2
Modelo para o Sistema de Controle de Estoque (*Q*, *R*)

Neste capítulo é apresentado um modelo para o sistema de controle de estoque (Q,R). Considera-se que a revisão dos estoques é continua e uma encomenda de tamanho Q é efetuada quando o nível de estoque atinge o ponto de pedido R. Quando a encomenda chega, eventuais faltas de estoque que tenham ocorrido são todas atendidas. Os custos considerados relevantes são os que variam com os valores de Q e R. São eles os custos de encomendar, manter e falta. O critério de otimização é o da minimização do valor esperado do custo total por unidade de tempo (geralmente por ano).

O modelo apresentado neste capítulo considera a demanda como sendo uma variável aleatória continua com distribuição normal e pode ser encontrado em Hadley e Whitin (1963, cap 4), Zheng (1992) e Zipkin (2000, cap 6). Entretanto, o procedimento aqui descrito pode ser aplicado a outras distribuições contínuas.

O tempo decorrido entre a encomenda e a chegada da mesma (tempo de reposição) é considerado fixo, embora certos tipos de tempos de reposições estocásticos possam ser tratados da mesma forma. Para tanto é necessário, entre outras considerações, que as encomendas cheguem na mesma ordem em que foram solicitadas e que o tempo de reposição seja independente do processo de demanda. Ver Zipkin (2000, cap 7) e Hadley & Whitin (1963, cap 4) para maiores detalhes.

Inicialmente, é feita uma breve descrição dos quatro tipos de sistemas de controle, citados por Silver, Pyke e Peterson (1998). A seguir, são apresentadas as propriedades das variáveis aleatórias continuas, especialmente aquelas da distribuição normal. Em seguida, é formulado o modelo com a descrição de um algoritmo de solução. Finalmente será apresentada uma aproximação do modelo e o resultado de um experimento, descrito em Barbetta (2008), realizado para avaliar em que situações esta aproximação é aceitável.

2.1
Tipos de Sistemas de Controle de Estoque

Sistema (*Q, R*) – é do tipo revisão contínua e lotes fixos. Quando o nível de estoque atingir ou chegar abaixo do ponto de pedido *R*, é encomendada uma quantidade fixa *Q*.

Sistema (*R, S*) – é do tipo revisão contínua e lotes variáveis. Quando o nível de estoque atinge o ponto de pedido *R*, é encomendada uma quantidade variável elevando a posição de estoque ao nível máximo *S*.

Sistema (*T, S*) – é do tipo revisão periódica e lotes variáveis. A cada período de duração *T* é encomendada uma quantidade suficiente para elevar a posição de estoque ao nível máximo *S*.

Sistema (*T, R, S*) - é do tipo revisão periódica e lotes variáveis. A cada período fixo de duração *T*, verifica-se a posição de estoque. Se estiver abaixo do ponto de pedido *R*, é encomendada uma quantidade suficiente para que a posição de estoque atinja o nível máximo *S.* Caso contrário, não se encomenda.

2.2
Propriedades Gerais das Variáveis Aleatórias Continuas

Seja S um intervalo dos números reais. As probabilidades podem ser descritas em termos da Função Cumulativa de Distribuição, definida por:

$$F(x) = \Pr(X \leq x) \qquad x \in S$$

onde X é uma variável aleatória que representa a soma das demandas durante o tempo de reposição, que é o intervalo (t, t+L), e x é a posição de estoque no instante t.

A Função Cumulativa Complementar de Distribuição é definida por:

$$F^0(x) = \Pr(X \geq x) = 1 - F(x) \qquad x \in S$$

Se $F(x)$ é diferenciável tem-se a Função Densidade de Probabilidade $f(x)$ tal que:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)dx$$

O Valor Esperado de X é:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = \int_{0}^{\infty} F^{0}(x)dx - \int_{-\infty}^{0} F(x)dx \quad (2.1)$$

Caso a variável represente uma demanda, será sempre positiva e o último termo da expressão (2.1) será nulo. Portanto, para o presente estudo tem-se que:

$$E(X) = \int_{0}^{\infty} xf(x)dx = \int_{0}^{\infty} F^{0}(x)dx$$

O valor esperado de uma função qualquer $h(X)$ é:

$$E[h(X)] = \int_{0}^{\infty} h(x)f(x)dx$$

Zipkin (2000, pg 456) define a Função de Perda como sendo:

$$F^{1}(x) = E\left[(X-x)^{+}\right] = \int_{x}^{\infty} (y-x)f(y)dy = \int_{x}^{\infty} F^{0}(y)dy \quad (2.2)$$

Onde: $a^{+} = \max\{0,\ a\}$ e y é o valor da demanda.

Zipkin (2000, pg 456) define a Função de Perda de Segunda ordem como sendo:

$$F^{2}(x) = \int_{x}^{\infty} E\left[(X-y)^{+}\right]dy = \int_{x}^{\infty} F^{1}(y)dy\,. \quad (2.3)$$

Portanto:

$$\frac{dF^{2}(x)}{dx} = -F^{1}(x) \quad e \quad \frac{dF^{1}(x)}{dx} = -F^{0}(x)$$

2.2.1
Propriedades Gerais da Distribuição Normal

Para a distribuição normal padronizada tem-se que:

- Função Densidade de Probabilidade: $\phi(z) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)\exp\left(-\frac{1}{2}z^{2}\right)$
- Função Cumulativa de Distribuição: $\Phi(z) = \int_{-\infty}^{x} \phi(x)dx$

- Função Cumulativa Complementar de Distribuição: $\Phi^0(z) = \int_z^{\infty x} \phi(x)dx$

- Função de Perda: $\Phi^1(z) = \int_z^{\infty} (y - z)\phi(x)dx = \int_z^{\infty} \Phi^0(x)dx$

- Função de Perda de Segunda Ordem: $\Phi^2(z) = \int_z^{\infty} (y - z)\Phi^0(x)dx = \int_z^{\infty} \Phi^1(x)dx$

Para uma distribuição normal de média μ e desvio padrão σ tem-se $X = \mu + \sigma Z$. Assim, conversivamente, $z = (x - \mu)/\sigma$ é um valor padronizado de x.

Portanto:

$$\frac{d\Phi^2(x)}{dx} = -\Phi^1(x) \quad e \quad \frac{d\Phi^1(x)}{dx} = -\Phi^0(x)$$

Propriedades de simetria dessas funções:

$$\begin{aligned}
&\phi(-z) = 1 - \phi(z) \\
&\Phi^0(-z) = 1 - \Phi^0(z) = \Phi(z) \\
&\phi'(z) = -z\phi(z)
\end{aligned}$$

Com essas relações, as funções de perda podem ser dadas em termos de $\phi(z)$ e $\Phi^0(z)$:

$$\begin{aligned}
&\Phi^1(z) = -z\Phi^0(z) + \phi(z) \\
&\Phi^2(z) = \frac{1}{2}\left[\left(z^2 + 1\right)\Phi^0(z) - z\phi(z)\right]
\end{aligned} \tag{2.4}$$

As funções $\Phi(z) = 1 - \Phi^0(z)$ e $\phi(z)$ podem ser obtidas na planilha Excel por meio da função DIST.NORM.

Pode-se mostrar que (Zipkin, 2000, pg 459):

$$\begin{aligned}
&f(x) = \left(\frac{1}{\sigma}\right)\phi(z) \\
&F^0(x) = \Phi^0(z) \\
&F^1(x) = \sigma\Phi^1(z) \\
&F^2(x) = \sigma^2\Phi^2(z)
\end{aligned} \tag{2.5}$$

2.3
O Modelo para o Sistema (*Q*, *R*)

Notação:

Q = lote de reposição

R = ponto de reposição

D = valor esperado da demanda por ano

X = variável aleatória que representa a demanda durante o tempo de reposição

$\mu = E[X]$ = valor esperado da demanda durante o tempo de reposição

σ = desvio-padrão da demanda durante o tempo de reposição

L = tempo de reposição fixo

A = custo fixo de cada encomenda ($/encomenda)

h = taxa de manter por unidade por unidade de tempo ($/unid/ano)

p = taxa de falta por unidade em falta por unidade de tempo ($/unid/ano).

Hadley & Whitin (1963) e Zipkin (2000) classificam os custos relevantes em três termos: custo de encomendar, custo de manter e custo de falta. Zheng (1992) combina os dois últimos termos em um só, o que é adotado no desenvolvimento a seguir.

Custo de Encomendar:

Sendo Q a quantidade encomendada em cada reposição de estoque e D a demanda anual, o número médio de encomendas por ano é D/Q. Para um custo fixo A por cada encomenda tem-se que o custo médio anual de encomendar é: AD/Q

Custos de Manter e Falta

Seja $G(y)$ a taxa pela qual o valor médio dos custos de manter e falta são acumulados no instante t quando a posição de estoque é y. X é uma variável aleatória que representa a soma das demandas durante o tempo de reposição, que é o intervalo $(t,\ t+L)$. Para uma taxa de manter h e uma taxa de falta p, tem-se que:

$$G(y) = hE[y - X]^{+} + pE[X - y]^{+} \tag{2.6}$$

A posição de estoque y varia no intervalo $(R,\ R+Q)$. Portanto, a função para os custos médios anuais de estoque (manter e falta) é:

$$\frac{1}{Q}\int_{R}^{R+Q} G(y)dy .$$

O custo anual total será então a soma dos custos de encomendar e estoque:

$$K(Q,\ R) = \frac{AD + \int_{R}^{R+Q} G(y)dy}{Q} \tag{2.7}$$

De acordo com Hadley & Whitin (1963, cap 4) e Zipkin (2000, cap 6), a expressão (2.7) é uma aproximação com distribuição continua para o caso em que a demanda segue a distribuição de Poisson, quando a equação exata do custo médio é:

$$K(Q,\ R) = \frac{DA + \sum_{k=R+1}^{R+Q} G(k)}{Q} \tag{2.8}$$

Segundo Zipkin (2000, cap 6), a expressão (2.7) é exata quando a posição de estoque é uniformemente distribuída em $(R,\ R+Q)$. Browne & Zipkin (1991) consideram outras situações para o comportamento da demanda e concluem que nestas situações a Política $(Q,\ R)$ não é ótima, mas ainda pode ser considerada em muitas aplicações.

Substituindo-se a expressão (2.6) na expressão (2.7), tem-se:

$$K(Q,\ R) = \frac{DA + h\int_{R}^{R+Q} E(y - X)^{+}\, dy + p\int_{R}^{R+Q} E(X - y)^{+}\, dy}{Q}$$

Sejam $I(Q,\ R)$ o estoque médio e $B(Q,\ R)$ a média de faltas por ano, modelados por:

$$I(Q,\ R) = \frac{\int_R^{R+Q} E(y-X)^+\,dy}{Q}$$
$$B(Q,\ R) = \frac{\int_R^{R+Q} E(X-y)^+\,dy}{Q} \qquad (2.9)$$

Desde que $(y - X) = y - X + (X - y)^+$, segue:

$$I(Q,\ R) = \frac{1}{Q}\left[\int_R^{R+Q} E(y-X)dy + \int_R^{R+Q} E(X-y)^+\,dy\right]$$

$$I(Q,\ R) = \frac{1}{Q}\int_R^{R+Q}(y-\mu)dy + B(Q,\ R)$$

$$I(Q,\ R) = R + \frac{Q}{2} - \mu + B(Q,\ R)$$

A expressão do custo anual total fica então:

$$K(Q,\ R) = \frac{DA}{Q} + h\left[R + \frac{Q}{2} - \mu + B(Q,R)\right] + pB(Q,\ R)$$

$$K(Q,\ R) = \frac{DA}{Q} + h\left[R + \frac{Q}{2} - \mu\right] + (h+p)B(Q,\ R) \qquad (2.10)$$

Zipkin (1986) demonstrou que $B(Q,\ R)$ é convexa em R e Q e continuamente diferenciável. Os outros termos certamente o são. Portanto, $K(Q,\ R)$ é convexa e continuamente diferenciável e qualquer programa de otimização não linear pode ser usado para minimizar $K(Q,\ R)$.

Esta formulação do modelo é válida mesmo para $R < 0$. Entretanto, se $R < -Q$, o estoque médio $I(Q,\ R)$ reduz-se a zero. As faltas em estoque aumentam com o decréscimo de *R*, fazendo com que o custo total aumente, uma vez que não é mais possível reduzir o estoque médio. Portanto, pode-se considerar sempre $R > -Q$.

Embora esta formulação do modelo seja válida para qualquer valor positivo de *Q*, Zipkin (1986) afirma que o valor ótimo Q^* é maior do que o valor do lote econômico $EOQ = \sqrt{2AD/h}$ no modelo determinístico. Portanto, para a otimização, um valor inicial para *Q* é *EOQ*.

Foi visto na expressão (2.9) que a média de faltas por ano é dado por:

$$B(Q,\ R) = \frac{\int_R^{R+Q} E(X-y)^+ dy}{Q}$$

O numerador desta expressão é a função de perda de segunda ordem, $F^2(X)$, da variável aleatória X. Portanto, tem-se que:

$$B(Q,\ R) = \left(\frac{1}{Q}\right)\left[F^2(R) - F^2(R+Q)\right].$$

Substituindo $B(Q,\ R)$ na expressão (2.10), tem-se a expressão do custo total anual:

$$K(Q,\ R) = \frac{DA}{Q} + h\left[R + \frac{Q}{2} - \mu\right] + \frac{(h+p)}{Q}\left[F^2(R) - F^2(R+Q)\right]. \qquad (2.11)$$

2.3.1
O Modelo para a Distribuição Normal

Para itens com alta demanda durante o tempo de reposição é conveniente representar esta demanda por uma variável continua. Por várias razões, o mais comum é usar a distribuição normal. Primeiramente sabe-se que, pelo Teorema do Limite Central, a soma de muitas variáveis aleatórias independentes tem distribuição aproximadamente normal. A aproximação é tanto melhor quanto maior for a demanda durante o tempo de reposição. Em muitas situações a demanda origina-se de vários usuários independentes e é razoável que a demanda seja representada por uma distribuição normal. Ademais, a demanda por unidade de tempo (p.ex. por semana) é a soma da demanda por unidade de tempo menores (p.ex. por dia). Portanto, para um tempo de reposição considerado suficientemente longo, a distribuição normal pode ser uma escolha adequada. Cabe lembrar que a distribuição discreta de um processo Poisson torna-se aproximadamente normal quando a média é suficientemente elevada (ou quando o tempo de reposição é longo). Neste caso, a expressão (2.7) é uma aproximação adequada para a expressão (2.8).

Muitos usuários sentem-se desconfortáveis, porque a normal pode assumir valores negativos. (Isto não é problema quando usuários podem devolver itens. Entretanto, embora não seja uma situação incomum, não é regra geral.) Convém lembrar que, usa-se aproximações, não são usadas para descrever a dinâmica do processo de geração da demanda, mas para predizer a performance das políticas de estoque. A aproximação normal só deve ser considerada adequada quando a probabilidade de ocorrer um valor negativo da demanda é pequena $\Pr[X > 0] = \Phi^0(-\mu/\sigma)$, o que ocorre quando o coeficiente de variação σ/μ é pequeno. Para um coeficiente de variação ser igual a 1/3, a probabilidade de uma demanda negativa é 0,00135. Uma regra plausível é só considerar o uso da aproximação normal quando o coeficiente de variação for inferior a 1/3.

Zipkin (2000, pg 207) recomenda cautela com as predições de performance feitas com a aproximação normal nos extremos das caudas, já que não são precisas. Por exemplo: suponha que a probabilidade de falta, $F^0(R) = \Phi^0(R - \mu/\sigma)$, seja 0,001. Sabemos que o valor de *R* deve ser grande, mas quão grande deve ser? Ele afirma que a aproximação não dá a resposta precisa porque o quociente $F^0(R)/\Phi^0(R - \mu/\sigma)$ não tende para 1 quando *R* tende para ∞.

Para a distribuição normal foi visto que $F^2(X) = \sigma^2\Phi^2(Z)$, onde $Z = (X - \mu)/\sigma$. Neste caso a expressão do custo total anual passa a ser:

$$K(Q,\ R) = \frac{DA}{Q} + h\left[R + \frac{Q}{2} - \mu\right] + \frac{\sigma^2(h+p)}{Q}\left[\Phi^2\left(\frac{R-\mu}{\sigma}\right) - \Phi^2\left(\frac{R+Q-\mu}{\sigma}\right)\right] \qquad (2.12)$$

Cabe lembrar que, pela expressão (2.4),

$$\Phi^2(z) = \frac{1}{2}\left[\left(z^2+1\right)\Phi^0(z) - z\phi(z)\right]$$

As funções $\Phi(z) = 1 - \Phi^0(z)$ e $\phi(z)$ podem ser obtidas na planilha Excel através da função DIST.NORM.

Exemplo 2.1

D	h	A	μ	σ	p
200	3,00	2,00	30	10	300,00

Resolvendo com auxilio do Solver da planilha Excel, obtém-se R = 46,57 e Q=20,45, com um custo total de $K(Q,\ R)$ = 111,15.

Formulação simplificada do modelo

Observe que o custo anual na expressão (2.12) é função dos parâmetros *D, A*, *h*, *p*, *μ* e *σ*. Essa formulação pode ser simplificada, sugerida por Platt, Robinson e Freund (1997), através de uma transformação que envolve as variáveis (Q e R) e os parâmetros. Para melhor apresentar esta formulação simplificada, repete-se a expressão (2.12).

$$K(Q,\ R) = \frac{DA}{Q} + h\left[R + \frac{Q}{2} - \mu\right] + \frac{\sigma^2(h+p)}{Q}\left[\Phi^2\left(\frac{R-\mu}{\sigma}\right) - \Phi^2\left(\frac{R+Q-\mu}{\sigma}\right)\right] \qquad (2.12)$$

Dividindo-se $K(Q,R)$ por $h\sigma$, tem-se:

$$\frac{K(Q,\ R)}{h\sigma} = \frac{DA}{h\sigma Q} + \frac{h}{h\sigma}\left[R + \frac{Q}{2} - \mu\right] + \frac{\sigma^2(h+p)}{h\sigma Q}\left[\Phi^2\left(\frac{R-\mu}{\sigma}\right) - \Phi^2\left(\frac{R+Q-\mu}{\sigma}\right)\right]$$

Defina: $q = \dfrac{Q}{\sigma}$, $\qquad e = \dfrac{EOQ}{\sigma} = \dfrac{1}{\sigma}\sqrt{\dfrac{2AD}{h}} \qquad r = \dfrac{R-\mu}{\sigma} \qquad g = \dfrac{p}{h}$

Então:

$$\frac{K(Q,\ R)}{h\sigma} = k(q,r) = \frac{e^2}{2q} + \frac{q}{2} + r + \frac{(1+g)}{q}\left[\Phi^2(r) - \Phi^2(r+q)\right] \qquad (2.13)$$

Como foi visto na Seção 2.3, para a otimização da expressão (2.10) bastava considerar valores de $R > -Q$. Na otimização da expressão (2.13), a consideração equivalente é:

$$\frac{R-\mu}{\sigma} > \frac{-Q-\mu}{\sigma} \quad \text{ou} \quad r > -q - \frac{\mu}{\sigma}$$

Na Seção 2.3.1 foi considerado adequado o uso da aproximação normal quando o coeficiente de variação $\sigma/\mu < 1/3$, ou seja, quando $\mu/\sigma > 3$. Então, na otimização da expressão (2.13), só é necessário considerar valores de $r > -q - 3$.

Na Seção 2.3 foi dito que, embora a formulação do modelo seja válida para qualquer valor positivo de *Q*, sabe-se que o valor ótimo $Q^* > EOQ = \sqrt{2AD/h}$. Então, era recomendado na otimização da expressão (2.10) um valor inicial de *Q=EOQ*. Da mesma forma recomenda-se, na otimização da expressão (2.13), um valor inicial de $q = e$.

Observe-se que na expressão (2.13), a transformação de variáveis e parâmetros permitiu a formulação do custo médio anual apenas em função dos parâmetros *e* e *g*. Esta formulação será melhor apreciada na Seção 2.3.2 e no Capítulo 3, pois permitirá uma melhor avaliação do desempenho das aproximações lá sugeridas. Derivando $k(q,\ r)$ em relação a *r* e *q* e igualando a zero, tem-se:

$$\frac{\partial k(q,r)}{\partial r} = 1 - \frac{(1+g)}{q}\frac{\partial}{\partial r}\left[\Phi^2(r) - \Phi^2(r+q)\right] = 0$$

$$\frac{\partial k(q,r)}{\partial q} = -\frac{e^2}{2q^2} + \frac{1}{2} - \frac{(1+g)}{q^2}\left[\Phi^2(r) - \Phi^2(r+q)\right] + \frac{(1+g)}{q}\frac{\partial}{\partial q}\left[\Phi^2(r) - \Phi^2(r+q)\right] = 0$$

Na Seção 2.2.1 foi visto que: $\dfrac{d\Phi^2(x)}{dx} = -\Phi^1(x)$

E chega-se às seguintes expressões:

$$q - (1+g)\left[\Phi^1(r) - \Phi^1(r+q)\right] = 0 \qquad (2.14)$$

$$q^2 - e^2 - 2(1+g)\left\{\left[\Phi^2(r) - \Phi^2(r+q)\right] - \frac{1}{q}\left[\Phi^1(r+q)\right]\right\} = 0 \qquad (2.15)$$

Rosling (2002) apresenta o Algoritmo da Raiz Quadrada e demonstra a sua convergência para a solução ótima. No seu procedimento, a expressão (2.15) passa a ser:

$$q_{i+1} = \sqrt{e^2 + 2(1+g)\left\{\left[\Phi^2(r) - \Phi^2(r+q_i)\right] - \frac{1}{q_i}\left[\Phi^1(r+q_i)\right]\right\}} \qquad (2.16)$$

onde o valor de q_{i+1} na iteração i +1 é calculado sabendo-se o valor de q_i na iteração i.

Algoritmo para calcular a Política (*Q*, *R*) ótima

Passo 1: Faça i =1 e $q_i = e$.

Passo 2: Ache o valor de r_i que resolve a equação

$q_i - (1+g)\left[\Phi^1(r_i) - \Phi^1(r_i + q_i)\right] = 0$

Passo 3: Calcule $q_{i+1} = \sqrt{e^2 + 2(1+g)\left\{\left[\Phi^2(r_i) - \Phi^2(r_i+q_i)\right] - \frac{1}{q_i}\left[\Phi^1(r_i+q_i)\right]\right\}}$

Passo 4: Se $|q_{i+1} - q_i| = 0$, vá ao Passo 5, caso contrario vá ao Passo 2.

Passo 5: Faça $(q^*,\ r^*) = (q_i,\ r_i)$.

Pode-se mostrar que, em cada passo, $q_{i+1} > q_i$ e $r_{i+1} \le r_i$.

2.3.2
Uma Aproximação para o Modelo

Barbetta (2008) sugeriu uma aproximação para o modelo ao eliminar, na expressão (2.1), o termo $F^2(R+Q)$. Geralmente, em situações reais, a $\Pr[(X > R+Q)]$ é muito pequena e $F^2(R+Q)$ também é muito pequeno, podendo ser desconsiderado. Quando $X > R+Q$, há falta em estoque mesmo após a encomenda chegar. Na prática, geralmente não é uma situação aceitável que haja uma probabilidade significativa de que a encomenda não seja suficiente para suprir as faltas. Isto é plausível que aconteça quando o custo de falta é muito pequeno em relação ao custo de manter estoque. Evidentemente, eliminar o termo $F^2(R+Q)$ na expressão (2.1) equivale a eliminar o termo $\Phi^2[r+q]$ na expressão (2.13) e a formulação aproximada do modelo passa a ser:

$$k_1(q_1,\ r_1) = \frac{e^2}{2q_1} + \frac{q_1}{2} + r_1 + \frac{(1+g)}{q_1}\left[\Phi^2(r_1)\right] \qquad (2.17)$$

Nas expressões (2.13) e (2.17), a transformação de variáveis e parâmetros permitiu formulação do custo médio anual apenas em termos de *e* e *g*. Podemos então realizar um experimento para observar em que situações (caracterizadas por *e* e *g*) a aproximação da expressão (2.13) pela expressão (2.11) é aceitável. Sejam q^* e r^* os valores ótimos obtidos com a expressão (2.13) e q_1^* e r_1^* os valores ótimos obtidos com a expressão (2.17). Para medir a qualidade da aproximação, considera-se a Diferença Relativa Percentual (*DRP*) entre o custo da solução obtida com o modelo aproximado $k(q_1^*, r_1^*)$ e o custo da solução obtida com o modelo exato $k(q^*, r^*)$.

$$DRP = \frac{k(q_1^*, r_1^*) - k(q^*, r^*)}{k(q_1^*, r_1^*)} \times 100$$

Barbetta (2008) realizou este experimento e o resultado é apresentado na Tabela 2.1 e no gráfico da Figura 2.1.

Tabela 2.1 – Resultados do Experimento – Valores da *DRP*

e	*g* = 0,5	*g* = 1	*g* = 5	*g* = 10	*g* = 50	*g* = 100
0,01	16,8758	10,8497	4,6698	3,5525	2,2028	1,8805
0,1	14,3306	8,2822	3,6231	2,5948	1,5069	1,2504
0,5	4,9142	2,7449	0,7342	0,4466	0,1695	0,1192
1	1,0936	0,5095	0,0788	**0,0375**	**0,0084**	**0,0048**
2	**0,0493**	**0,0136**	**0,0005**	**0,0001**	**0,0000**	**0,0000**
3	**0,0018**	**0,0002**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**
5	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**
10	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**
100	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**

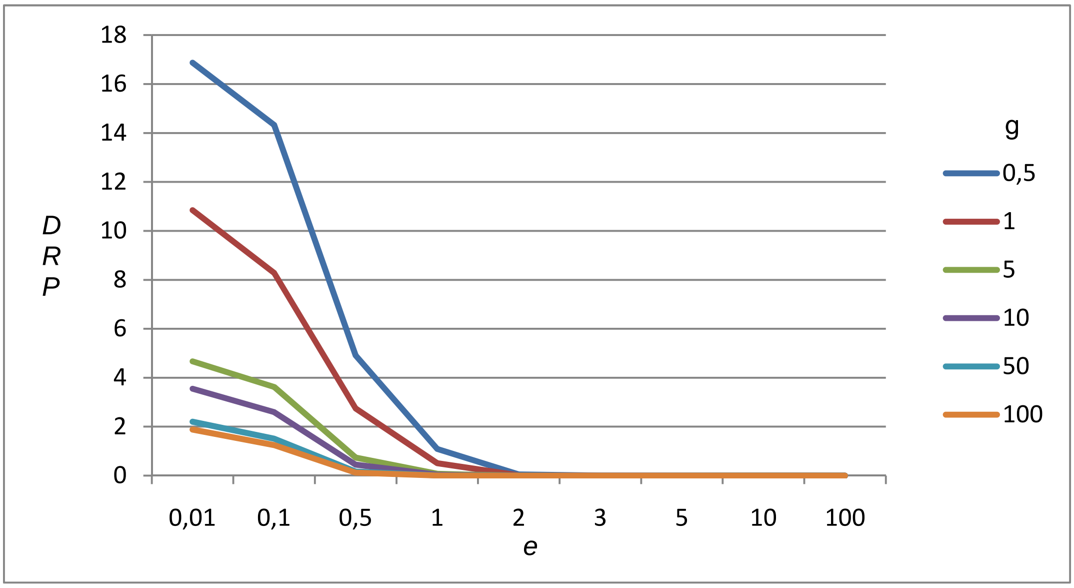

Figura 2.1 – Gráfico do Experimento

Observe-se que os valores de $e = \sqrt{2Ad/h\sigma^2}$ e $g = p/h$ podem ser obtidos em situações práticas, e a Tabela 2.1 pode ser usada para estimar a *DRP* através da interpolação.

Os valores da *DRP* menores do que 0,05% aparecem em negrito na Tabela 2.1.

De uma maneira geral, a aproximação não é aceitável para pequenos valores de *e* e *g*.

Cabe registrar que em situações reais, geralmente $g = p/h > 1$.

No Capítulo 3, é apresentado um experimento similar para avaliar as situações em que é aceitável uma aproximação no modelo para a Política (*Q*, *R*) que considera a fração da demanda satisfeita prontamente (*fill rate*) em vez do custo de falta.