220}}{PV_{220}} = \frac{101.702}{105.673} = 0,96 \quad 4$$

Este valor menor do que 1 para o SPI_{220} indica que o projeto apresenta atraso, ou seja, que avanço real do projeto, representado pelo EV_t , é menor do que o avanço planejado para o período atual $t = 220$ dias.

Esse exemplo permite verificar a deficiência do indicador SPI_t , da metodologia EVM, para determinar o desvio real no cronograma do projeto, uma vez que o desvio no prazo é calculado por meio de valores monetários do PV_t e EV_t .

Conforme apresentado na Seção 2, Lipke (2003) propôs uma extensão da abordagem de EVM que ficou conhecida como *Earned Schedule Management* (ESM), que, segundo o autor, fornece informações mais confiáveis e úteis sobre desempenho de duração do projeto. O método se propõe a produzir indicadores baseados no tempo, ao contrário dos indicadores baseados em custo oferecidos pelo EVM, para o desempenho de prazo do projeto.

Nesta abordagem, a variável aleatória que mede a evolução do prazo do projeto, *Earned Schedule* (ES_t), é definida como o momento em que o valor agregado do projeto no período t (EV_t) estava planejado ocorrer, de acordo com o cronograma de linha de base do projeto (i.e $EV_t = \mu PV_{ES_t}$). É possível verificar graficamente na Figura 4 a defasagem do ES_t em relação ao período atual $t = 220$ dias.

ES_t pode ser definido a partir da função inversa da curva de μPV_t no ponto EV_t :

$$ES_t = \mu PV_{EV_t}^{-1} \quad 5$$

Dado $t_0 = 200$ e $t_{0+1} = 220$, é possível calcular ES_t por meio da interpolação:



$$ES_t = t_0 + \left(\frac{(EV_t - \mu PV_{t_0})}{(\mu PV_{t_0+1} - \mu PV_{t_0})} \times 20 \right) = 200 + \left(\frac{(101.702 - 98.919)}{(105.673 - 98.919)} \times 20 \right) = 208,2 \quad 6$$

O coeficiente 20 é utilizado para obter o resultado em dias (1 Período = 20 dias).
Com o valor de ES_t é possível calcular TPI_t :

$$TPI_{220} = \frac{ES_{220}}{t} = \frac{208,2}{220} = 0,95 \quad 7$$

Tabela 3 apresenta os valores periódicos de ES_t e TPI_t até a data atual ($t = 220$ dias).

Período t	Mês	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6	Mês 7	Mês 8	Mês 9	Mês 10	Mês 11	Mês 12	Mês 13	Mês 14	Mês 15
	Dias	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
EVM	PV _t	468	2.098	5.841	10.288	20.665	34.046	52.296	71.624	85.984	98.919	105.673	110.032	114.817	118.950	120.000
	AC _t	433	2.055	5.675	10.225	18.839	30.743	48.525	68.580	86.683	99.292	109.287				
	EV _t	415	1.963	5.487	9.930	17.965	28.812	45.200	63.641	80.458	92.437	101.702				
	PC (%)	0,3%	1,6%	4,6%	8,3%	15,0%	24,0%	37,7%	53,0%	67,0%	77,0%	84,8%				
	SPI _t	0,89	0,94	0,94	0,97	0,87	0,85	0,86	0,89	0,94	0,93	0,96				
ESM	ES _t	18,8	38,3	58,4	78,4	95,6	112,9	132,5	151,7	171,1	190,0	208,2				
	TPI _t	0,94	0,96	0,97	0,98	0,96	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95				

Tabela 3. Variáveis e Indicadores Periódicos – “Projeto Expansão” – Período $t = 220$ dias

Os dados simulados serão utilizados para construir os limites de controle empíricos para os indicadores de desempenho de projeto SPI_t e TPI_t .

Na literatura existem dois métodos para se determinar os limites de controle no monitoramento de desempenho do projeto. O primeiro, utilizado por Wang et al. [2006], Leu e Lin [2008] e Aliverdi et al. [2013], a média e o desvio padrão são calculados considerando uma única população de indicadores SPI_t para todos os períodos de revisão do projeto. Desta forma, são gerados gráficos de controle com limites estacionários. No segundo método, sugerido por Colin e Colin & Vanhoucke [2014], cada período de medição é uma população e calculam-se a média e desvio padrão para cada um desses períodos. Desta forma, são gerados gráficos de controle com limites variáveis, de acordo com a fase do projeto. Neste trabalho, o segundo método será adotado para se avaliar o comportamento em cada fase distinta dos projetos EPC.

Para se calcular os limites de controle será adotado um erro do tipo I, $\alpha = 10\%$. Figura 5 apresenta o gráfico de controle de valores individuais do indicador SPI_t , com os limites de controle calculados para cada período de revisão t . A linha central representa a média dos valores do indicador de desempenho SPI_t em cada período de revisão para as 10.000 rodadas de simulação de Monte Carlo. As linhas externas são os Limites Superior e Inferior de Controle (LSC e LIC, respectivamente) e indicam os limites de controle estatístico do projeto, quando apenas os desvios esperados, derivados da natureza estocástica do projeto, estão presentes.

Durante a execução do projeto, o indicador de desempenho periódico é medido e plotado no gráfico, de forma que um ponto acima do LSC indica que o projeto está adiantado em relação aos desvios esperados para cada período e que existem oportunidades para se reprogramar o projeto e finalizá-lo antes da data planejada. Da mesma forma, um ponto abaixo do LIC indica que o projeto apresenta um atraso maior que o desvio esperado em cada período de revisão e alguma ação precisa ser tomada para a correção do progresso do projeto. Na Figura 5, foram plotados os valores periódicos do indicador SPI_t de uma rodada de simulação que finalizou com atraso para ilustrar os períodos em que o gráfico apontou um atraso superior ao desvio esperado, indicando que o projeto estava fora de controle estatístico e que alguma ação corretiva precisaria ser colocada em prática.

Vale ressaltar que este gráfico de controle X para o SPI_t , utilizado no estudo de Colin e Vanhoucke [2014], mostra a deficiência deste indicador quando o projeto se aproxima da sua conclusão, uma vez que, mesmo para projetos que apresentam grandes atrasos, este indicador sempre converge para o valor 1, o que dificulta o reconhecimento do desvio de prazo do projeto e a interpretação do sinal de alerta do gráfico de controle. Este resultado está de acordo com os achados de Lipke [2003], Vandevoorde e Vanhoucke [2006] e Khamooshi e Golafshani [2014] que afirmam que, a partir do último terço do projeto, o SPI_t se torna pouco confiável, justamente no período mais crítico do projeto onde as previsões de conclusão necessitam ser mais acuradas.

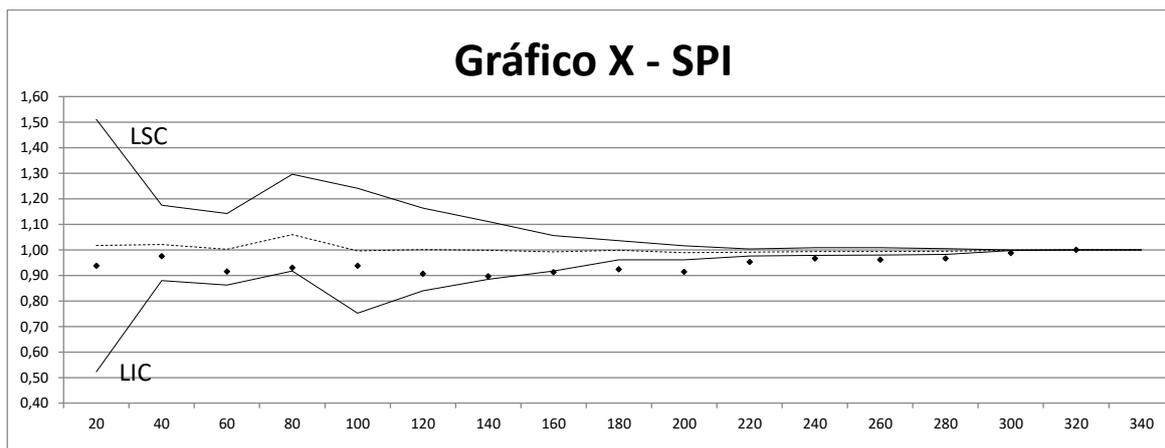


Figura 5: Gráfico de Controle X para Indicador de Desempenho SPI

Para superar esta deficiência, foi sugerido, neste trabalho, a utilização do indicador de desempenho de prazo do projeto da metodologia ESM, o TPI_t . Da mesma forma que no exemplo anterior, foi definido um $\alpha = 10\%$ para se calcular os limites de controle. Figura 6 apresenta o gráfico de controle dos valores individuais do indicador TPI_t , com os limites de controle LIC e LSC calculados para cada período de revisão t .

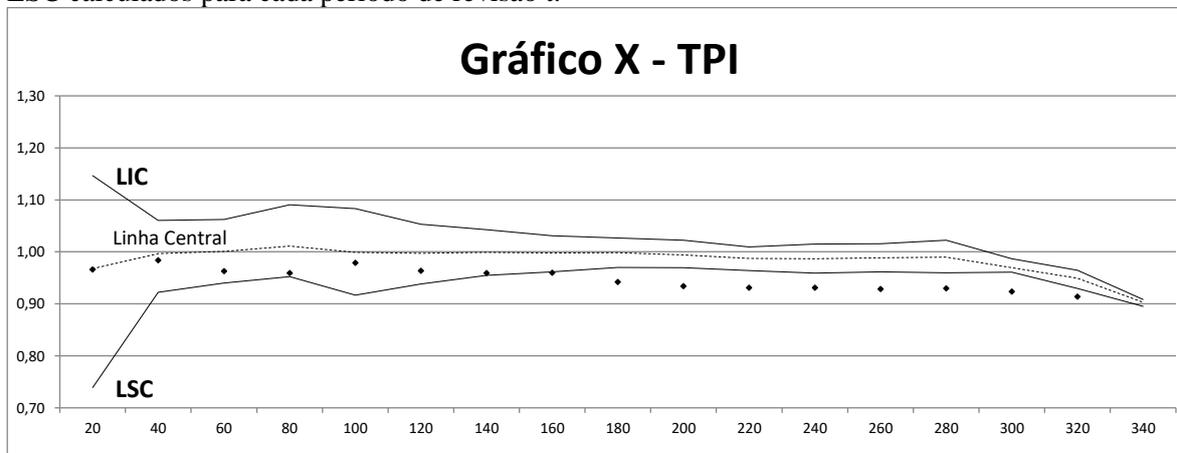


Figura 6: Gráfico de Controle X para Indicador de Desempenho TPI

Foram plotados os valores periódicos do indicador TPI_t para a mesma rodada de simulação que finalizou com atraso para ilustrar os períodos em que o gráfico apontou um atraso superior ao desvio esperado. Pode-se verificar que este gráfico, não apresenta a mesma deficiência do gráfico SPI_t da Figura 5, uma vez que os limites de controle não convergem simultaneamente para o valor 1 quando o projeto se aproxima de sua conclusão e os pontos plotados no gráfico fora do limite de controle são os sinais de alerta que indicam que o projeto está de fato atrasado.

6. Conclusões

Este trabalho propôs uma abordagem de controle estatístico de projetos utilizando gráficos de controle no monitoramento de prazo de projetos de bens de capital sob encomenda. As variáveis monitoradas são os indicadores de desempenho de prazo de projeto, o SPI_t , (*Schedule Performance Index*) da metodologia *Earned Value Management* (EVM), e o TPI_t (*Time Performance Index*), da metodologia *Earned Schedule Management* (EVM).

Esta abordagem integrada contribui para melhorar a capacidade do EVM e ESM em interpretar os desvios dos indicadores de desempenho ocorridos na fase de execução do projeto e distinguir entre desvios esperados em função da natureza probabilística da duração das atividades, quando o projeto está em estado de controle estatístico e apenas as causas aleatórias estão presentes, e os desvios não esperados, que devem ser interpretados como uma evidência de que o projeto pode estar fora de controle e com um risco real de atraso.



Embora as metodologias de valor agregado EVM e ESM sejam bem estudadas no campo do gerenciamento de projetos, ainda há um número limitado de pesquisa sobre a utilização do controle estatístico de processo para melhorar a eficiência destas metodologias no controle do prazo de projetos. A maioria dos estudos de aplicação de gráficos de controle para monitorar o prazo de projetos encontrados na literatura trata especificamente do indicador de controle de prazo SPI (*Schedule Performance Index*), da metodologia EVM, um indicador que, segundo diversos autores [Lipke 2003; Vandevorde e Vanhoucke 2006; Khamooshi e Golafshani 2014] apresenta bom desempenho nas fases iniciais dos projetos mas falha em reconhecer um mal desempenho de prazo quando o projeto se aproxima de sua conclusão. O gráfico de controle apresentado na Figura 6 comprova esta afirmação e mostra que o indicador SPI converge para 1 no final do projeto e torna difícil identificar o sinal de alerta mesmo quando o projeto está atrasado. Para superar essa falha, este trabalho propôs a utilização simultânea de diferentes indicadores de desempenho de prazo, o SPI e o TPI, para aumentar o poder de identificação dos sinais de alerta dos gráficos de controle nas diversas fases de execução de projeto.

Uma contribuição adicional deste trabalho é sua aplicação na indústria de bens de capital sob encomenda, uma vez que não foi encontrado na literatura nenhum estudo da utilização de controle estatístico de projetos neste ambiente, intrinsecamente ligado à gestão de grandes projetos complexos, em que o controle de prazo é fundamental para o sucesso do negócio.

Em relação aos dados amostrais, vale ressaltar que os três trabalhos pioneiros utilizam dados históricos como amostra dos indicadores periódicos para gerar os limites de controle. A deficiência desta abordagem está na baixa disponibilidade de dados históricos em grande parte dos tipos de projetos, uma vez que, por definição, cada projeto é único e tem horizontes de tempo diferentes. Apenas o trabalho de Colin e Vanhoucke [2014] propôs a simulação de Monte Carlo para gerar o universo de possíveis execuções do projeto real que será controlado. No entanto, adotam simplificações que podem influenciar o resultado, como a utilização da distribuição uniforme para a duração das atividades e a simplificação realizada para os custos de cada atividade.

Para superar algumas destas deficiências e melhorar a aplicação deste método no ambiente estudado, este trabalho utilizou uma distribuição triangular com parâmetros específicos para a duração de cada atividade e atribuiu uma forma diferente de alocação de custos em função de cada tipo de atividade dos projetos EPC (engenharia, fornecimento e construção).

Sobre as limitações deste trabalho, vale ressaltar a relação linear entre o custo e a duração das atividades, o que pode nem sempre ser verdade para algumas atividades dos projetos EPC, e a própria simplificação do método em controlar apenas o prazo do projeto, uma vez que para se contornar os desvios de custo, é possível adotar medidas que afetem o prazo dos projetos.

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se a utilização deste método para o monitoramento do custo do projeto em conjunto com o controle de prazo, a utilização diferentes funções de distribuição para o custo de cada tipo de atividade e a avaliação do poder dos gráficos de controle.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte parcial deste projeto.

Referências

- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J.M., López-Paredes, A. (2014). A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics. *International Journal of Project Management*, 32: 423–434.
- Acebes, F., Pareda, M., Poza, D., Pajares, J., Galán, J.M. (2015). Stochastic earned value analysis using Monte Carlo simulation and statistical learning techniques. *International Journal of Project Management* 33: 1597–1609
- Aliverdi, R. Moslemi Naeni, L. Salehipour. A. (2013) Monitoring project duration and cost in a construction project by applying statistical quality control charts. *International Journal of Project Management* 31: 411–423



- Anbari, F.T. (2003). Earned value project management method and extensions. *Project Management Journal* 34:12-23
- Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2015). Evaluation of deterministic state-of-the-art forecasting approaches for project duration based on earned value management. *International Journal of Project Management*, 33: 1588-1596.
- Colin, J. e Vanhoucke, M. (2014). Setting tolerance limits for statistical project control using earned value management. *Omega*. 49:107–122
- Colin, J. e Vanhoucke, M. (2015). Developing a framework for statistical process control approaches in project management. *International Journal of Project Management*. 33:1289–1300.
- Christensen, D.S. (2015). Web page. <http://www.evmlibrary.org/search.asp>. Acessado: 2017-03-17. Earned value bibliography.
- Elmaghraby, S.E. (2005). On the fallacy of averages in project risk management. *European Journal of Operational Research*, 165: 307-313.
- Fleming, Q. e Koppelman, J. (2005). *Earned Value Project Management*. Edição 3. Project Management Institute, Newton Square, Pennsylvania.
- Khamooshi, H. e Golafshani, H. (2014). EDM: Earned Duration Management, a new approach to schedule performance management and measurement. *International Journal of Project Management*, 32: 1019-1041.
- Leu, S.S. e Lin, Y.C. (2008). Project performance evaluation based on statistical process control techniques. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134: 813-819.
- Lipke, W. (2003). Schedule is different. *Measurable News* 31:31–34.
- Montgomery, D.C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control*. Edição 6. John Wiley & Sons, New York.
- Pajares, J. e López-Paredes, A. (2011). An extension of the EVM analysis for project monitoring: the cost control index and the schedule control index. *International Journal of Project Management*. 29:615–621.
- Project Management Institute – PMI. (2008). *Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos - PMBOK*. 4. ed. EUA. PMI.
- Vandevoorde, S. e Vanhoucke, M. (2006). A comparison of different project duration forecasting methods using earned value metrics. *International Journal of Project Management* 24:289–302.
- Vanhoucke, M. (2012). *Project management with dynamic scheduling*. Springer Berlin Heidelberg.
- Wang, Q., Jiang, N., Gou, L., Che, M., Zhang, R. (2006). Practical experiences of cost/schedule measure through earned value management and statistical process control. *Software Process Workshop*. Springer Berlin Heidelberg. 348-354.
- Willems, L.L., e Vanhoucke, M. (2015). Classification of articles and journals on project control and earned value management. *International Journal of Project Management*, 33: 1610-1634.