



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE SOBRESSALENTES
APLICADO AO EQUIPAMENTO PÁRA-RAIO SÉRIE DE
REGULADOR DE TENSÃO NA CELPE

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO

POR

PATRICIA PERON DE MORAES

Orientador: Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante

RECIFE, AGOSTO/2005

M827m Moraes, Patricia Peron de

Modelo de dimensionamento de sobressalentes aplicado ao equipamento pára-raio série de regulador de tensão na CELPE / Patricia Perón de Moraes. – Recife: O Autor, 2005.

v, 30 f., il., gráfs., tabs.

Monografia (TCC) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Depto. de Engenharia de Produção, 2005.

Inclui referências bibliográficas e anexos.

1. Engenharia de Produção. 2. Pára-raio. 3. Regulador de tensão. 3. Conhecimento à priori. I. Título.

658.5 CDD (22.ed.)

BCTG/2006-122

RESUMO

Na Gestão da Manutenção, uma das etapas mais críticas e importantes do planejamento dos recursos da manutenção é, sem dúvidas, o dimensionamento do estoque de peças de reposição, devido ao impacto deste nos custos e na lucratividade da empresa. Este impacto se deve ao fato de que, caso haja um superdimensionamento do estoque, este se reverterá em custos de estocagem. Do contrário, um subdimensionamento, acarretará um prolongamento no tempo de indisponibilidade do equipamento, o que faz com que a empresa tenha perdas de produção. O dimensionamento deve, então, garantir que as peças necessárias estarão disponíveis na quantidade e hora certas.

Este trabalho aborda um modelo de dimensionamento de sobressalentes baseado no risco máximo de quebra de estoque. Considera-se que existe incerteza quanto à taxa de falha do equipamento e, neste sentido, utiliza-se a função de distribuição Gama para modelar a variabilidade desta taxa de falha. O modelo apresentado é aplicado a um equipamento do sistema elétrico da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE).

Devido à ausência de dados sobre os parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade do equipamento, decorrente do recente processo de privatização da empresa e de sua perda de “memória” técnica, devido ao fato da rápida redução do seu quadro de funcionários, foi necessário utilizar o recurso conhecimento *a priori* de especialistas, o qual se mostrou bastante adequado ao atual cenário da CELPE.

O objetivo deste estudo é fornecer uma ferramenta que permita reduzir os custos com estoque, auxiliar a gerência na tomada de decisão com base em dados e/ou estimativas disponíveis, bem como estabelecer uma margem de segurança compatível com os requisitos de funcionamento do sistema em análise.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 2 – O PROBLEMA

2.1 – Introdução

2.2 – Conceitos

2.2.1 – Confiabilidade

2.2.1.1 – Conceitos Básicos

2.2.1.2 – Formulação Probabilística da Confiabilidade

2.2.1.3 – Curva da Banheira

2.2.2 – Manutenção

2.2.2.1 – Tipos de Manutenção

2.2.2.2 – Engenharia da Manutenção

2.2.3 – Análise Bayesiana

2.2.3.1 – Conhecimento *a priori* e Processos de Elicitação

2.3 – Modelo de Dimensionamento de Sobressalentes

2.3.1 – Abordagem Baseada no Risco de Quebra de Estoque com Uso de Conhecimento a Priori

CAPÍTULO 3 – ABORDAGEM DO PROBLEMA

3.1 – Estrutura de Manutenção da CELPE

3.1.1 – Sistema a ser Mantido

3.1.2 – Conceitos

3.1.3 – Metodologia

3.2 – Descrição do Equipamento

3.3 – Obtenção de Conhecimento a Priori

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

4.1 – Resultado do Dimensionamento de Sobressalentes

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva da Banheira

Figura 2.2 – Falhas que geram a Curva da Banheira

Figura 4.1 – Gráfico da função densidade de probabilidade

Figura 4.2 – Gráfico da função de distribuição de probabilidade

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1 – Sistema a ser mantido

1 INTRODUÇÃO

Na área de Gestão da Manutenção, o dimensionamento de peças de reposição para máquinas e equipamentos de um sistema produtivo se apresenta como uma questão crítica e de grande importância, pois tem impacto direto sobre o tempo de interrupção do sistema, conseqüentemente nos custos e lucratividade da empresa. Assim como o excesso de peças acarreta prejuízo para a empresa, a falta de peças é também negativa, pois resulta em perdas de produção devido ao aumento do tempo de parada dos equipamentos.

Em situações práticas, existem alguns aspectos que dificultam a obtenção dos parâmetros necessários ao estudo do dimensionamento de peças de reposição, assim como a ausência de dados ou a baixa confiabilidade dos mesmos. Quando isso ocorre, faz-se uso da análise Bayesiana, a qual permite a utilização de informações provenientes de fontes distintas para formular uma distribuição de probabilidade do parâmetro de interesse.

Tendo em vista a importância de se dimensionar corretamente a quantidade de sobressalentes dos equipamentos e a dificuldade apresentada pelas empresas de realizarem este estudo devido aos fatores já citados anteriormente, será apresentado, neste trabalho, um modelo de dimensionamento de sobressalentes que utiliza o conhecimento a priori do especialista para formular a distribuição de probabilidade do parâmetro desejado. Em seguida, este modelo será aplicado ao sobressalente Pára-Raios Série do Regulador de Tensão, o qual pertence ao sistema elétrico da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE). Esta empresa foi recentemente privatizada e, devido a essa privatização e à rápida redução de seu quadro de funcionários, sofreu mudanças estruturais e perda de parte de sua “memória” técnica. Com isso, seu banco de dados é precário e pouco confiável para a tomada de decisão por parte da gerência.

O presente estudo foi elaborado com o objetivo de auxiliar a gerência na tomada de decisão, aumentar o tempo de disponibilidade do equipamento acima citado, reduzir seus custos com estoque, bem como estabelecer uma margem de segurança compatível com os requisitos de funcionamento do sistema em análise.

A aplicação da modelagem apresentada neste estudo possibilita um maior conhecimento do sistema sob avaliação, mediante uma análise dos dados operacionais disponíveis, a formalização do conhecimento a priori dos especialistas e promove uma maior interação entre as áreas envolvidas com o problema.

Os capítulos que compõem o trabalho são de fundamental importância para a realização do estudo:

O Capítulo 2 refere-se à fundamentação teórica do trabalho, ou seja, aos conceitos que respaldam o modelo aplicado ao presente estudo.

O capítulo 3 explana a elaboração do plano de atividades de manutenção do ambiente onde o estudo é realizado, assim como a descrição do equipamento analisado e do modelo aplicado.

O Capítulo 4 refere-se aos resultados obtidos em cada etapa da aplicação do modelo, seguido de comentários esclarecedores do que foi exposto.

O Capítulo 5 trata-se das conclusões obtidas após o término do trabalho.

É importante ressaltar que este trabalho se limita a obter um diagnóstico das necessidades de sobressalentes para os equipamentos do sistema elétrico, não levando em consideração a abordagem dos custos associados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Introdução

Uma das questões mais importantes relacionadas à Gestão da Manutenção é, sem dúvida, o problema do dimensionamento de sobressalentes, tendo em vista as suas implicações sobre o desempenho da manutenção. O dimensionamento das peças de reposição da manutenção influencia fortemente os custos e a lucratividade da empresa, por isso, o gerenciamento deste recurso é uma das tarefas mais críticas dos departamentos de manutenção. O dimensionamento incorreto pode acarretar em grandes prejuízos. Juntamente com o gerenciamento dos recursos humanos, o planejamento das peças de reposição é essencial para garantir uma manutenção eficiente. Métodos quantitativos oriundos do contexto da Engenharia de Produção permitem um enriquecimento no processo decisório envolvendo a determinação do quantitativo de sobressalentes ou peças de reposição. Entretanto, o tratamento dado pelas empresas para este assunto nem sempre incorpora um embasamento quantitativo adequado, muito embora existam disponíveis na literatura diversas contribuições nesse sentido (Almeida, 2000).

O dimensionamento de sobressalentes é uma questão que se reveste de grande relevância, haja vista ser uma informação fundamental para a tomada de decisão no planejamento da manutenção, considerando que o número de sobressalentes afeta diretamente o tempo de parada ou interrupção em um determinado processo (Melo, 1998).

O dimensionamento deve garantir que as peças necessárias estarão disponíveis na quantidade e hora certas. Assim como o excesso de peças resulta em prejuízos para a empresa, a falta de peças é igualmente negativa, resultando em perdas de produção pelo aumento do tempo de interrupção dos equipamentos (Xenos, 1998).

Sendo assim, o gerenciamento do estoque de sobressalentes tem dois grandes objetivos que podem parecer conflitantes: contribuir para aumentar a disponibilidade dos equipamentos, através da aquisição de peças de reposição; ou seja, assegurar o fornecimento dos sobressalentes na quantidade adequada para reduzir o tempo de interrupção e reduzir os custos de compra e armazenamento do estoque de peças (Almeida, 2000)

2.2 Confiabilidade

Intuitivamente pode-se associar a confiabilidade à durabilidade de um item, considerando que este item deve cumprir uma determinada missão durante um certo intervalo

de tempo. A denominação “item” representa, de forma genérica um componente, dispositivo, equipamento, ou sistema. Entende-se que um sistema é constituído de equipamentos e estes de componentes ou dispositivos. Um sistema pode ser analisado incluindo o ser humano como parte integrante. Assim, o estudo de confiabilidade pode considerar a análise de componentes ou equipamentos isoladamente ou a associação destes levando à análise de sistemas.

Formalmente, confiabilidade – $R(t)$ – de um item é definida como a probabilidade que este item funcionará num dado intervalo de tempo t , de acordo com especificações pré-estabelecidas. Ou seja, trata-se de um conceito probabilístico.

Tomando-se T como o tempo de vida de um item, tem-se que a confiabilidade até o tempo t é a probabilidade de que $T > t$: $R(t) = \Pr(T > t)$

A suspensão do funcionamento deste item implica em falha. A definição de falha pode ser efetuada em função do objetivo ao qual o item ou sistema se destina. Isto é, diz-se que ocorre uma falha quando a missão a qual se destina o sistema/item não pode mais ser atendida (Almeida & Souza, 2001).

Segundo Almeida & Souza (2001), uma falha pode ser classificada em função de:

- Seus efeitos (sistêmico, parcial, etc.)
- Sua origem (configuração, composição material)
- Sua causa (anormalidade de fabricação, fora de condições operacionais, operação indevida)

2.2.1 Formulação Probabilística da Confiabilidade

Segundo Almeida & Souza (2001), o conceito mais formal de confiabilidade é de natureza probabilística. Dois conceitos de probabilidade aplicáveis são o de função densidade de probabilidade representada por $f(t)$ e o de função de distribuição (acumulada) representada por $F(t)$. Considerando a variável aleatória de interesse, que é o tempo de vida do item t , $F(t)$ representa a probabilidade de que o item falhará até o tempo t . Ou seja, o oposto de $R(t)$. Portanto, $R(t) + F(t) = 1$.

A função confiabilidade $R(t)$ pode ser formulada matematicamente a partir do seguinte experimento: Observa-se um lote de no itens durante um período de tempo t . ao final verificam-se quantas peças falharam. Têm-se as seguintes relações:

$$no = nf + ns \quad (2.1)$$

$$no = nf(t) + ns(t) \quad (2.2)$$

no – número de itens

nf – número de peças que falharam

ns – número de peças que sobrevivem

$nf(t)$ – número de peças que falham até o tempo t

$ns(t)$ – número de peças que sobrevivem até o tempo t

A probabilidade $R(t)$ pode ser vista pela relação:

$$R(t) = \frac{ns(t)}{no} \quad (2.3)$$

Sabe-se que $R(t) + F(t) = 1$, então

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.4)$$

$$F(t) = 1 - \frac{ns(t)}{no} \quad (2.5)$$

$$F(t) = 1 - \frac{no - nf(t)}{no} \quad (2.6)$$

$$F(t) = 1 - \left(\frac{no}{no} - \frac{nf(t)}{no} \right) \quad (2.7)$$

$$F(t) = \frac{nf(t)}{no} \quad (2.8)$$

$$R(t) = 1 - \frac{nf(t)}{no} \quad (2.9)$$

Derivando em relação a t :

$$\frac{dR(t)}{dt} = - \frac{1}{no} \frac{dnf(t)}{dt} \quad (2.10)$$

Da equação acima $\frac{dnf(t)}{dt}$ é considerada a taxa na qual o lote de peças falha. Dividindo os

termos da equação acima por ns temos:

$$- \frac{no}{ns(t)} \frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{ns(t)} \frac{dnf(t)}{dt} \quad (2.11)$$

O termo a direita na equação acima é considerado a taxa de falhas $\lambda(t)$ de um item. Tem-se então:

$$\lambda(t) = - \frac{no}{ns(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (2.12)$$

Observa-se que $\frac{no}{ns(t)} = \frac{1}{R(t)}$ e também que $\frac{dnf(t)}{dt} = - \dot{f}(t)$, tem-se então, a seguinte relação

entre taxa de falhas, confiabilidade e função densidade de probabilidade:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.13)$$

A taxa de falha indica, para valores suficientemente grandes de ocorrências, a probabilidade de ocorrência de falhas por unidade de tempo, no intervalo de tempo em questão, considerando que o equipamento ainda esteja operando na data de início do intervalo de tempo considerado (Ferreira, 2001).

2.2.2 Curva da Banheira

A partir da equação geral acima para confiabilidade, pode-se ver que a mesma é função da forma como a taxa de falhas varia com o tempo. Este comportamento da taxa de falhas $\lambda(t)$ em função do tempo é importante para distinguir formas diferentes de abordar um estudo em confiabilidade. A curva $\lambda(t)$ em função de t é comumente denominada “Curva da Banheira” devido a seu formato. Esta curva é ilustrativamente representada a seguir.

Observa-se que há três fases:

1. A fase I corresponde a uma $\lambda(t)$ decrescente
2. A fase II corresponde a uma $\lambda(t)$ constante
3. A fase III corresponde a uma $\lambda(t)$ crescente

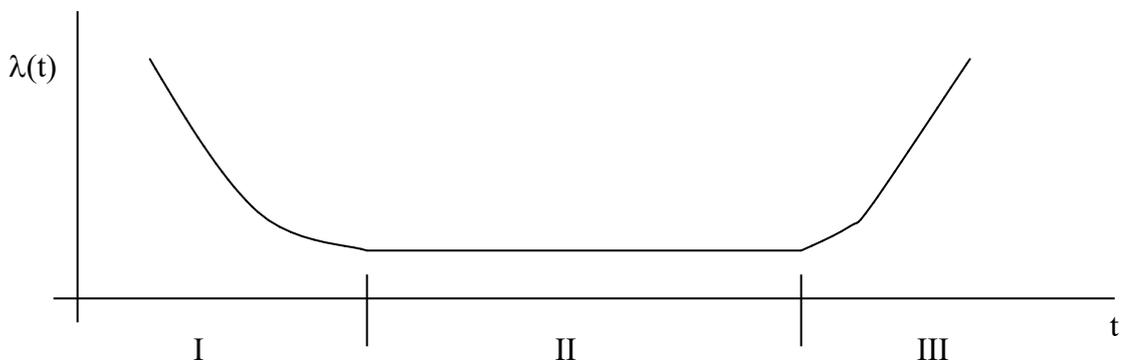


Figura 2.1 - Curva da Banheira

Fonte: Almeida & Souza (2001)

A fase II é considerada a fase operacional, para qual o item é normalmente projetado para funcionar. Nesta fase, as falhas são consideradas “casuais” ou puramente aleatórias. Isto significa que não há uma razão específica para as falhas e a natureza aleatória de seu comportamento é mais significativa. Esta é a chamada fase de vida útil do equipamento ou sistema. O modelo estatístico de falhas nesta fase é o exponencial, como pode ser observado a partir da equação geral de confiabilidade.

As fases I e III não são consideradas operacionais. Procura-se evitar o uso do item nestas fases. As falhas ocorrem por um motivo específico e indesejável. Há estudos e procedimentos específicos aplicáveis para cada uma destas fases no sentido de evita-las.

Na fase I as falhas são denominadas de falhas precoces. Em geral são oriundas de problemas de projeto ou fabricação, ou mesmo relacionados a aspectos de transporte e instalação de equipamentos ou sistemas. Esta fase é por vez denominada de fase de “mortalidade infantil”. Existem procedimentos específicos com o intuito de evitar que um item seja entregue ao cliente nesta fase. Estes são denominados de “burn-in” e “debuging”. O primeiro é geralmente aplicado a componentes mais básicos e implica em acelerar o envelhecimento do item através de procedimentos que envolvem temperaturas elevadas de funcionamento. O segundo pode ser traduzido por processos de depuração, onde o equipamento é submetido a testes funcionais sob condições mais adversas verificando o seu desempenho. Estudos de confiabilidade tratam este problema determinando que condições adversas devem ser aplicadas e por quanto tempo para garantir que o item entrou na fase operacional com um padrão de qualidade adequado.

A fase III corresponde ao fim de vida útil do item. As falhas ocorrem em função do desgaste físico do item. Nesta fase deve-se proceder a substituição do item.

A forma dessa curva pode ser diferente em função da tecnologia empregada para o item. Equipamentos eletrônicos, em geral, tem longa vida útil. A fase II é mais extensa na curva. Equipamentos mecânicos, em geral, tem um período de tempo menor na fase II e logo entram na fase III.

A combinação dos três tipos de falhas acima gera a curva da banheira, conforme ilustrada abaixo:

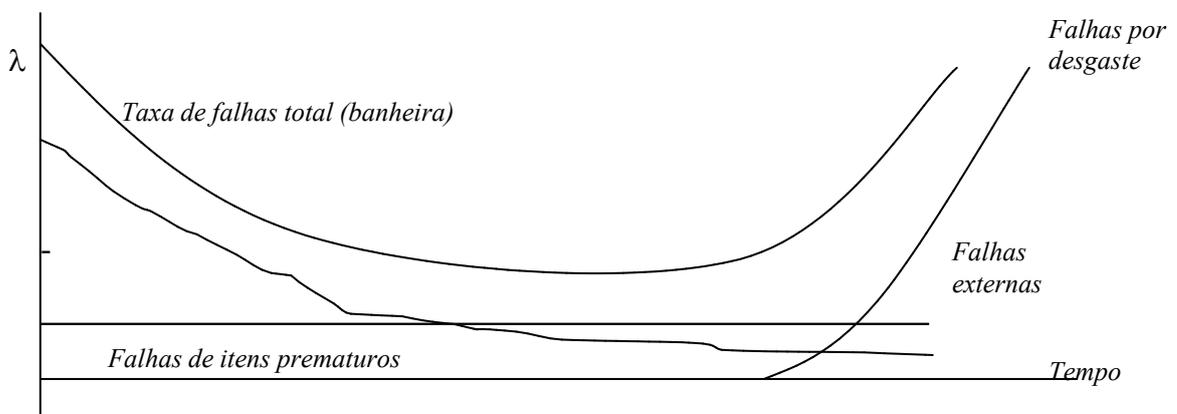


Figura 2.2 - Falhas que geram a Curva da Banheira

Fonte: Almeida & Souza (2001)

Entende-se que quando um item é entregue ao cliente para uso este já se encontra na fase II, ou seja, na fase operacional (Almeida & Souza, 2001).

2.3 Manutenção

A ciência da manutenção ganha força a cada dia, visto a sua importância para garantir o funcionamento de máquinas, equipamentos e instalações, sempre mais complexos, ou quando não, manter as mais simples em condições adequadas de uso, já que, em mundo competitivo, torna-se indispensável a busca de maior disponibilidade do processo produtivo .

2.3.1 Tipos de Manutenção

Existem, basicamente, três tipos de manutenção:

- a) Manutenção Corretiva: processo de ações realizadas como resultado de uma falha ocorrida para fazer o equipamento ou sistema retornar às condições especificadas de funcionamento (O' Connor, 1989, p. xix). A manutenção corretiva é aplicada somente após a ocorrência de falha em um equipamento/instalação.

A Manutenção Corretiva constitui a forma mais cara de manutenção quando encarada do ponto de vista total do sistema. Pura e simples, conduz a:

- Baixa utilização anual dos equipamentos e máquinas e, portanto, das cadeias produtivas;
- Diminuição da vida útil dos equipamentos, máquinas e instalações;
- Paradas para manutenção em momentos aleatórios e muitas vezes, inoportunos por corresponderem a épocas de ponta de produção, a períodos de cronograma apertado, ou até a épocas de crise geral;

No entanto, torna-se impossível eliminar completamente este tipo de manutenção, pois não se pode prever, em muitos casos, o momento exato em que se verificará um defeito que obrigará a uma manutenção corretiva de emergência. (www.cae.ufrn.br/manut/cap03.htm)

- b) Manutenção Preventiva: processo de tarefas realizadas com o objetivo de prevenir a ocorrência de falha em um equipamento ou sistema, antes que ele venha a falhar, uma vez definida a necessidade de intervenção (O' Connor, 1989: xix). Segundo Lyonnel (1991:1), a manutenção preventiva tem a finalidade de reduzir a probabilidade de falha.

Dentre as vantagens deste tipo de manutenção, pode-se citar:

- Redução do número total de intervenções corretivas, diminuindo assim, o custo com as mesmas;
 - Grande diminuição do número de intervenções corretivas ocorrendo em momentos inoportunos como por ex: em períodos noturnos, em fins de semana, durante períodos críticos de produção e distribuição, etc. (www.caee.ufrn.br/manut/cap03.htm).
 - Aumento considerável da taxa de utilização anual dos sistemas de produção e de distribuição; (www.caee.ufrn.br/manut/cap03.htm).
- c) Manutenção Preditiva: é o acompanhamento periódico das instalações e/ou equipamentos através da análise de dados coletados por inspeções, ensaios e instrumentos de monitoração (EMSE, 2005).

2.3.2 Engenharia da Manutenção

A engenharia de manutenção, ou engenharia de produção na manutenção, preocupa-se com o planejamento e gerenciamento de sistemas em operação, ou seja, com a produção de um serviço. (Almeida & Souza, 2001).

É uma nova concepção, que constitui uma quebra de paradigma na manutenção. Praticar engenharia da manutenção é deixar de ficar consertando continuamente, para procurar as causas básicas, modificar situações permanentes de mau desempenho, deixar de conviver com problemas crônicos, melhorar padrões e sistemáticas, desenvolver o programa de manutenção, dar feedback ao projeto. (www.caee.ufrn.br/manut/cap03.htm)

2.3.3 Análise Bayesiana

Segundo Cavalcante (2003), além dos aspectos de incerteza que dificultam a análise e o aproveitamento dos dados e, a despeito das ferramentas e metodologias que propõem o tratamento destes aspectos, surgem ainda outras dificuldades associadas à ausência dos dados.

Na manutenção, é comum a ocorrência de situações em que não se têm dados ou estes são pouco confiáveis (Evans, 1982; Evans, 1991). Frequentemente estas situações se devem a uma estrutura de organização da manutenção cuja cultura ainda não valoriza o processo de planejamento, nem tão pouco os resultados que podem ser levantados a partir da análise dos dados. Há também o caso das organizações que perdem sua “memória técnica” devido a mudanças em sua estrutura, tais como privatizações e redução do seu quadro de funcionários.

Nestes casos acima citados se faz uso da análise Bayesiana, que permite ao engenheiro usar informações provenientes de fontes distintas, como handbooks e opiniões de especialistas, na formulação de uma distribuição de probabilidade de algum parâmetro de interesse. Esta distribuição é chamada de distribuição *a priori*. A maior contribuição desta abordagem é que, para um dado parâmetro, por exemplo, a taxa de falha, os resultados podem ser sistematicamente atualizados à medida que novas informações se tornem disponíveis e assim, novas distribuições serão obtidas. A esta contribuição dá-se o nome de distribuição *a posteriori* (Cavalcante & Almeida, 2005).

Esta abordagem, que foi considerada uma moderna metodologia estatística, surgiu a partir da publicação de “*An essay towards solving a problem in the doctrine of chances*” atribuído a Bayes e comunicado para Royal Society após sua morte por Richard Prince em 1763 (Martz & Waller, 1982; Souza, 2002).

O resultado técnico deste ensaio é o que se conhece hoje por teorema de Bayes. Em uma forma simples, se H denota uma hipótese e D denota dados, o teorema mostra que:

$$P(H \mid D) = \frac{P(D \mid H)P(H)}{P(D)} \quad (2.14)$$

Onde: $P(H)$ = declaração probabilística da crença sobre H antes da obtenção dos dados.

$P(H \mid D)$ = declaração probabilística da crença sobre H após a obtenção de D

2.3.3.1 Conhecimento *a priori* e Processos de Elicitação

Ao se referir à estrutura de um problema de decisão, depara-se com uma grandeza que não se tem controle sobre ela: é o estado da natureza.

A expressão *a priori*, aqui colocada, significa o estado que antecede qualquer experimento, ou o estado que antecede a observação de qualquer variável que possa fornecer informações sobre o estado da natureza θ . Na maioria das vezes, pelo menos um mínimo de conhecimento sobre θ pode ser considerado. A partir do conhecimento que se tem sobre θ , é possível definir uma família paramétrica de densidades. Quando isso ocorre, a distribuição *a priori* é representada por uma forma funcional, cujos parâmetros devem se especificados de acordo com este conhecimento.

Neste contexto, considerando que há incerteza e que esta incerteza é de natureza probabilística, representada por uma distribuição de probabilidade $\pi(\theta)$, poderá esta ter origem ou de dados colecionados sobre θ (quando esses se fazem presentes) ou do conhecimento de um ou mais especialistas, envolvidos com o evento relacionados com θ . A

obtenção da distribuição de probabilidade a priori sobre o conhecimento do especialista é obtida através de um processo de elicitação.

Existem alguns métodos de elicitação do conhecimento a priori do especialista, uns muito simples e outros com uma sofisticação bastante considerável. Neste trabalho, será usada a distribuição de probabilidade Gama $\zeta (\alpha_0, \beta_0)$ como modelo de distribuição *a priori* que modela o conhecimento do especialista sobre a taxa de falha $\lambda(t)$ do equipamento. A finalidade do processo de educação resume-se na obtenção dos parâmetros da distribuição gama de uma forma indireta, que consiste em consultar o especialista a respeito do limite inferior (LL) e limite superior (UL) da taxa de falhas do equipamento em estudo.

2.4 Modelo de Dimensionamento de Sobressalentes

O dimensionamento de sobressalentes abordado neste trabalho considera que a quantidade de sobressalentes é uma função da demanda do número de itens requisitados. Este número de itens, por sua vez, depende do número de falhas, ou seja, da confiabilidade do equipamento.

O problema a ser estudado está diretamente relacionado com o comportamento que a variável número de falhas apresenta em função do tempo. Como no período de vida útil de um equipamento, a taxa de falhas $\lambda(t)$ apresenta um comportamento constante em função do tempo, a função confiabilidade é representada pela função de probabilidade exponencial. É importante considerar a independência das falhas entre os itens que compõem o sistema.

Em sistemas constituídos de vários itens, o tempo entre falhas tende a uma distribuição exponencial à medida que a complexidade e o tempo de operação aumentam. Esta aproximação pode ser aplicada para um equipamento composto de vários componentes ou módulos, cada um seguindo padrões diferentes de falha. No entanto, deve-se tomar alguns cuidados na aplicação desta aproximação, como por exemplo, quando um dos itens do sistema apresenta um padrão de falhas muito acentuado em relação aos demais: então o padrão coletivo tende a ser afetado principalmente por este item (Almeida, 1997).

Neste trabalho, a taxa de falha do sobressalente em análise é desconhecida. No entanto, este dado é necessário para o cálculo do número de peças de reposição. Com isso, tomou-se como hipótese que a função que modela o conhecimento do especialista sobre a taxa de falha é a distribuição Gama.

2.4.1 Abordagem Baseada No Risco de Quebra de Estoque com Uso de Conhecimento a Priori

Existem situações práticas em que não é possível a obtenção dos valores relativos aos parâmetros de confiabilidade e/ou manutenibilidade de um sistema. Esta abordagem representa um procedimento para o dimensionamento de sobressalentes nos casos em que pelo menos um desses parâmetros não seja conhecido (Almeida & Souza, 2001).

Nesses casos, utiliza-se o conhecimento *a priori* em relação à confiabilidade e/ou a manutenibilidade do sistema. Assim, uma probabilidade *a priori* é aplicada para a obtenção de valores esperados de risco ou margem de segurança, de modo a determinar os quantitativos adequados de sobressalentes. Logo, na ausência de dados, pode-se obter uma distribuição de probabilidade *a priori* sobre estes. Para este estudo, será usada a seguinte situação: *Ausência de conhecimento sobre a taxa de falhas λ* (Almeida & Souza, 2001). Neste caso, obtém-se uma probabilidade *a priori* sobre λ : $\pi(\lambda)$.

Para tratar o problema de dimensionamento de sobressalentes na ausência de dados, considera-se o valor esperado da margem de segurança (MS):

$$E_{\lambda} MS(NS) := \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{NS} \frac{(NM \times TS \times \lambda)^k \times e^{-(NM \times TS \times \lambda)}}{k!} \times f(\lambda) d\lambda \quad (2.15)$$

Onde:

TS – tempo de suprimento

MS – margem de segurança

NS – quantitativo de sobressalentes calculado

NM – quantidade de itens em exposição

3 ABORDAGEM DO PROBLEMA

Este capítulo refere-se ao estudo de caso propriamente dito. Primeiramente, com o objetivo de situar o leitor no ambiente onde foi realizado o estudo, será descrita toda a estrutura de manutenção da CELPE. Em seguida, será apresentado o equipamento a ser dimensionado e a justificativa para tal escolha. Por fim, será mostrado ao leitor o modelo de obtenção do conhecimento à priori do especialista.

3.1 Estrutura de Manutenção da CELPE

A manutenção preventiva/preditiva dos equipamentos e instalações das subestações e seccionadoras do Sistema de Transmissão da Celpe tem o seu plano de atividades norteado por critérios e procedimentos adotados pelas empresas do grupo Neoenergia: Celpe, Coelba, e Cosern, sendo observadas as especificidades do sistemas.

Os critérios e periodicidades que regem o plano básico de atividades por família de equipamentos foram revisados em 2004, sob a ótica dos especialistas da Celpe, sendo efetuados alguns ajustes em relação a 2003.

É importante destacar que em 2003 foi implantado na EMSE, um Sistema de Apoio à Decisão para o estabelecimento de políticas de manutenção preventiva. O sistema possibilitará definir a periodicidade ótima para as atividades. Isso representa uma evolução nesse processo, considerando que o problema, hoje, é tratado com uma abordagem fundamentada em análise de dados, recomendações de fabricantes e o conhecimento a priori de especialistas, sem o suporte de ferramentas específicas. Durante a implantação do sistema, foram realizados estudos de casos, onde se analisaram as periodicidades de manutenção para alguns equipamentos (Cavalcante & Ferreira, 2003).

Outra ferramenta de suma importância, também implantada em 2003 na EMSE foi um Sistema de Apoio a Decisão para o dimensionamento de sobressalentes. O sistema permite tratar de forma adequada o dimensionamento de sobressalentes, que é uma das etapas mais críticas do planejamento dos recursos de manutenção, devido ao impacto que a falta de peças e componentes em estoque exerce sobre o tempo de manutenção e conseqüentemente sobre a disponibilidade dos equipamentos/sistema.

O plano foi gerado pelo Sistema SAP/R3 (Sistema de Gestão Operacional) e submetido à análise das Unidades Executivas e NPL's (Núcleo Polivalente Local), onde foram discutidos aspectos técnicos de operacionalização. Foram realizados os ajustes necessários atendendo às críticas e necessidades de cada área.

Além do conjunto de atividades que contempla todas as inspeções e controles preditivos, todas as manutenções sistemáticas por tempo definido e todas as manutenções decorrentes das preditivas (manutenções por estado), o plano indica, para os equipamentos de disjunção e manobra, os critérios e a forma de operacionalização (EMSE, 2005).

3.1.1 Sistema a ser mantido

Tabela 3.1 – Sistema a ser mantido

(Fonte: Plano de Manutenção Preventiva/Preditiva para as Subestações Celpe 2005)

<i>UNIDADE DE MANUTENÇÃO</i>	<i>REGIÃO</i>	<i>NPL's</i>	<i>SUBESTAÇÃO (SE)</i>	<i>SE/SEC</i>	<i>SECCIONADORA (SEC)</i>	<i>CHAVEAMENTO</i>	<i>TOTAL</i>
<i>EMRS</i>	<i>Metropolitana</i>	<i>ILR</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>11</i>
	<i>Litoral</i>	<i>PRU</i>	<i>13</i>	<i>2</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>16</i>
	<i>Sul</i>	<i>RJO</i>	<i>7</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>09</i>
<i>EMRN</i>	<i>Metropolitana</i>	<i>SBT</i>	<i>8</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>10</i>
	<i>Litoral</i>	<i>CRS</i>	<i>8</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>12</i>
	<i>Norte</i>	<i>CPN</i>	<i>10</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>10</i>
<i>EMAG</i>	<i>Agreste Meridional</i>	<i>GAN</i>	<i>11</i>	<i>2</i>	<i>0</i>	<i>3</i>	<i>15</i>
	<i>Agreste Setentrional</i>	<i>CAA</i>	<i>12</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>15</i>
<i>EMST</i>	<i>Médio Sertão</i>	<i>SRT</i>	<i>11</i>	<i>2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>16</i>
	<i>Alto Sertão</i>	<i>PTU</i>	<i>15</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>16</i>
<i>TOTAL</i>	<i>–</i>	<i>–</i>	<i>101</i>	<i>16</i>	<i>3</i>	<i>11</i>	<i>131</i>

Onde:

SE: Subestação considerada isoladamente.

SEC: Instalação com Disjuntores e Chaves seccionadoras em ambiente físico separado da subestação

SE/SEC: Subestação com Seccionadora no mesmo ambiente físico.

Chaveamento: Instalação composta por mais de uma Chave seccionadora em ambiente físico separado da subestação

3.1.2 Conceitos CELPE

Os conceitos abaixo descritos regem o Plano de Manutenção Preventiva/Preditiva para Subestações da CELPE. Este plano é feito pelos membros da Unidade de Planejamento e Controle da Manutenção de Subestações (EMSE).

- *Família de Equipamentos:* São os grupos de equipamentos com características semelhantes e cujos critérios, periodicidades e roteiros de manutenção podem ser aplicados, observadas as especificidades de cada um.
- *Manutenção Preventiva:* É toda ação de controle, conservação, restauração, ajustes e eliminação de defeitos, podendo-se utilizar técnicas preditivas, com o objetivo de manter um item dentro dos parâmetros operativos e padrão de desempenho especificado.
- *Manutenção Preditiva:* É o acompanhamento periódico das instalações e/ou equipamentos através da análise de dados coletados por inspeções, ensaios e instrumentos de monitoração. São consideradas como Manutenção Preditiva as inspeções visuais, termográficas e as análises de óleo mineral isolante. Incluem-se aí as Manutenções Tipo B que contemplam verificações externas, ensaios elétricos e de funcionalidade.
- *Manutenção Preventiva Por Condição ou Estado de Defeito:* Serviços de manutenção realizados nas instalações e equipamentos para correções de anomalias detectadas através das manutenções preditivas
- *Manutenção Preventiva Por Oportunidade:* É toda manutenção realizada, quando necessária, aproveitando a liberação de um equipamento ou instalação.
- *Manutenção Tipo A:* É toda manutenção preventiva cuja execução não acarreta indisponibilidade operacional e nem desmontagem do equipamento / instalação. É estabelecida por períodos fixos e varia para as famílias de equipamentos.
- *Manutenção Tipo B:* É toda manutenção preventiva cuja execução acarreta indisponibilidade operacional, porém não requer desmontagem parcial ou total do equipamento / instalação. É estabelecida por períodos fixos e varia para as famílias de equipamentos ou por necessidade constatada na manutenção tipo A.
- *Manutenção Tipo C:* É toda manutenção cuja execução acarreta indisponibilidade operacional , com desmontagem parcial ou total do equipamento / instalação.

3.1.3 Metodologia

A metodologia empregada para elaboração do plano de atividades, que é norteado por critérios e procedimentos adotados pelas empresas do grupo Neoenergia: Celpe, Coelba, Cosern, foi elaborada nas seguintes etapas:

- 1) Análise do Banco de Dados da Manutenção (planilhas de Excel \ SAP)
 - a) Atualização do cadastro das instalações e dos equipamentos, processando no banco de dados as movimentações de equipamentos atualizando as suas saídas do sistema.
 - b) Atualização de planos básicos de manutenção por equipamentos.
 - c) Atualização de roteiros de manutenção.
 - d) Análise das manutenções realizadas para cada equipamento e aplicação dos critérios pré-definidos.
- 2) Carregamento dos planos de manutenção no SAP e simulação, para consistência, com os controles em excel e orçamentação do plano de custeio.
 - a) Verificação do cadastro de equipamentos
 - b) Geração dos planos no SAP, através de funcionalidade específica do sistema.
 - c) Verificação e conferência de dados.
 - d) Verificação dos kits de manutenção necessários, por atividades.
 - e) Elaboração do plano de custeio.
- 3) Apresentação do plano para os órgãos executivos do EMS (Unidades e NPL's) para sugestões técnicas e de operacionalização.
- 4) Correções e ajustes conforme indicações do órgãos executivos.

3.2 O Equipamento: *Pára-Raios Série de Regulador de Tensão*

Apesar de ser um equipamento de grande relevância para o funcionamento do sistema elétrico da CELPE, não há planejamento algum quanto ao dimensionamento do pára-raios série de regulador de tensão. Atualmente, sua reposição no estoque é feita mediante a sua

saída para a troca de algum pára-raios com defeito. Sendo assim, o dimensionamento correto deste equipamento evitará que a empresa tenha custos adicionais de estoque, ou, no caso de um dimensionamento inferior ao necessário, custos relacionados ao tempo de parada do sistema.

3.2.1 Descrição do Equipamento

Os pára-raios de distribuição são usados para proteger equipamentos contra descargas atmosféricas e outros surtos de tensão nas redes de distribuição de energia. Também atuam quando da ocorrência de defeitos internos na parte ativa/comutador.

A instalação desse equipamento é feita entre os terminais de entrada e saída de cada fase do regulador. Como estes reguladores de tensão são trifásicos, são instalados três pára-raios em cada regulador de tensão de subestação.

Os pára-raios de distribuição são fabricados com varistores de óxido metálico e sem centelhador série.

O invólucro é de borracha de silicone, resistente à radiação UV e às mais severas condições climáticas.

Esses equipamentos são fornecidos com desligador automático, cuja função é desconectar os da rede em caso de falha e são produzidos e ensaiados em laboratório no Brasil e no exterior.

3.3 Obtenção de Conhecimento a Priori

No presente estudo de caso será utilizada a distribuição de probabilidade Gama $\zeta (\alpha_0, \beta_0)$ para modelar o conhecimento do especialista. É importante esclarecer que chamamos de especialista aqueles profissionais cuja experiência reconhecida permite que sejam considerados especialistas em determinadas áreas de interesse para o estudo que se deseja desenvolver (Ferreira, 2001).

Existem diversas distribuições de probabilidade que podem, também, modelar o conhecimento do especialista acerca do equipamento em análise, no entanto a forma de se obter este conhecimento é um tanto quanto complicada, pois exige que sejam feitas várias perguntas ao mesmo sobre o parâmetro de interesse. No caso da distribuição Gama, o especialista responde apenas duas perguntas: O limite inferior (LL) e o limite superior (UL) da taxa de falhas do equipamento a ser dimensionado.

Esses limites devem obedecer as seguintes condições (Martz & Waller, 1982):

$$\Pr(\lambda < LL) = \Pr(\lambda > UL) = \frac{(1.0 - p_0)}{2} \quad (3.1)$$

Onde p_0 , que corresponde ao intervalo de confiança, deve ser igual a um dos valores: 0.95, 0.90, 0.80, e onde $LL < UL$.

Ou seja, o valor de p_0 deve ser escolhido de tal modo que as chances de a taxa de falhas ser menor que LL ou maior que UL sejam iguais e correspondam a $50(1.0 - p_0)\%$.

De posse dessas condições, deve-se seguir os seguintes passos:

Passo 1: Obter os valores de LL e UL, com o especialista, assim como definir qual será o valor de p_0 .

Passo 2: obter o valor de $\log_{10}^{(UL/LL)}$

Passo 3: De posse do valor de p_0 e do valor de $\log_{10}^{(UL/LL)}$, calculado no passo 2, obtém-se o valor de α_0 , de acordo com a tabela C1, no anexo 1.

Passo 4: Através do valor de p_0 e do valor de α_0 , encontra-se na tabela C3, anexo II, o valor de b_0 .

Passo 5: Para o valor de LL, especificado no primeiro passo, e o valor de b_0 , calculado no passo 4, calcula-se o valor do parâmetro β_0 , de acordo com a seguinte expressão:

$$\beta_0 = \frac{b_0(1 \cdot 10^{-6} f / h)}{LL}$$

4 RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado o resultado obtido para o dimensionamento de sobressalentes do Pára-raio Série de Regulador de Tensão, de acordo com o que foi apresentado no Capítulo 3 quanto à ausência do conhecimento da taxa de falhas λ do equipamento.

4.1 Resultado do Dimensionamento de Sobressalentes

Para o cálculo do dimensionamento de sobressalentes do Pára-Raio Série de Regulador de Tensão, o especialista foi interrogado sobre o limite inferior (LL) e o limite superior (UL) da taxa de falhas do equipamento. De acordo com um intervalo de confiança de 90%, o especialista definiu os seguintes limites:

$$LL = 2,92275 \cdot 10^{-7} f / h$$

$$UL = 3,5073 \cdot 10^{-6} f / h$$

Vale salientar que o especialista entrevistado possui um conhecimento avançado a cerca do assunto, pois já realizou alguns trabalhos semelhantes, o que facilitou o entendimento do mesmo à respeito do conceito de taxa de falhas.

A partir deste primeiro passo, foram realizados os passos subseqüentes citados no capítulo anterior, como segue abaixo:

Passo 2:

$$\log\left(\frac{UL}{LL}\right) = 1,079$$

Passo 3:

Encontrar o valor de α_0 na Tabela C1, anexo I:

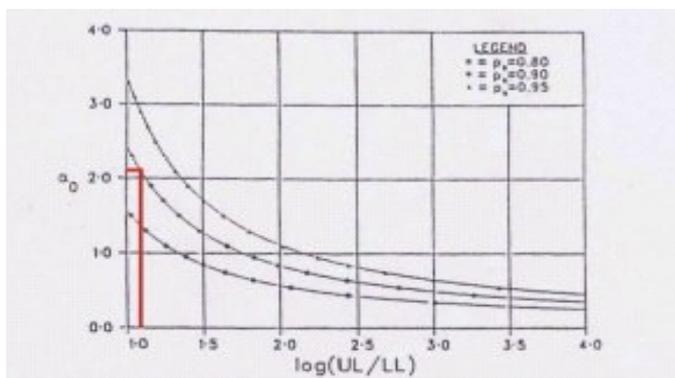


Figura 4.1 - demonstração do resultado de α_0

$$\alpha_0 = 2,1$$

Passo 4:

Encontrar o valor de b_0 na Tabela C3, anexo II:

$$b_0 = 3,9621 \times 10^5$$

Passo 5:

$$\beta_0 = 1,356 \times 10^6$$

A Distribuição de Probabilidade Gama:

$$f(x) = \frac{\beta^{\alpha_0}}{\Gamma(\alpha_0)} \times x^{\alpha_0-1} \times e^{(-x \times \beta_0)}$$

Para verificar se os procedimentos acima foram corretamente cumpridos, resolve-se a seguinte equação:

$$\int_{LL}^{UL} f(u) du = p_0$$

Sendo assim, para a análise em questão:

$$\int_{LL}^{UL} f(u) du = 0,893$$

De acordo com o valor obtido acima, pode-se concluir que os limites estabelecidos pelo especialista foram coerentes, pois o resultado da integral $\int_{LL}^{UL} f(u) du$ deu um valor muito próximo a 0,90, que foi o valor estabelecido para p_0 .

Segue abaixo a demonstração dos formatos das curvas dos gráficos de densidade de probabilidade e de distribuição de probabilidade encontrados a partir dos resultados obtidos.

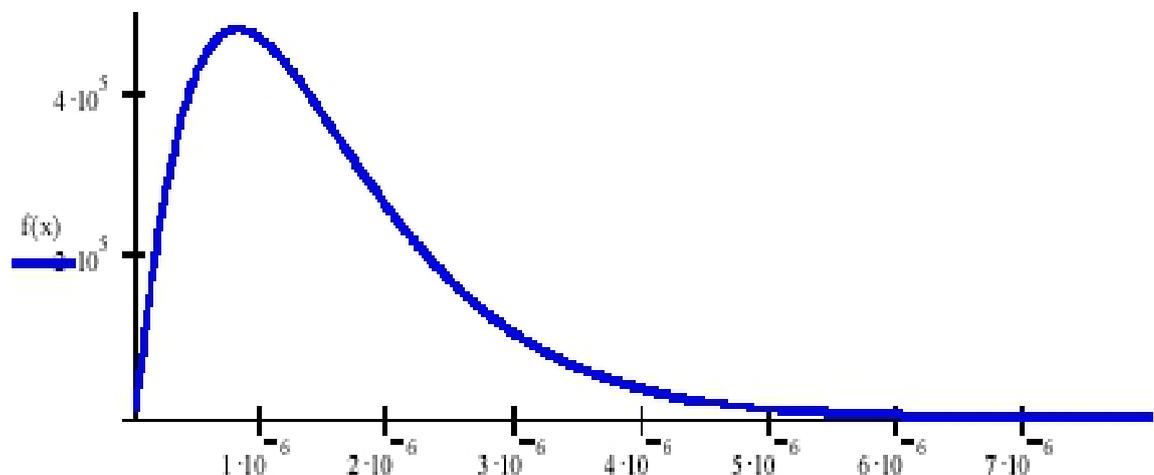


Figura 4.2 – Gráfico da função densidade de probabilidade

$$CDF(x) := \int_{10^{-8}}^x f(u) du$$

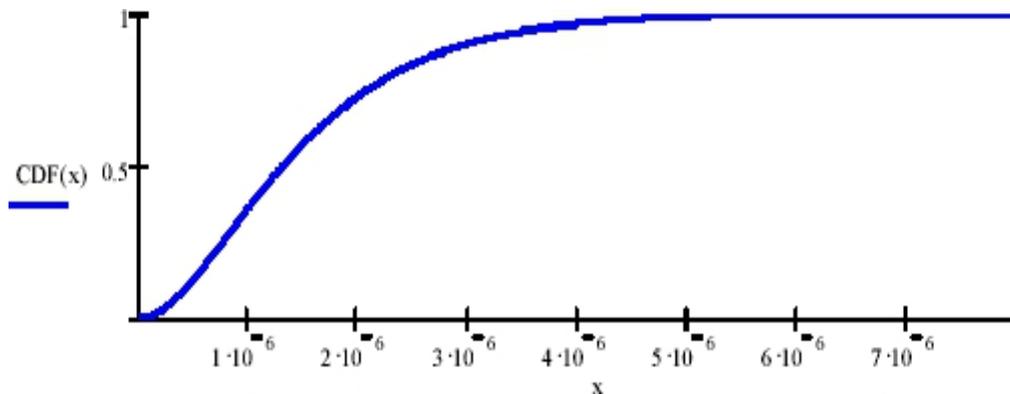


Figura 4.3 – Gráfico da função de distribuição de probabilidade

Cálculo do valor esperado da Margem de Segurança, de acordo com o Capítulo 2.3.1:

$$E_{\lambda} MS(NS) := \int_{10^{-8}}^{10^{-5}} \sum_{k=0}^{NS} \frac{(NM \times TS \times \lambda)^k \times e^{-(NM \times TS \times \lambda)}}{k!} \times f(\lambda) d\lambda$$

$$E_{\lambda} MS(0) = 0,8526$$

$$E_{\lambda} MS(1) = 0,9835$$

$$E_{\lambda} MS(2) = 0,9983$$

$$E_{\lambda} MS(3) = 0,9998$$

$$E_{\lambda} MS(4) = 0,9999$$

$$E_{\lambda} MS(5) = 0,9999$$

De acordo com os valores obtidos acima, percebe-se que a menor margem de segurança é adquirida quando o número de sobressalentes for igual a zero. À medida em que se aumenta o número de sobressalentes a margem de segurança aumenta também. No entanto, pode-se notar que a partir de quatro sobressalentes a margem de segurança mantém-se a mesma, o que indica que manter um estoque com uma quantidade superior a quatro equipamentos é desnecessário. No entanto, é normal se estabelecer um valor de 5% para o risco máximo de quebra de estoque. Neste caso, observa-se que apenas um sobressalente já é o suficiente para atender os requisitos de funcionamento do sistema.

Vale ressaltar que esta análise não enfoca a restrição orçamentária, apenas a necessidade de sobressalentes.

5 CONCLUSÕES

Devido às mudanças ocorridas na estrutura organizacional da CELPE com a sua privatização e à perda de “memória técnica” da empresa decorrente da rápida redução de quadro de funcionários, torna-se inviável a tomada de decisão com base nos dados existentes, pois o banco de dados além de precário não se caracteriza como confiável. No entanto, a empresa busca a efficientização de seus processos através do uso de metodologias que tenham respaldo científico, para a obtenção dos resultados esperados a níveis empresariais.

Tendo em vista a necessidade acima citada, este trabalho apresentou um modelo de dimensionamento de sobressalentes, baseado no risco máximo de quebra de estoque, aplicado ao equipamento pára-raio série de regulador de tensão da CELPE. Paralelamente, foi necessário usar o conhecimento a priori do especialista como fonte alternativa para a obtenção dos parâmetros de confiabilidade/mantenabilidade do equipamento, já que a CELPE não dispunha de tais informações.

A entrevista com o especialista foi de fundamental importância, visto que não se dispunham de dados para a realização do estudo. Além disso, os dados obtidos com o especialista mostraram-se coerentes com os resultados logo na primeira análise, visto que o especialista entrevistado é dotado de vasta experiência com o equipamento estudado, assim como detém o conhecimento também do modelo aplicado.

O presente trabalho, no entanto, é limitado à necessidade de peças de reposição. Não aborda a questão referente aos custos associados. Sugere-se que em um próximo estudo sejam abordadas as restrições orçamentárias para o dimensionamento das peças de reposição e também a elaboração de um estudo comparativo da utilização das diversas funções de distribuição *a priori* para representar o conhecimento *a priori* do especialista.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. T. de. (1997) Engenharia de Manutenção. Notas de aula na UFPE, Recife.

ALMEIDA, A. T. de. (2000) Decisão Multicritério na Engenharia de Manutenção – Modelos de Decisão e Aplicações In: Almeida, A. T. de & Souza, F. M. C. , *Produtividade e competitividade: aplicações e inovações*. Editora Universitária, Recife, p255-299.

ALMEIDA, A. T. & SOUZA, F. M. C., org. (2001) *Gestão da Manutenção – Na direção da competitividade*. Editora Universitária, Recife

CAVALCANTE, C. A.V. Modelos Multicriterio de Apoio a Decisão para Manutenção Preventiva Baseados no Método Promethee. Recife, 2003. 131p. (Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco)

CAVALCANTE, C. A. V. & ALMEIDA, A. T.de. (2005) Modelo Multicritério de Apoio a Decisão para o Planejamento de Manutenção Preventiva Utilizando ROMETHEE II em Situações de Incerteza. Pesquisa Operacional, vol. 25, n. 2.

CAVALCANTE, C. A. V. & FERREIRA, R. J. P. & FERREIRA, H. L. & ALMEIDA, A. T. de. Sistema de Apoio à Decisão para o estabelecimento de política de manutenção preventiva. In: XXIII ENEGEP, 2003, Ouro Preto. 2003.

EVANS, R. A. *O Data, Data! Wherefore Art Than Data?* IEEE Trans. Reliability. Vol. 31, N. 4 pp. 321, 1982

EVANS, R. A. *O Data, Data! Wherefore Art Than Data?* IEEE Trans. Reliability. Vol. 40, N. 5 pp. 497, 1991.

FERREIRA, H. L. Uso de conhecimento a priori de especialistas no dimensionamento de sobressalentes para manutenção do sistema na CELPE. Recife, 2001. 93p. (Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco)

MELO, C. S. L. de. (1998) *Um Modelo de Decisão Multicritério Para Dimensionamento de Sobressalentes Baseado Em Teoria da Utilidade Multiatributo*. Recife, 83p. (Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco).

O'CONNOR, P. D. T. (1985) *Practical Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, pp. 398p. ISBN: 0-471-90551-8.

MARTZ, H. F. & WALLER, R. A. *Bayesian Reliability Analysis*, John Wiley & Sons, 1982

SOUZA, F. C. M. *Decisões Racionais em situações de Incerteza*, Editora Universitária, 2002

XENOS, H. G. d'P. (1998) *Gerenciando a Manutenção Produtiva*. Editora de Desenvolvimento Gerencial

ARAÚJO, I. M. & SANTOS C. K. S. *Manutenção Elétrica Industrial*

Disponível em: (www.caee.ufrn.br/manut/cap03.htm)

Acessado em: 01/07/2005

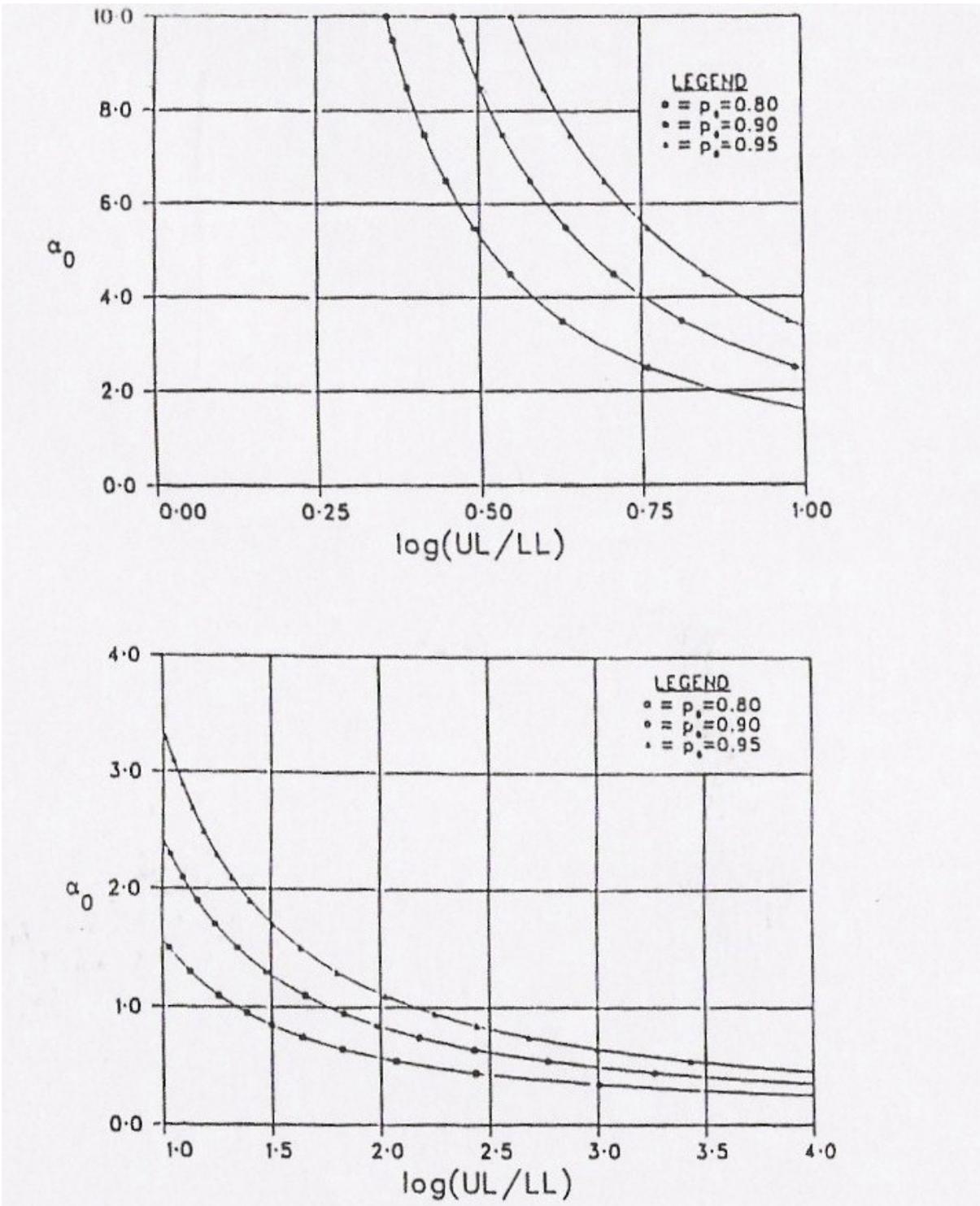


Tabela C1 – Parâmetro α_0 como função de $\log\left(\frac{UL}{LL}\right)$

Fonte: (Martz & Waller, 1982)

α_0	p_0		
	0.95	0.90	0.80
0.01	3.5227-155	4.4655-125	5.6607E-95
0.02	4.5019E-75	5.0687E-60	5.7068E-45
0.03	2.2797E-48	2.4673E-38	2.6702E-28
0.04	5.1503E-35	1.7282E-27	5.7988E-20
0.05	5.3157E-27	5.5739E-21	5.8446E-15
0.06	1.1726E-21	1.2199E-16	1.2691E-11
0.07	7.7079E-18	1.5394E-13	3.0746E-09
0.08	5.6375E-15	3.2656E-11	1.8916E-07
0.09	9.5383E-13	2.1098E-09	4.6669E-06
0.10	5.7917E-11	5.9307E-08	6.0730E-05
0.11	1.6690E-09	9.1013E-07	4.9629E-04
0.12	2.7502E-08	8.8704E-06	2.8611E-03
0.13	2.9479E-07	6.0971E-05	1.2611E-02
0.14	2.2538E-06	3.1852E-04	4.5014E-02
0.15	1.3150E-05	1.3360E-03	1.3573E-01
0.16	6.1598E-05	4.6882E-03	3.5682E-01
0.17	2.4079E-04	1.4204E-02	8.3786E-01
0.18	8.0955E-04	3.8074E-02	1.7907E+00
0.19	2.3972E-03	9.2062E-02	3.5355E+00
0.20	6.3725E-03	2.0392E-01	6.5255E+00
0.21	1.5443E-02	4.1900E-01	1.1368E+01
0.22	3.4551E-02	8.0682E-01	1.8841E+01
0.23	7.2112E-02	1.4684E+00	2.9900E+01
0.24	1.4163E-01	2.5435E+00	4.5682E+01
0.25	2.6366E-01	4.2186E+00	6.7501E+01
0.26	4.6815E-01	6.7327E+00	9.6835E+01
0.27	7.9697E-01	1.0384E+01	1.3531E+02
0.28	1.3067E+00	1.5534E+01	1.8469E+02
0.29	2.0715E+00	2.2611E+01	2.4685E+02
0.30	3.1857E+00	3.2110E+01	3.2372E+02
0.31	4.7668E+00	4.4597E+01	4.1734E+02
0.32	6.9577E+00	6.0702E+01	5.2976E+02
0.33	9.9288E+00	8.1121E+01	6.6303E+02
0.34	1.3880E+01	1.0661E+02	8.1924E+02
0.35	1.9041E+01	1.3798E+02	1.0004E+03
0.36	2.5675E+01	1.7610E+02	1.2086E+03
0.37	3.4074E+01	2.2186E+02	1.4457E+03
0.38	4.4566E+01	2.7622E+02	1.7135E+03
0.39	5.7506E+01	3.4015E+02	2.0140E+03
0.40	7.3283E+01	4.1465E+02	2.3489E+03

Tabela C3 – Valor de b_0 em função de α_0 e p_0

α_0	p_0		
	0.95	0.90	0.80
0.61	1.9723E+03	6.1602E+03	1.9348E+04
0.62	2.1859E+03	6.7047E+03	2.0685E+04
0.63	2.4152E+03	7.2789E+03	2.2071E+04
0.64	2.6605E+03	7.8833E+03	2.3506E+04
0.65	2.9225E+03	8.5182E+03	2.4991E+04
0.66	3.2016E+03	9.1840E+03	2.6525E+04
0.67	3.4982E+03	9.8811E+03	2.8108E+04
0.68	3.8130E+03	1.0610E+04	2.9739E+04
0.69	4.1462E+03	1.1370E+04	3.1418E+04
0.70	4.4983E+03	1.2163E+04	3.3145E+04
0.71	4.8698E+03	1.2988E+04	3.4921E+04
0.72	5.2610E+03	1.3846E+04	3.6743E+04
0.73	5.6722E+03	1.4737E+04	3.8612E+04
0.74	6.1040E+03	1.5660E+04	4.0526E+04
0.75	6.5565E+03	1.6616E+04	4.2491E+04
0.76	7.0302E+03	1.7606E+04	4.4499E+04
0.77	7.5253E+03	1.8629E+04	4.6552E+04
0.78	8.0421E+03	1.9685E+04	4.8651E+04
0.79	8.5809E+03	2.0775E+04	5.0794E+04
0.80	9.1420E+03	2.1898E+04	5.2982E+04
0.81	9.7256E+03	2.3054E+04	5.5213E+04
0.82	1.0332E+04	2.4244E+04	5.7486E+04
0.83	1.0961E+04	2.5467E+04	5.9806E+04
0.84	1.1614E+04	2.6723E+04	6.2166E+04
0.85	1.2289E+04	2.8013E+04	6.4569E+04
0.86	1.2989E+04	2.9336E+04	6.7013E+04
0.87	1.3712E+04	3.0692E+04	6.9498E+04
0.88	1.4459E+04	3.2082E+04	7.2024E+04
0.89	1.5229E+04	3.3504E+04	7.4590E+04
0.90	1.6024E+04	3.4959E+04	7.7197E+04
0.91	1.6843E+04	3.6448E+04	7.9842E+04
0.92	1.7687E+04	3.7968E+04	8.2527E+04
0.93	1.8555E+04	3.9522E+04	8.5251E+04
0.94	1.9447E+04	4.1107E+04	8.8012E+04
0.95	2.0364E+04	4.2725E+04	9.0812E+04
0.96	2.1305E+04	4.4375E+04	9.3649E+04
0.97	2.2271E+04	4.6057E+04	9.6522E+04
0.98	2.3262E+04	4.7771E+04	9.9432E+04
0.99	2.4278E+04	4.9516E+04	1.0238E+05
1.00	2.5318E+04	5.1293E+04	1.0536E+05

(Continuação)

Tabela C3 – Valor de b_0 em função de α_0 e p_0

α_0	p_0		
	0.95	0.90	0.80
2.05	2.5797E+05	3.7560E+05	5.5784E+05
2.10	2.7411E+05	3.9621E+05	5.8419E+05
2.15	2.9062E+05	4.1716E+05	6.1085E+05
2.20	3.0748E+05	4.3845E+05	6.3780E+05
2.25	3.2469E+05	4.6007E+05	6.6504E+05
2.30	3.4224E+05	4.8201E+05	6.9255E+05
2.35	3.6011E+05	5.0425E+05	7.2032E+05
2.40	3.7830E+05	5.2679E+05	7.4835E+05
2.45	3.9680E+05	5.4963E+05	7.7663E+05
2.50	4.1561E+05	5.7274E+05	8.0515E+05
2.55	4.3470E+05	5.9612E+05	8.3391E+05
2.60	4.5409E+05	6.1977E+05	8.6288E+05
2.65	4.7375E+05	6.4368E+05	8.9208E+05
2.70	4.9369E+05	6.6784E+05	9.2149E+05
2.75	5.1389E+05	6.9224E+05	9.5110E+05
2.80	5.3435E+05	7.1688E+05	9.8092E+05
2.85	5.5507E+05	7.4175E+05	1.0109E+06
2.90	5.7603E+05	7.6685E+05	1.0411E+06
2.95	5.9723E+05	7.9216E+05	1.0715E+06
3.00	6.1867E+05	8.1769E+05	1.1021E+06
3.05	6.4034E+05	8.4343E+05	1.1328E+06
3.10	6.6224E+05	8.6937E+05	1.1637E+06
3.15	6.8435E+05	8.9551E+05	1.1948E+06
3.20	7.0668E+05	9.2184E+05	1.2260E+06
3.25	7.2922E+05	9.4837E+05	1.2574E+06
3.30	7.5197E+05	9.7507E+05	1.2889E+06
3.35	7.7492E+05	1.0020E+06	1.3206E+06
3.40	7.9807E+05	1.0290E+06	1.3525E+06
3.45	8.2141E+05	1.0563E+06	1.3844E+06
3.50	8.4493E+05	1.0837E+06	1.4166E+06
3.55	8.6865E+05	1.1112E+06	1.4488E+06
3.60	8.9255E+05	1.1390E+06	1.4812E+06
3.65	9.1662E+05	1.1669E+06	1.5137E+06
3.70	9.4087E+05	1.1949E+06	1.5464E+06
3.75	9.6529E+05	1.2231E+06	1.5791E+06
3.80	9.8988E+05	1.2515E+06	1.6120E+06
3.85	1.0146E+06	1.2800E+06	1.6450E+06
3.90	1.0396E+06	1.3086E+06	1.6782E+06
3.95	1.0646E+06	1.3374E+06	1.7114E+06
4.00	1.0897E+06	1.3662E+06	1.7448E+06

Tabela C3 – Valor de b_0 em função de α_0 e p_0 (Continuação)

α_0	p_0		
	0.95	0.90	0.80
5.05	1.6515E+06	2.0015E+06	2.4679E+06
5.10	1.6795E+06	2.0329E+06	2.5033E+06
5.15	1.7077E+06	2.0644E+06	2.5387E+06
5.20	1.7360E+06	2.0960E+06	2.5742E+06
5.25	1.7644E+06	2.1277E+06	2.6098E+06
5.30	1.7929E+06	2.1594E+06	2.6455E+06
5.35	1.8215E+06	2.1913E+06	2.6813E+06
5.40	1.8502E+06	2.2232E+06	2.7171E+06
5.45	1.8790E+06	2.2553E+06	2.7529E+06
5.50	1.9079E+06	2.2874E+06	2.7889E+06
5.55	1.9369E+06	2.3196E+06	2.8249E+06
5.60	1.9659E+06	2.3519E+06	2.8610E+06
5.65	1.9951E+06	2.3843E+06	2.8971E+06
5.70	2.0244E+06	2.4167E+06	2.9333E+06
5.75	2.0538E+06	2.4492E+06	2.9696E+06
5.80	2.0832E+06	2.4818E+06	3.0060E+06
5.85	2.1128E+06	2.5145E+06	3.0423E+06
5.90	2.1424E+06	2.5473E+06	3.0788E+06
5.95	2.1721E+06	2.5801E+06	3.1153E+06
6.00	2.2019E+06	2.6130E+06	3.1519E+06
6.05	2.2318E+06	2.6460E+06	3.1885E+06
6.10	2.2617E+06	2.6790E+06	3.2252E+06
6.15	2.2918E+06	2.7122E+06	3.2620E+06
6.20	2.3219E+06	2.7454E+06	3.2988E+06
6.25	2.3521E+06	2.7786E+06	3.3356E+06
6.30	2.3824E+06	2.8119E+06	3.3726E+06
6.35	2.4128E+06	2.8453E+06	3.4095E+06
6.40	2.4433E+06	2.8788E+06	3.4465E+06
6.45	2.4738E+06	2.9123E+06	3.4836E+06
6.50	2.5044E+06	2.9459E+06	3.5208E+06
6.55	2.5351E+06	2.9796E+06	3.5579E+06
6.60	2.5658E+06	3.0133E+06	3.5952E+06
6.65	2.5966E+06	3.0471E+06	3.6324E+06
6.70	2.6275E+06	3.0810E+06	3.6698E+06
6.75	2.6585E+06	3.1149E+06	3.7072E+06
6.80	2.6895E+06	3.1488E+06	3.7446E+06
6.85	2.7206E+06	3.1829E+06	3.7821E+06
6.90	2.7518E+06	3.2170E+06	3.8196E+06
6.95	2.7831E+06	3.2511E+06	3.8572E+06
7.00	2.8144E+06	3.2852E+06	3.8948E+06

Tabela C3 – Valor de b_0 em função de α_0 e p_0 (Continuação)

α_0	p_0		
	0.95	0.90	0.80
8.05	3.4864E+06	4.0161E+06	4.6946E+06
8.10	3.5191E+06	4.0515E+06	4.7331E+06
8.15	3.5518E+06	4.0869E+06	4.7717E+06
8.20	3.5845E+06	4.1223E+06	4.8103E+06
8.25	3.6173E+06	4.1578E+06	4.8489E+06
8.30	3.6502E+06	4.1933E+06	4.8876E+06
8.35	3.6831E+06	4.2289E+06	4.9263E+06
8.40	3.7160E+06	4.2645E+06	4.9650E+06
8.45	3.7490E+06	4.3002E+06	5.0038E+06
8.50	3.7821E+06	4.3359E+06	5.0426E+06
8.55	3.8152E+06	4.3716E+06	5.0814E+06
8.60	3.8484E+06	4.4074E+06	5.1203E+06
8.65	3.8816E+06	4.4433E+06	5.1592E+06
8.70	3.9148E+06	4.4791E+06	5.1982E+06
8.75	3.9481E+06	4.5150E+06	5.2371E+06
8.80	3.9815E+06	4.5510E+06	5.2761E+06
8.85	4.0149E+06	4.5870E+06	5.3152E+06
8.90	4.0483E+06	4.6230E+06	5.3542E+06
8.95	4.0818E+06	4.6591E+06	5.3933E+06
9.00	4.1154E+06	4.6952E+06	5.4325E+06
9.05	4.1490E+06	4.7314E+06	5.4716E+06
9.10	4.1826E+06	4.7676E+06	5.5108E+06
9.15	4.2163E+06	4.8038E+06	5.5500E+06
9.20	4.2500E+06	4.8401E+06	5.5893E+06
9.25	4.2838E+06	4.8764E+06	5.6286E+06
9.30	4.3176E+06	4.9127E+06	5.6679E+06
9.35	4.3514E+06	4.9491E+06	5.7072E+06
9.40	4.3853E+06	4.9856E+06	5.7466E+06
9.45	4.4193E+06	5.0220E+06	5.7860E+06
9.50	4.4533E+06	5.0585E+06	5.8255E+06
9.55	4.4873E+06	5.0950E+06	5.8649E+06
9.60	4.5214E+06	5.1316E+06	5.9044E+06
9.65	4.5555E+06	5.1682E+06	5.9439E+06
9.70	4.5896E+06	5.2048E+06	5.9835E+06
9.75	4.6238E+06	5.2415E+06	6.0230E+06
9.80	4.6580E+06	5.2782E+06	6.0626E+06
9.85	4.6923E+06	5.3150E+06	6.1023E+06
9.90	4.7266E+06	5.3518E+06	6.1419E+06
9.95	4.7610E+06	5.3886E+06	6.1816E+06
10.00	4.7954E+06	5.4254E+06	6.2213E+06

Tabela C3 – Valor de b_0 em função de α_0 e p_0 (Continuação)

Fonte: (Martz & Waller, 1982)