

Dimensionamento de *Kanban* Estatístico por Simulação de Monte Carlo Utilizando o Software *Crystal Ball*

Alexandre Leme Fernando Augusto Silva José Arnaldo Barra Douglas de Almeida
Sanches Marins Montevechi Ribeiro
Universidade Estadual Paulista - UNESP / Universidade São Francisco - USF

RESUMO

As inúmeras incertezas desconsideradas no dimensionamento determinístico de Kanbans podem levar o sistema a condições muito distantes da ótima. Neste trabalho é apresentada uma proposta para dimensionamento de kanbans onde cada variável envolvida é tratada como uma variável aleatória, que pode ser obtida pelo condicionamento de dados históricos ou estimada. Após serem obtidas tais variáveis, é aplicada a Simulação de Monte Carlo para a geração da distribuição de probabilidade do número de cartões kanban. Considerando um determinado nível de serviço adotado pela empresa, determina-se o número de cartões kanban que melhor se ajusta ao sistema. Para o condicionamento dos dados históricos e para a execução da Simulação de Monte Carlo é utilizado o software Crystal Ball.

Palavras-Chave: Monte Carlo. *Kanban*. Simulação. *Crystal Ball*.

1. INTRODUÇÃO

Sendo a base da filosofia *JIT (Just in Time)*, o sistema *Kanban* foi desenvolvido na década de 60, pelos engenheiros da Toyota Motors Cia., com o objetivo de tornar simples e rápidas as atividades de programação e controle produção. Atualmente, o *Kanban* não é uma simples ferramenta de controle de inventário, mas também um recurso que proporciona flexibilidade e agilidade às células de alto mix (SCHOMBERGER, 2002).

A dificuldade da utilização do sistema surgiu com as incertezas inerentes aos processos produtivos como as oscilações de demanda, dispersões no tempo de execução de tarefas e até diferenças em quantidades produzidas, devido a problemas de qualidade.

Na intenção de solucionar o problema, foi introduzido um fator de segurança no dimensionamento determinístico, que amplia o número de cartões *kanban* de forma descontrolada, o que pode afastar o dimensionamento da situação ótima.

Na seção seguinte, é apresentada a metodologia da pesquisa, seguida pelos conceitos básicos sobre *Kanban* e Simulação de Monte Carlo. Finalizando, é apresentada uma aplicação e respectivos resultados e conclusões.

2. METODOLOGIA

Na pesquisa em questão, a importância da exploração e descrição dos métodos se sobrepõe à do objeto de pesquisa. A abordagem, no caso, sendo quantitativa, destaca a evidência de relações causais, operacionalização de conceitos e conclusões que, conforme o enfoque, podem ser generalizadas (BRYMAN, 1995).

O conceito de pesquisa descritiva também se aplica ao caso, pois esta tem como objetivo a descrição de características de determinado processo estudado, ou o estabelecimento de relações entre variáveis.

Algumas pesquisas descritivas vão além da simples identificação da existência de relações entre variáveis, pretendendo-se determinar a natureza dessa relação, tendo-se, então, uma pesquisa descritiva que se aproxima da explicativa.

Há casos de pesquisas, que, embora definidas como descritivas, proporcionam uma nova visão do problema, o que as aproxima das pesquisas exploratórias.

Metodologia	
Abordagem	Quantitativa
Tipo de Pesquisa	Descritiva (Exploratória)
Método de Pesquisa	Experimentação / Simulação

Figura 1 – Metodologia da Pesquisa

O método de pesquisa adotado é, portanto, a Pesquisa Experimental, pois segundo BRYMAN (1995), de um modo geral, além de se adequar ao caso em questão, o experimento representa o melhor exemplo de pesquisa científica. Consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Na execução da pesquisa, um *kanban* é dimensionado de forma determinística e de forma estatística e assim comparados os resultados.

No caso do dimensionamento determinístico, as variáveis são obtidas a partir das médias dos dados históricos e no caso do dimensionamento estatístico, as variáveis aleatórias são obtidas pelo condicionamento dos dados históricos a uma determinada distribuição de probabilidade, com respectivo controle de P-Value.

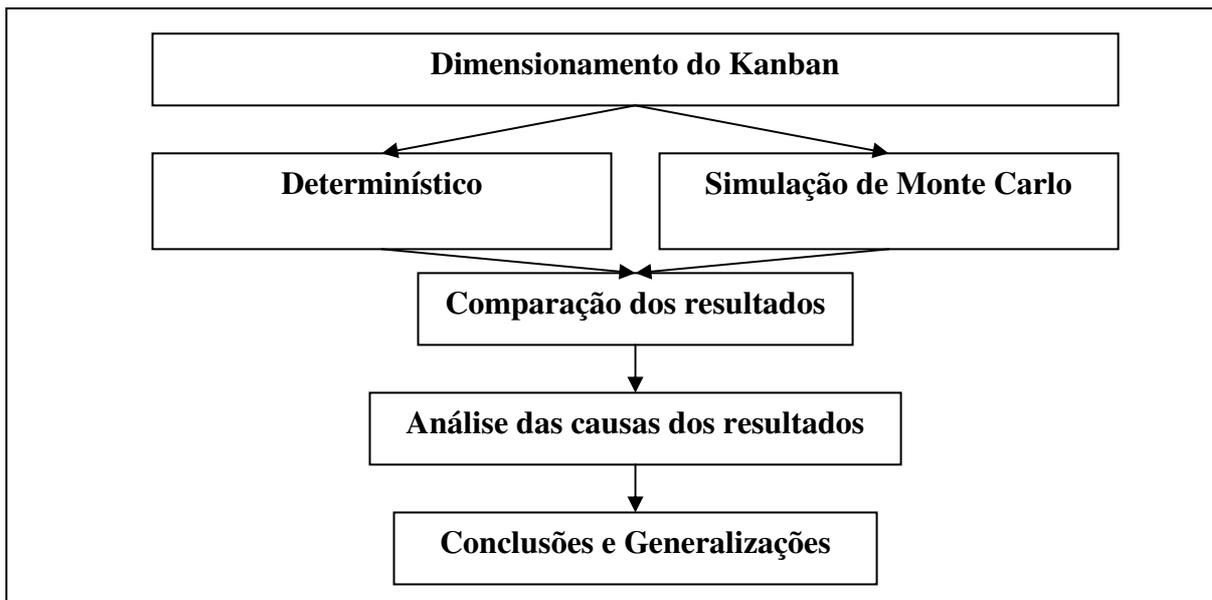


Figura 2 – Etapas da Pesquisa.

3. O SISTEMA KANBAN

A idéia básica do Sistema *Kanban* é atribuída ao japonês Taiichi Ohno, vice-presidente da *Toyota Motors Cia.*, na década de 60, e é a base da metodologia *Just in Time*, do Sistema Toyota de Produção e principalmente do *Pull System* (SCHOMBERGER, 2002).

Kanban é uma palavra japonesa que significa literalmente registro ou placa visível. Significa um cartão de sinalização que controla os fluxos de produção em uma indústria. O cartão pode ser substituído por outro sistema de sinalização, como luzes, caixas vazias e até locais vazios demarcados.

Coloca-se um *Kanban* em quadros específicos de uma linha de produção, para indicar a necessidade de um item em determinada quantidade. Quando não há nenhum cartão no quadro não se deve produzir nenhuma peça. O *Kanban* permite agilizar a entrega e a produção de peças além de controlar o estoque intermediário ou *WIP (Work in Process)*.

Pode ser empregado em indústrias montadoras, desde que a demanda não oscile em demasia. Os *Kanbans* físicos (cartões ou caixas) transitam entre os locais de armazenagem e produção substituindo formulários e outras formas de solicitação de peças, permitindo enfim que a produção se realize no ambiente *JIT (Just in Time)*. (SCHOMBERGER, 2002).

Entre os principais conceitos do *JIT* pode-se destacar (OHNO, 1997):

- Eliminação do desperdício;
- Trabalhadores multifuncionais e autônomos;
- Defeito zero (*Poka Yoke*);
- Produção em pequenos lotes;
- *Setup* rápido;
- Utilização de Layout celular;
- *Kaizen*;
- 5 S's;
- Sistema *Kanban (Pull System)*.

O sistema *Kanban* é um instrumento de controle de produção. Ele tem a função de ser um pedido de produção no departamento de fabricação e a função de ser a instrução de retirada no processo subsequente (SCHOMBERGER, 2002).

Uma das principais funções dos *Kanbans*, além das já mencionadas, é acelerar melhorias, visto que informa automaticamente problemas em estações de trabalho por meio da redução dos estoques, o que expõe os problemas da produção por intermédio das paradas de linha (OHNO, 1997). Portanto, pode-se afirmar que o *Kanban* é a principal ferramenta do *JIT*.

Uma ilustração do Sistema Produtivo Puxado (*Pull System*), comparado com o Empurrado (*Push System*) pode ser observada na Figura 3.

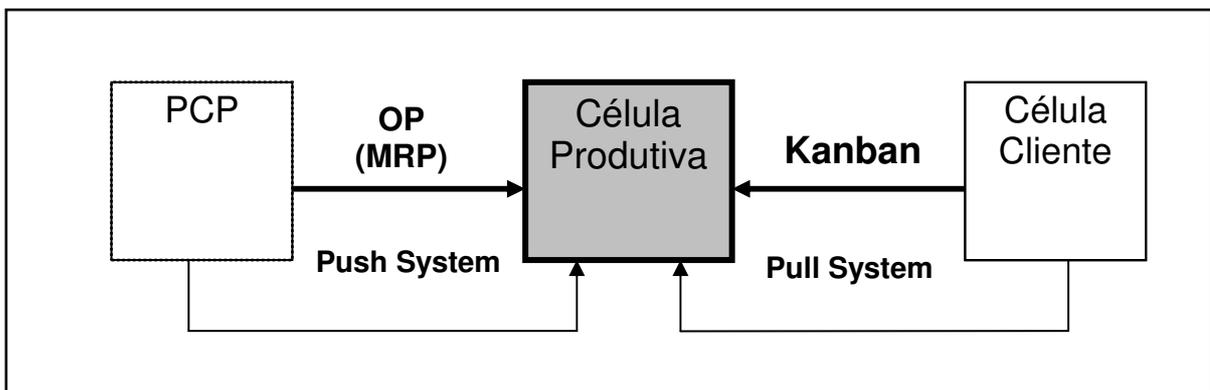


Figura 3. *Push System x Pull System* (Fonte: autores).

3.1. O DIMENSIONAMENTO DE KANBANS

O número de contêineres, e respectivos cartões *kanban*, que deve controlar o fluxo de produção de um determinado item, pode ser definido segundo (SCHOMBERGER, 2002) pela Eq. 1.

$$N = \left(\frac{D}{Q} \times T_r \times (1 + FS) \right) \quad (1)$$

Onde:

D: Demanda.

Q: Quantidade de unidades por contêiner.

Tr: tempo de resposta de Sistema.

FS: fator de Segurança.

O Tempo de Resposta do Sistema (Tr) pode ser decomposto em Tempo de Espera (Tp), Tempo de Preparação (Tp), Tempo de Operação (To) e Tempo de Movimentação (Tm).

O Tempo de Operação geralmente é obtido como unitário e, portanto, deve ser multiplicado pela quantidade de unidades em um contêiner (To = Tou x Q) sendo “Tou” o tempo de operação unitário. Portanto, tem-se:

$$N = \frac{D}{Q} \times (T_e + T_p + (T_{ou} \times Q) + T_t) \times (1 + FS) \quad (2)$$

4. A SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

De acordo com EVANS e OLSON (1998) a simulação de Monte Carlo é basicamente um experimento amostral cujo objetivo é estimar a distribuição de resultados possíveis da variável de interesse (variável de saída), com base em uma ou mais variáveis de entrada, que se comportam de forma probabilística de acordo com alguma distribuição estipulada.

Na visão de LAW e KELTON (2000), a simulação de Monte Carlo é uma abordagem que emprega a utilização de números aleatórios para resolver certos problemas estocásticos, em que a passagem do tempo não possui um papel relevante.

4.1. A LÓGICA DO MÉTODO DE MONTE CARLO

Segundo (EVANS e OLSON, 1998), a simulação de Monte Carlo é um processo de amostragem cujo objetivo é permitir a observação do desempenho de uma variável de interesse em razão do comportamento de variáveis que carregam elementos de incerteza.

Embora seja um conceito simples, a operacionalização desse processo requer o auxílio de alguns métodos matemáticos, como a geração de números pseudo-aleatórios, onde segundo EVANS e OLSON (1998) e VOSE (2000), destaca-se o método da transformada inversa.

Um número aleatório é definido como sendo um valor numérico escolhido ao acaso, conforme uma distribuição de probabilidade uniforme. Já a Função Densidade de Probabilidade (FDP) $F(x)$ de uma variável aleatória X , segundo EVANS e OLSON (1998), é dada por:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (3)$$

Tal função, que mostra a probabilidade $P(x)$ de que a variável X seja menor ou igual a x , para todo e qualquer x , possui as seguintes propriedades:

$$\frac{d}{dx} F(x) \geq 0; \quad (4)$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0 \quad (5)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1 \quad (6)$$

Desse modo, $F(x)$ é sempre não-decrescente e assume valores entre 0 e 1. Sendo assim, admitindo-se que a inversa dessa função exista, escolhendo-se ao acaso um determinado valor para $F(x)$, pode-se encontrar um único valor associado de x , seja de forma explícita ou através de um algoritmo computacional.

Portanto, dado que os números pseudo-aleatórios também possuem a propriedade de assumir valores apenas no intervalo entre 0 e 1, basta gerar um número aleatório “R”, substituí-lo diretamente em $F(x)$ e obter o valor associado de “x”. Esse é o método da transformada inversa (EVANS e OLSON, 1998).

De acordo com VOSE (2000), esse método, utilizado também por outros procedimentos de amostragem, não é aplicável para algumas distribuições de probabilidade, o que torna necessária a utilização de outros métodos. No entanto, o princípio básico utilizado é o mesmo, e, para os fins do presente trabalho, entende-se que a descrição realizada é suficiente.

Independentemente do método utilizado para viabilizar o processo de simulação, fica evidente a importância da escolha do gerador de números pseudo-aleatórios a ser utilizado.

4.2. O GERADOR DE NÚMEROS PSEUDO-ALEATÓRIOS

Como visto, tem-se que a base para o processo de amostragem realizado nas simulações de Monte Carlo é a geração de números pseudo-aleatórios. É a partir desse mecanismo que serão estimadas as distribuições das variáveis de interesse, tomando por base as premissas e as distribuições associadas às variáveis de entrada, bem como a inter-relação entre as mesmas.

De acordo com LAW e KELTON (2000), um algoritmo aritmético gerador de números pseudo-aleatórios deve satisfazer as seguintes condições:

- Os números produzidos devem parecer distribuídos conforme distribuição de probabilidade uniforme em determinado intervalo;
- Deve ser rápido na geração e consumir pouca memória;
- Deve propiciar a reprodutibilidade da seqüência gerada.

Portanto, previamente à execução da simulação, deve-se verificar se o gerador de números pseudo-aleatórios a ser utilizado satisfaz as propriedades enunciadas acima, seja através de testes ou de referências que dêem suporte à sua utilização, ou então utilizar um software específico para tal simulação.

5. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA EM ESTUDO

O posto de trabalho B monta peças em que um dos componentes é produzido no posto A. A demanda é de 7920 un/dia. A empresa deseja implantar um sistema *Kanban* entre os postos A e B utilizando um conjunto de contêineres que tem capacidade para 160 unidades do componente. O fator de Segurança é de 10% e os tempos (min) de preparação, de operação, de

transporte e de espera (tempo de resposta) são dados a seguir. Deseja-se determinar o número de cartões *kanban* que atenda a um nível de serviço mínimo de 95%.

Tabela 1. Tempo das atividades.

Posto A	
Atividades	Tempos (min.)
Espera	36
Preparação	14
Operação (por unidade)	0,8
Movimentação	5

Tabela 2. Dados do dimensionamento.

Dados do Dimensionamento.	
D=	7920
Q=	160
Te=	36
Tm=	5
Tp=	14
Tou=	0,8
Tot=	128
Tt=	183
FS=	0,1
N=	7

5.1. CÁLCULO DETERMINÍSTICO DO KANBAN

$$N = \frac{D}{Q} \times (T_e + T_p + T_{ou} \times Q + T_m) \times (1 + FS) \quad (7)$$

$$N = \frac{5,5}{160} \times (36 + 14 + (0,8 \times 160) + 5) \times (1 + 0,1) \quad (8)$$

$$N = 6,92 \cong 7 \quad (9)$$

5.2. CÁLCULO ESTATÍSTICO DO KANBAN POR SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo considera a mesma equação utilizada no método determinístico, porém as variáveis Demanda (d) e Tempos (Ti) são consideradas variáveis aleatórias com distribuições condicionadas conforme aplicação do software *Crystal Ball*.

5.2.1. CONDICIONAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA

Os dados históricos relacionados a tempos de atividades (Tabela 3) podem ser condicionados pelos métodos tradicionais, porém os dados de demanda devem receber uma atenção especial, pois a demanda pode não corresponder a uma série temporal estacionária, havendo tendência.

Para verificação de tendência, segundo TAYLOR (2006), deve-se determinar a equação de regressão linear da série temporal da demanda em um intervalo múltiplo do ciclo sazonal (se houver sazonalidade), e então verificar se o coeficiente angular é nulo ou próximo de zero. Tal teste é apresentado na Tabela 4 e foi realizado pelo software MINITAB 14.

DADOS HISTÓRICOS RELACIONADOS À DEMANDA:

Tabela 3. Histórico de Demanda.

Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda	787	806	793	792	793	799	779	791	787	804	790	791

	4	6	0	2	2	4	2	7	2	6	4	8
período	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Demanda	790	787	783	807	788	789	794	799	776	770	790	807
	9	5	6	0	5	0	3	2	6	9	3	6

A análise de Regressão apresentada pelo software MINITAB 14, apresenta um coeficiente angular de $(-1,02)$, que pode ser considerado suficientemente pequeno para a Série Temporal ser considerada estacionária.

Nos casos de Série Temporal não estacionária, um pré-requisito do sistema *kanban* não estaria sendo cumprido, ou seja, a demanda não é estável, situação que pode comprometer o dimensionamento do *kanban*. Se a série temporal apresentar tendência de aumento ou redução de demanda e mesmo assim o sistema *kanban* for mantido, ele deve passar por ajustes periódicos com base em algum método de previsão adequado ao caso em questão, tal situação não se aplica ao presente trabalho.

Tabela 4. Dados apresentados pelo software MINITAB 14.

Regression Analysis: Demanda versus N				
The regression equation is Demanda = 4021 - 1,02 N				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4021	1190	3,38	0,001
N	-1,02	83,27	-0,01	0,990

Ainda, em relação aos dados de demanda, deve-se encontrar qual distribuição de probabilidade melhor se condiciona aos dados históricos. Para encontrar tal distribuição, esses dados foram condicionados pelo software *Crystal Ball*, resultando na distribuição apresentada na Figura 4.

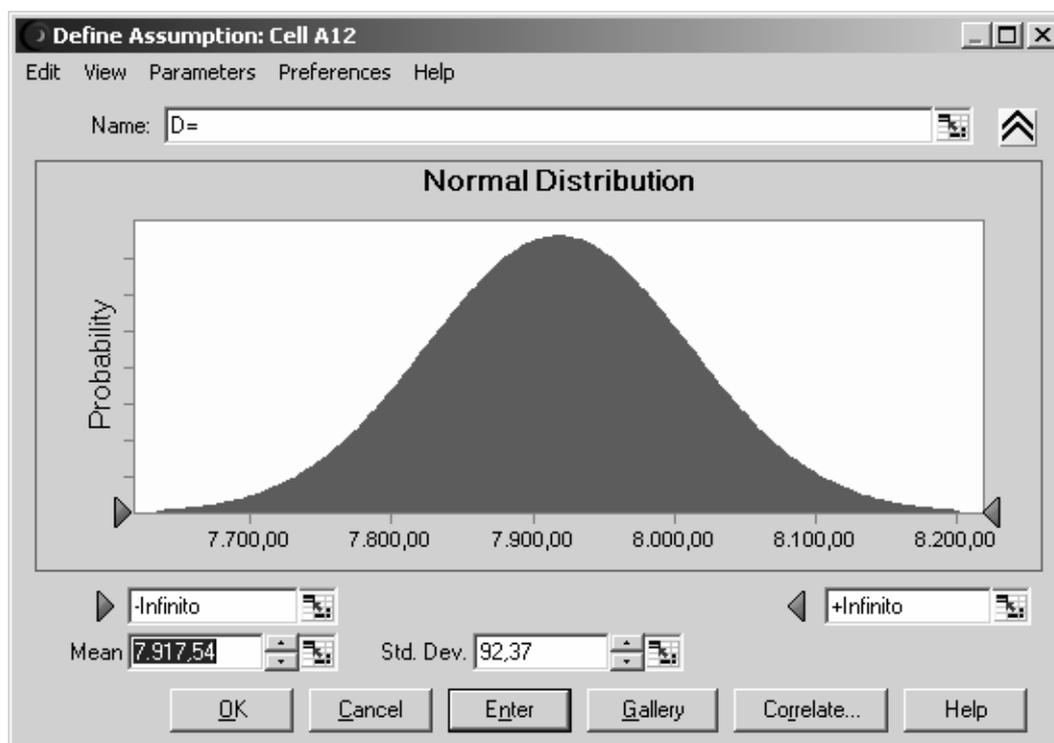


Figura 4. Condicionamento dos dados de demanda.

Tabela 5. Dados históricos relacionados aos tempos das atividades.

N	Te	Tp	To	Tm
1	26	16	1,02	8,63
2	32	13	0,91	4,43
3	43	19	0,94	7,73
4	36	11	0,84	4,55
5	32	14	1,05	8,31
6	39	23	1,02	3,63
7	33	13	1,05	6,89
8	41	15	0,85	1,97
9	36	10	0,74	6,30
10	36	13	0,73	5,73
11	47	13	0,77	6,43
12	36	14	0,53	5,89
13	26	10	0,62	4,57
14	31	18	0,91	3,09
15	41	16	1,13	7,79
16	39	15	0,64	4,30
17	38	16	0,74	1,94
18	39	12	0,82	4,52
19	40	21	0,95	6,99
20	38	17	1,00	8,71
21	34	18	0,89	3,92
22	36	18	0,79	3,79
23	42	8	0,86	3,08
24	38	18	0,97	4,06
25	36	12	0,71	4,43
26	31	9	0,90	3,62
27	38	12	0,79	6,90
28	33	2	0,83	5,02
29	38	22	0,69	6,50
30	34	11	0,42	8,37

Os dados históricos relacionados aos tempos das atividades foram condicionados através do software *Crystal Ball*. Esse condicionamento possibilitou o reconhecimento das distribuições de probabilidades mais adequadas para cada uma das variáveis aleatórias a considerar na simulação para determinação do número de cartões *kanban*.

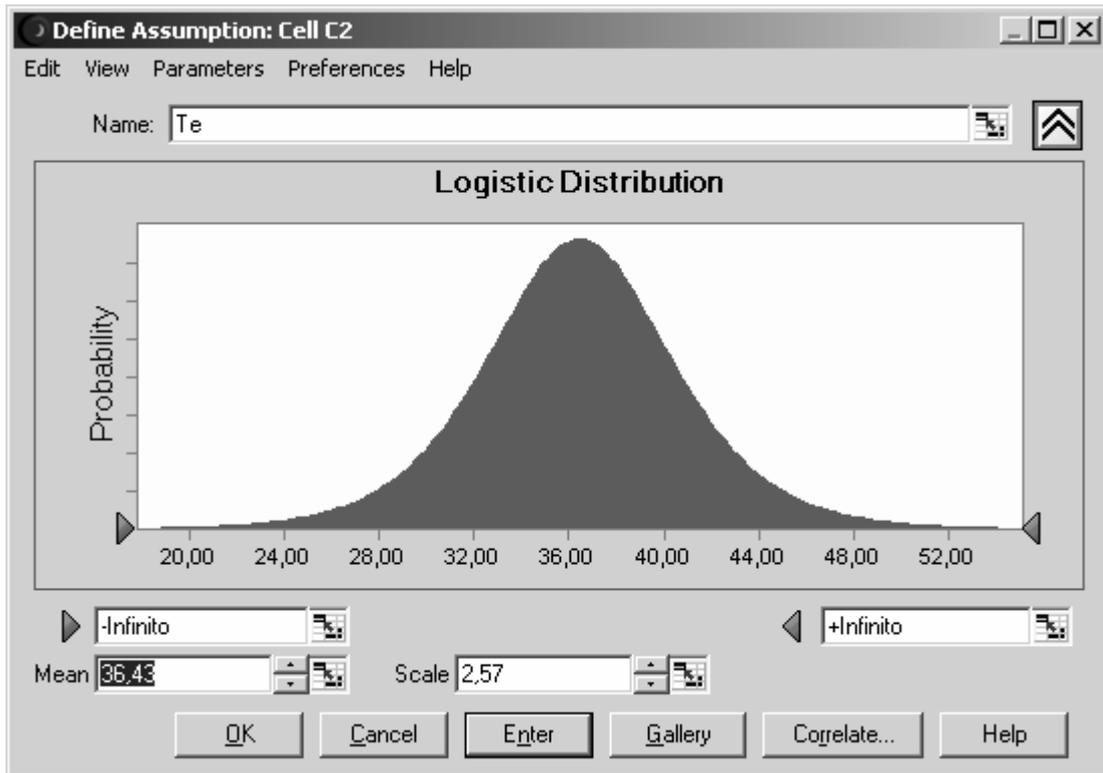


Figura 5. Condicionamento de Te.

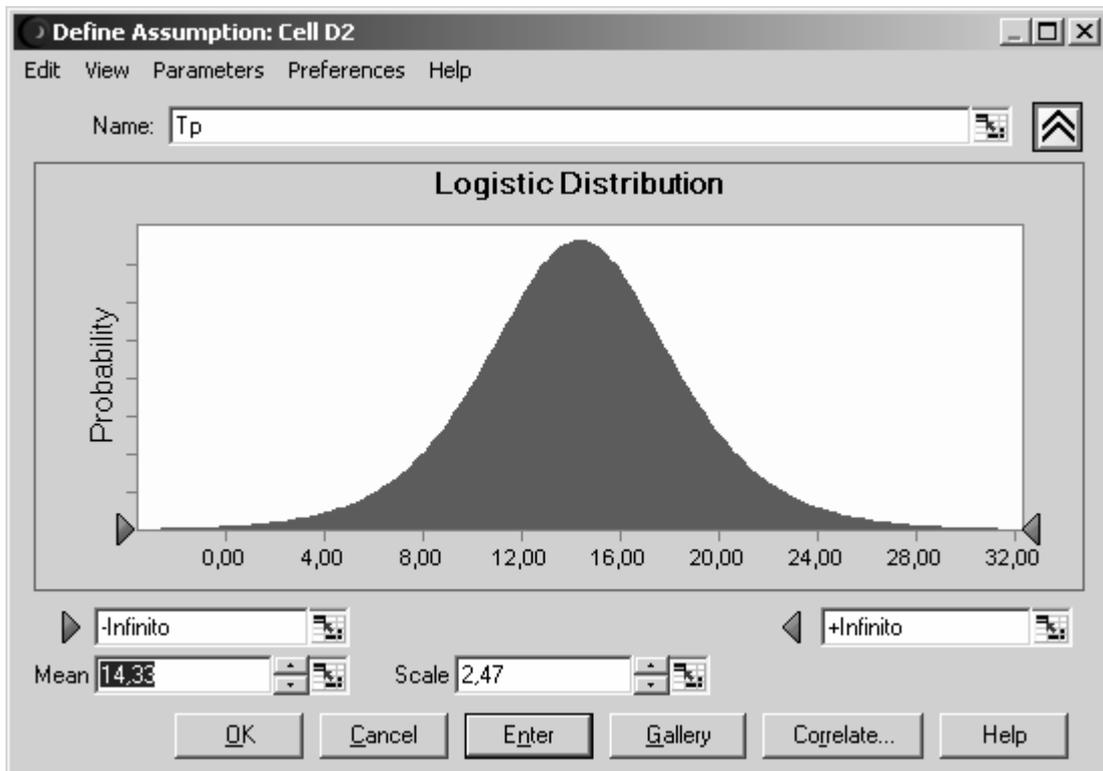


Figura 6. Condicionamento de Tp.

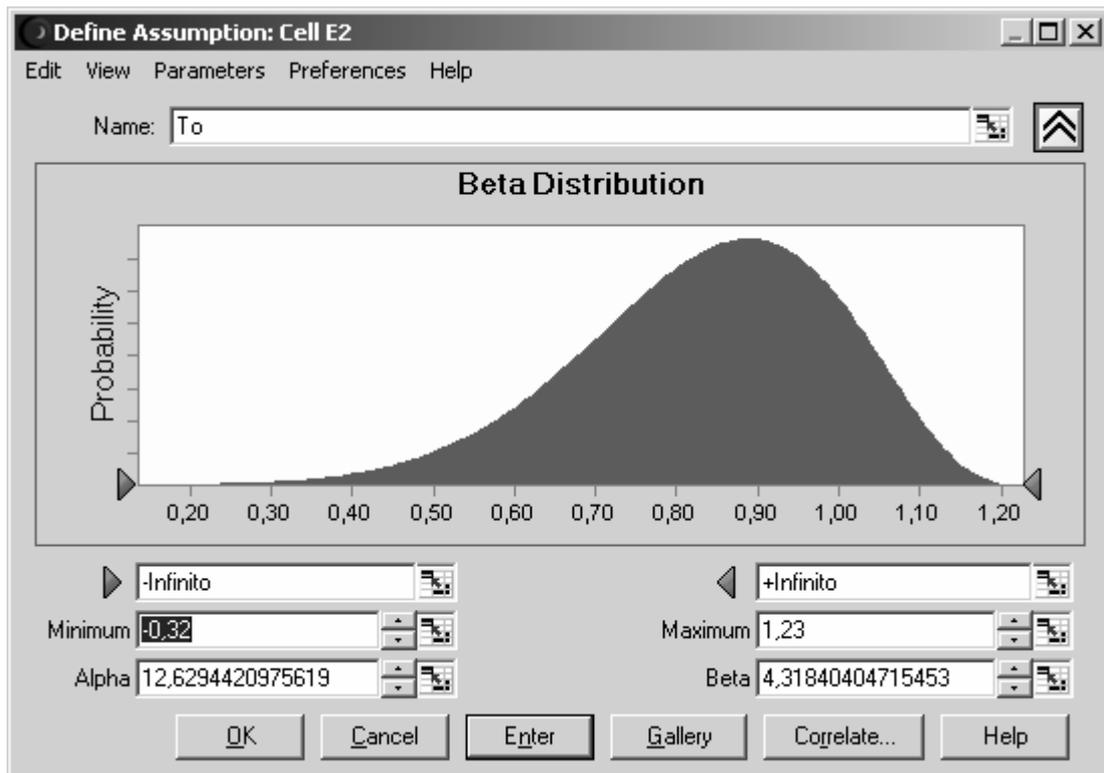


Figura 7. Condicionamento de To.

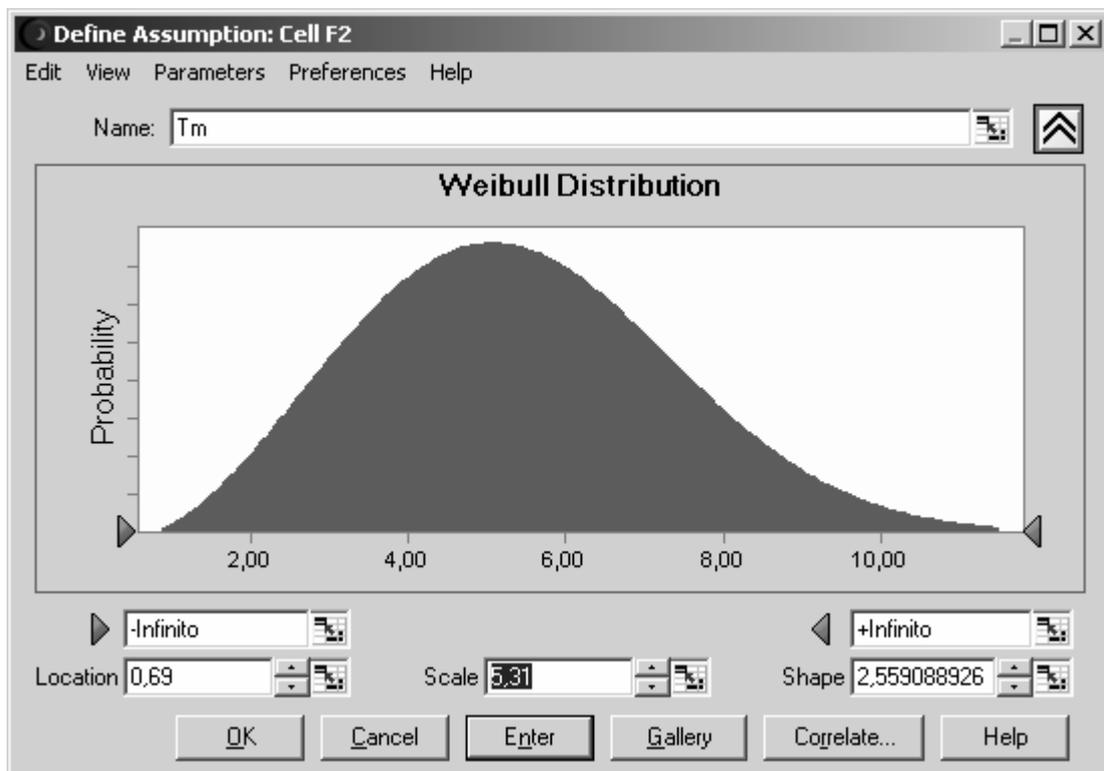


Figura 8. Condicionamento de Tm.

Com os dados de entrada devidamente condicionados foi realizada a simulação de Monte Carlo pelo software *Crystal Ball*.

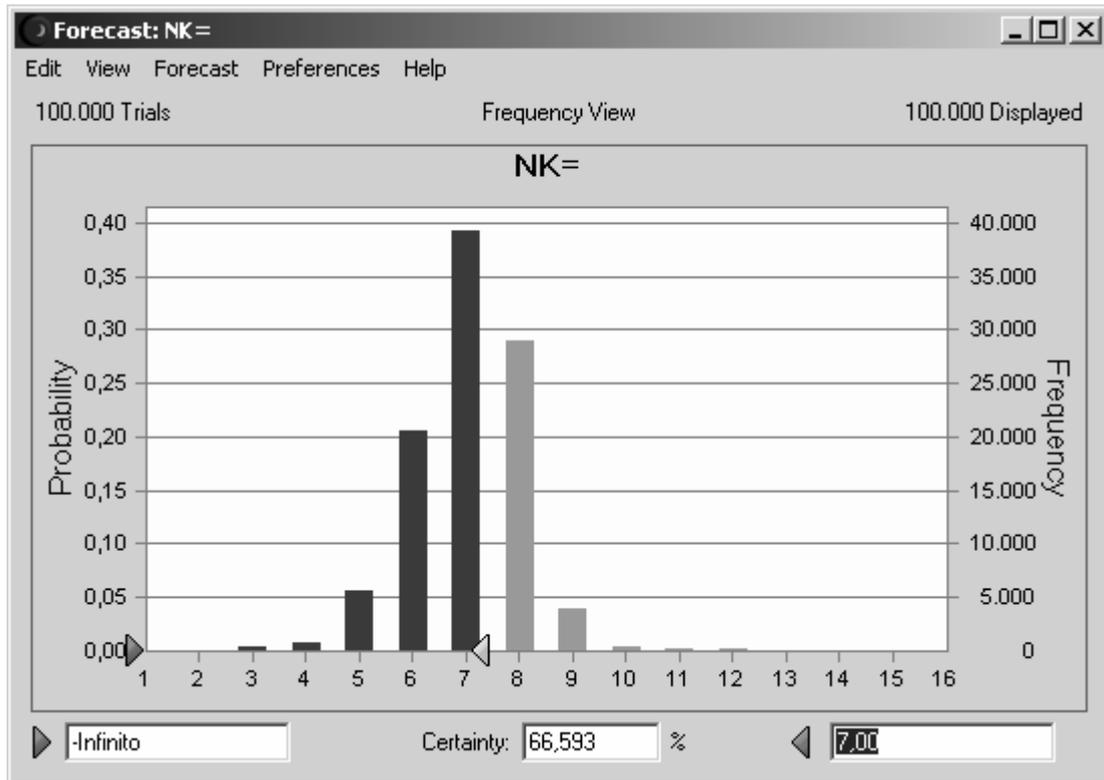


Figura 9. Resultado da simulação e número de *Kanbans* (7).

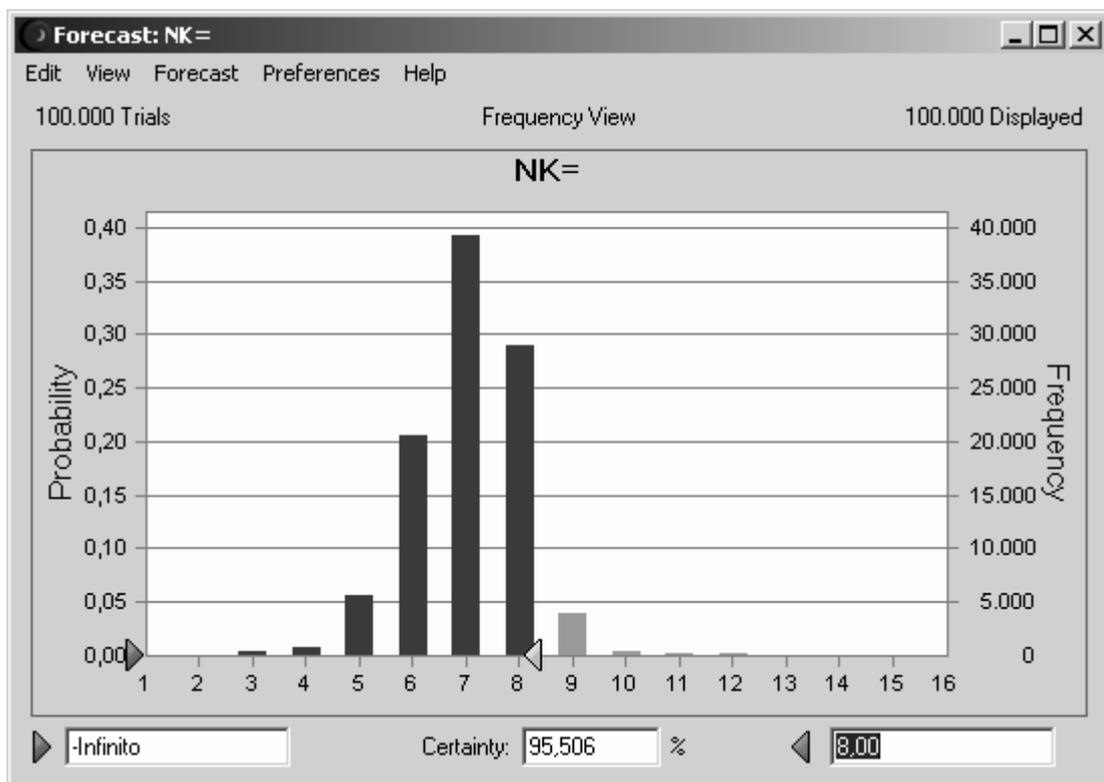


Figura 10. Resultado da simulação e número de *Kanbans* (8).

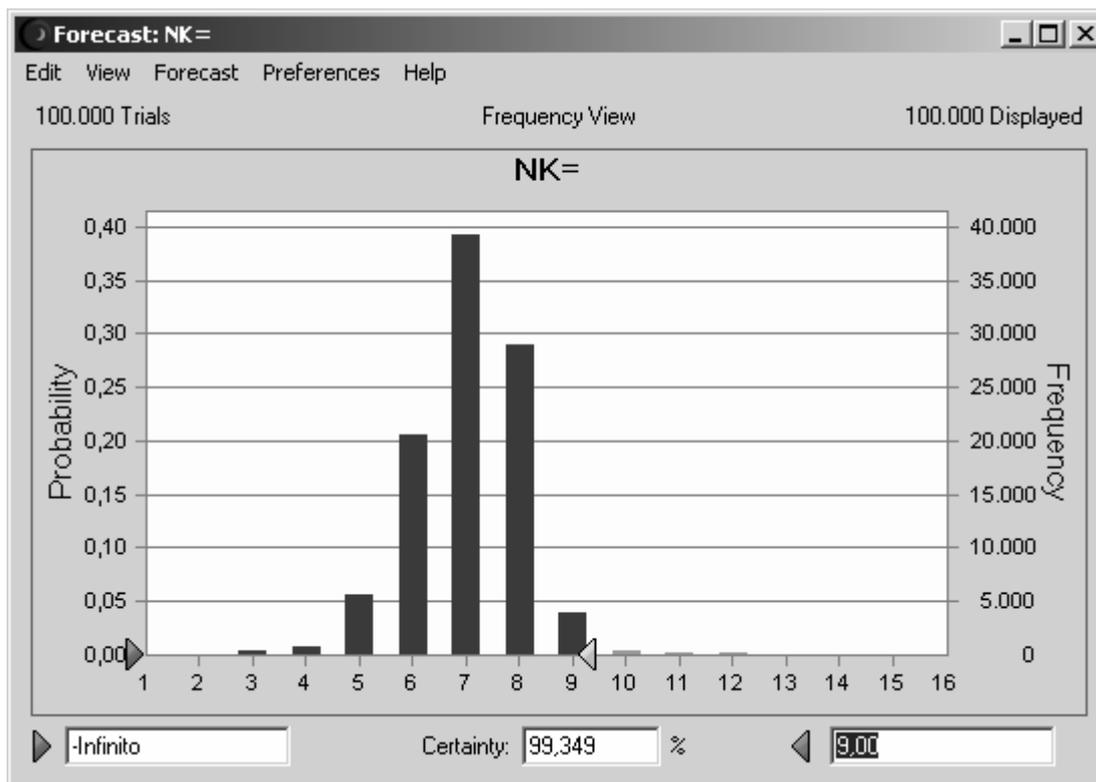


Figura 11. Resultado da simulação e número de *Kanbans* (9).

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base na Figura 9, pode-se afirmar que o *kanban* dimensionado com 7 cartões, conforme o método determinístico, atende apenas a 66,58% dos casos quando as incertezas são consideradas. O *kanban* dimensionado com 8 cartões atende a 95,51% dos casos, o que satisfaz o nível de serviço requerido. Já o *kanban* com 9 cartões atende a 99,35% dos casos, o que pode ser considerado um superdimensionamento frente ao nível de serviço solicitado.

A situação ótima, portanto, considerando a minimização do inventário e nível de serviço requerido, é o dimensionamento com 8 cartões.

7. CONCLUSÕES

Geralmente, quando as incertezas são inseridas nos modelos, fica exposta a grande fragilidade de certos métodos determinísticos.

Com relação ao sistema *kanban*, pode-se concluir que capacidade média de fornecimento deve ser maior ou igual à capacidade média de consumo, ou seja, a célula deve estar balanceada ou ligeiramente desbalanceada de forma que o abastecimento seja maior que o consumo. Caso tal condição não seja atendida, o *kanban* certamente irá falhar e o tempo entre falhas dependerá das dispersões envolvidas no processo, do abastecimento inicial, e da diferença entre o ritmo de abastecimento e de consumo.

Se as capacidades médias de abastecimento e consumo forem iguais, deve-se iniciar o processo com o *kanban* plenamente abastecido para executar a função de amortecimento das dispersões do processo.

A simulação de Monte Carlo se apresenta como um método poderoso na análise de incertezas, porém apresenta como limitação, a necessidade de um modelo matemático pré-definido para determinação das regras de associação e operação das variáveis aleatórias discretizadas.

6. REFERÊNCIAS

BRYMAN, A.; *Research Methods and Organization Studies*, John Wiley & Sons Ltd 1995.

EVANS, J. R., OLSON, D. L. *Introduction to simulation and risk analysis*. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

LAW, A.M., KELTON, W.D.; *Simulation Modeling and Analysis*. 3a. ed. New York: McGraw-Hill: 2000.

OHNO, Taiichi. *O Sistema Toyota de Produção: Além da produção em larga escala*. Porto Alegre: Bookman, 1997.

SCHONBERGER, R. J.; *Kanban at the Nexus - Production and Inventory Management Journal*; Third Quarter 2002; 43, 3/4; ABI/INFORM Global pg. 1.

TAYLOR, David H.; *Demand Management in Agri-food Supply Chains - The International Journal of Logistics Management*, Vol. 17 No. 2, 2006.

VOSE, D.; *Risk Analysis: A Quantitative Guide*. 2. ed. Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2000.