

**EDUARDO CAMPOS PENNA**

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO RISCO DE  
DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**Florianópolis  
2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO RISCO DE  
DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**EDUARDO CAMPOS PENNA**

**Florianópolis, Dezembro de 2002**

# **METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO RISCO DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Eduardo Campos Penna

“Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de Concentração em Planejamento De Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina”

---

Prof. Edson Luiz da Silva, Dr. Eng.  
Orientador

---

Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.  
Coordenador Do Programa De Pós Graduação Em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. Edson Luiz da Silva, Dr. Eng.  
Orientador

---

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.  
Co-Orientador

---

Prof. Jorge Coelho, D.Sc.

Normalmente quase não se observa, porém o decorrer da existência foi feito para se agradecer.

A tudo e a todos que me fizeram e fazem entender isto e principalmente você Aymara, obrigado.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Edson Luiz da Silva , pela paciência na orientação e estímulo que com certeza possibilitaram a conclusão desta dissertação.

Ao co-orientador prof Hans Helmut Zürn, pelo estímulo, apoio e encorajamento durante nossas conversas.

Aos professores do Mestrado em Engenharia Elétrica da UFSC, pela bagagem de úteis conhecimentos transmitida ao longo do curso.

À ELETROBRÁS/PRODESPRO e ELETROSUL por terem propiciado a oportunidade de participar do curso de Mestrado.

A meus amigos e colegas por terem me agüentado com paciência ao longo deste período.

E finalmente à minha família por sua infinita paciência demonstrada comigo ao longo desta caminhada.

A meus pais que certamente se alegrariam muito.

**Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.**

## **METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO RISCO DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**Eduardo Campos Penna**

Dezembro / 2002

Orientador : Prof. Edson Luiz da SILVA, Dr. Eng.  
Co-Orientador: Prof : Hans Helmut Zürn, Ph.D.  
Área de Concentração : Planejamento De Sistemas de Energia Elétrica.  
Palavras-chave : Manutenção, Reestruturação do setor elétrico, linhas de alta-tensão, Penalidades das empresas Transmissoras, Correlações entre manutenção e desligamentos, coeficiente de Pearson, Sistema de Potência.  
Número de Páginas: 108

A reforma estrutural do setor elétrico teve como característica básica à implantação de livre concorrência na compra e venda de energia elétrica. Para isto ocorrer, foi indispensável promover a separação das atividades de geração transmissão e distribuição, processo chamado de desverticalização. Sob o novo paradigma os sistemas de transmissão e distribuição são vitais para o estabelecimento da livre concorrência entre as atividades de geração e comercialização. Desta forma as empresas transmissoras por exercerem atividades típicas de monopólio, ficam submetidas a um sistema de regulação técnica e econômica e passam, portanto a auferir de uma receita devida à prestação de seus serviços, ao mesmo tempo em que ficam sujeitas a penalidades por indisponibilidades de seus ativos. Neste contexto, as empresas transmissoras necessitam decidir o grau de intervenção de manutenção que deve ser feito em seus ativos, objetivando manter a indisponibilidade dos mesmos em níveis que possam ser justificadas pelos retornos esperados. Neste trabalho realiza-se uma análise preliminar do problema, buscando estabelecer as correlações existentes entre manutenções e desligamentos esperados. Os resultados obtidos permitem concluir que há uma correlação estatística razoável entre intervenções de manutenção e desligamentos, possibilitando, portanto identificar o risco de desligamento associado a uma determinada estratégia de manutenção. A metodologia foi aplicada a um conjunto de nove linhas de transmissão de 525 kV.

**Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.**

## **A METHODOLOGY TO MESURE THE OUTAGE RISK OF TRANSMISSION LINES**

**Eduardo Campos Penna**

December / 2002

Advisor : Edson Luiz da SILVA, D.SC.  
Co-supervisor : Hans Helmut Zürn, Ph.D.  
Area of Concentration : Electrical Energy Systems Planning.  
Keywords : Maintenance and outages correlation in EHV Transmission Lines, Electrical power system restructuring, Pearson Coefficient. Power System.  
Number of Pages : 108

The basic characteristic of the structural reform of the electrical sector has been the implementation of free competition of purchase and sale of electrical power. In order to allow such competition, it became necessary to promote the separation of the generation, transmission and distribution activities. Such process is called de-verticalization. Under the new paradigm, transmission and distribution systems are vital for the establishment of free competition between generation and commercialisation activities. Thus, transmission companies, due to the fact that they establish typical monopoly activities, are subjected to a technical and economical regulation system. They generate income by means of providing service and at the same time are likely to be penalized should their assets become unavailable. In such context, transmission companies need to define the degree of maintenance intervention to be performed in order to keep unavailability at justifiable levels. This paper portrays a preliminary analysis of the problem with the purpose of establishing existing correlations between expected outages and maintenance work. The results obtained lead us to conclude that there is a reasonable statistical relationship between maintenance and outage interventions, thus allowing the identification of outage risks related to a certain maintenance strategy. The methodology has been applied to a set of nine 525 kV transmission lines.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	xi
<b>LISTA DE TABELAS</b>	xii
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO</b>	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
<b>CAPÍTULO 2 A REESTRUTURAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO E A RECEITA DA EMPRESA TRANSMISSORA</b>	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 A REFORMA NO BRASIL	6
2.3 A ORGANIZAÇÃO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA	7
2.4 AS FUNÇÕES DOS AGENTES DE MERCADO	9
2.4.1 OS AGENTES DE PRODUÇÃO	9
2.4.2 OS AGENTES DE TRANSMISSÃO	9
2.4.3 OS AGENTES DE COMERCIALIZAÇÃO	10
2.4.4 O AGENTE DE OPERAÇÃO	10
2.4.5 O AGENTE PLANEJADOR	10
2.4.6 O AGENTE REGULADOR	11
2.5 A EMPRESA DE TRANSMISSÃO E OS CONTRATOS DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇO DE TRANSMISSÃO (CPST)	11
2.6 A RECEITA DAS EMPRESAS TRANSMISSORAS	12
<b>CAPÍTULO 3 A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E AS FERRAMENTAS UTILIZADAS</b>	15

3.1 DADOS UTILIZADOS E CONCEITOS BÁSICOS	15
3.2 A COLOCAÇÃO DO PROBLEMA	16
3.3 EXPERIMENTOS RANDOMICOS E ESPAÇOS AMOSTRAIS	19
3.4 EVENTOS E O CONCEITO PROBABILIDADE	19
3.4.1 O CONCEITO CLÁSSICO DE PROBABILIDADE	20
3.4.2 DEFINIÇÃO AXIOMÁTICA DE PROBABILIDADE	21
3.4.3 A ATRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	22
3.4.4 PROBABILIDADE CONDICIONAL	23
3.4.5 EVENTOS INDEPENDENTES E TEOREMA DE BAYES	24
3.5. VARIÁVEIS RANDÔMICAS	24
3.5.1 DEFINIÇÃO	24
3.5.2 DISTRIBUIÇÕES DISCRETAS DE PROBABILIDADE	24
3.5.3 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO PARA VARIÁVEIS RANDÔMICAS DISCRETAS	27
3.5.4 DISTRIBUIÇÕES CONJUNTAS	28
3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES	30
3.6.1 ESPERANÇA DE UMA VARIÁVEL RANDÔMICA DISRETA FINITA	32
3.6.2 MÉDIA E VALOR ESPERADO OU ESPERANÇA MATEMÁTICA	33
3.6.3 VARIÂNCIA E DESVIO PADRÃO	33
3.6.4 VARIÂNCIA E COVARIÂNCIA PARA DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA	35
3.7 CORRELAÇÃO ESTATÍSTICA	35
3.7.1 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON	36
3.7.2 QUÃO FORTE É UMA CORRELAÇÃO	38
3.7.3 VALIDAÇÃO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON	39
<b>CAPÍTULO 4 CORRELAÇÃO ENTRE MANUTENÇÃO E DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO</b>	41
4.1 INTRODUÇÃO	41
4.2 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES ENTRE OS DESLIGAMENTOS E AS INTEVENÇÕES DE MANUTENÇÃO REALIZADAS MENSALMENTE	42

4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS	43
4.4 AVALIAÇÃO DOS DESLIGAMENTOS ASSOCIADOS A UMA DADA CLASSE DE MANUTENÇÃO N	45
4.5 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 1 DE AGREGAÇÃO DE DADOS	46
4.6 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 2 DE AGREGAÇÃO DE DADOS	48
4.7 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 3 DE AGREGAÇÃO DE DADOS	49
4.8 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 4 DE AGREGAÇÃO DE DADOS	51
4.9 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 5 DE AGREGAÇÃO DE DADOS	52
4.10 SISTEMATIZAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	54
4.11 CONCLUSÃO	55
<b>CAPÍTULO 5 AVALIAÇÃO DO RISCO DE DESLIGAMENTO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DE MANUTENÇÃO</b>	57
5.1 INTRODUÇÃO	57
5.2 MATRIZES DE TRANSIÇÃO DE CLASSES	57
5.3 MATRIZ DE DESLIGAMENTO ASSOCIADA À MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE CLASSES DE MANUTENÇÃO	59
5.4 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO (MTR) DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	59
5.4.1 PROPRIEDADES DAS MATRIZES DE TRANSIÇÃO DE RISCO	61
5.5 CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	61
5.6 EXEMPLO DE MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE UMA LINHA	62
5.7 IMPLEMENTAÇÃO	68
5.8 CONCLUSÕES	68

<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES</b>	70
6.1 CONCLUSÕES	70
6.2 SUGESTÕES	72
<b>APÊNDICE A - RESULTADOS OBTIDOS DA AVALIAÇÃO DOS HISTÓRICOS DE OPERAÇÃO</b>	74
A.1.1 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT1	75
A.1.2 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT2	76
A.1.3 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT3	77
A.1.4 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT4	78
A.1.5 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT5	79
A.1.6 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT6	80
A.1.7 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT7	81
A.1.8 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT8	82
A.1.9 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT9	83
<b>APÊNDICE B - MATRIZES DE TRANSIÇÃO DE RISCO OBTIDAS</b>	84
<b>APÊNDICE C - VALORES CRÍTICOS DOS COEFICIENTES DE PEARSON DE ACORDO COM [6]</b>	90
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	91

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 RECEITA DAS EMPRESAS TRANSMISSORAS	12
FIGURA 2.2 RECEITA SIMPLIFICADA DE UMA EMPRESA TRANSMISSORA	13
FIGURA 3.1 DESLIGAMENTOS ESPERADOS ENTRE AS TRANSIÇÕES DOS EVENTOS DE MANUTENÇÃO	18
FIGURA 3.2 – PROBABILIDADE CONDICIONAL	23
FIGURA 3.3 EXEMPLOS DE VARIÁVEIS RANDÔMICAS	25
FIGURA 3.4 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO	28
FIGURA 3.5 DISTRIBUIÇÕES COM MESMA MÉDIA, PORÉM VARIÂNCIAS DIFERENTES	34
FIGURA 3.6 FORMAS DE CORRELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS RANDÔMICAS	38
FIGURA 5.1 TRANSIÇÕES POSSÍVEIS E TRANSIÇÕES OBSERVÁVEIS DE UMA LINHA	58
FIGURA – A.1 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT1	75
FIGURA – A.2 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT2	76
FIGURA – A.3 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT3	77
FIGURA – A.4 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT4	78
FIGURA – A.5 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT5	79
FIGURA – A.6 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 6	80
FIGURA – A.7 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT7	81
FIGURA – A.8 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT8	82
FIGURA – A.9 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 9	83

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 FORMA TÍPICA DAS TABELAS DE PROBABILIDADE CONJUNTA OU TABELA DE DECISÃO	29
TABELA 3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PEARSON SEGUNDO [15]	39
TABELA 4.1 COEFICIENTES DE PEARSON PARA MANUTENÇÕES E DESLIGAMENTOS OBSERVADOS NO MESMO MÊS	42
TABELA 4.2 TIPO 1 – DESLIGAMENTOS E MANUTENÇÃO VERIFICADOS MENSALMENTE	46
TABELA 4.3 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO 1	47
TABELA 4.4 TPO 2 – DESLIGAMENTOS OBTIDOS PELA MÉDIA BIMENSAL E MANUTENÇÃO APURADA MENSAL	48
TABELA 4.5 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO 2	48
TABELA 4.6 TIPO 3 – DESLIGAMENTOS VERIFICADOS NO MÊS SUBSE QUENTE AO BIMESTRE DE AVALIAÇÃO DAS MANUTENÇÕES	49
TABELA 4.7 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO 3	50
TABELA 4.8 TIPO 4 – DESLIGAMENTOS E MANUTENÇÃO AVALIADOS BIMESTRALMENTE	51
TABELA 4.9 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO 4	51
TABELA 4.10 TIPO 5 – DESLIGAMENTOS AVALIADOS MENSALMENTE E MANUTENÇÃO AVALIADA TRIMESTRALMENTE	52
TABELA 4.11 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO 5	53

TABELA 4.12 RESUMO DAS DIVERSAS FORMAS DE AVALIAÇÃO	55
TABELA 4.13 RESULTADOS CLASSES QUE JUNTAS ACUMULAM 95% DE TODAS AS MANUTENÇÕES	56
TABELA 5.1 MATRIZ DE DESLIGAMENTOS ASSOCIADO ÀS CLASSES DE MANUTENÇÃO DA LT1	63
TABELA 5.2 FREQUÊNCIA DAS CLASSES DE MANUTENÇÃO DA LT1	64
TABELA 5.3 DESLIGAMENTOS ASSOCIADOS A UMA DADA TRANSIÇÃO, PELA RESPECTIVA FREQUÊNCIA DA CLASSE DE MANUTENÇÃO DA MESMA TRANSIÇÃO	65
TABELA 5.4 PROBABILIDADES DESLIGAMENTOS / EVENTOS DE TRANSIÇÕES DE CLASSES DE MANUTENÇÃO	65
TABELA A.1 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT1	75
TABELA A.2 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT2	76
TABELA A.3 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT3	77
TABELA A. TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT4	78
TABELA A.5 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT5	79
TABELA A.6 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT6	80
TABELA A.7 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT7	81
TABELA A.8 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT8	82
TABELA A.9 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT9	83
TABELA B.1 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 1	85
TABELA B.2 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 2	86
TABELA B.3 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 3	86
TABELA B.4 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 4	87
TABELA B.5 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 5	87
TABELA B.6 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 6	88
TABELA B.7 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 7	88
TABELA B.8 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 8	89

TABELA B.9 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 9	89
TABELA C.1 VALORES CRÍTICOS DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON DE ACORDO COM [6]	90
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	92

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Nos sistemas de transmissão de energia elétrica, observa-se que desligamentos intempestivos acarretam geralmente prejuízo aos usuários e à própria empresa transmissora. É do conhecimento geral o desconforto e os prejuízos causados pela falta de energia elétrica.

Nos últimos anos o setor elétrico brasileiro foi submetido a amplas reformas e delas ficou definido entre muitas outras, que as prestadoras do serviço de transmissão passariam a dispor de uma receita pela prestação do citado serviço [4], [5]. Além disto enfatizou-se uma maior responsabilidade no atendimento dos usuários.

Por outro lado, para que a energia associada a um menor custo de geração consiga ser transportada até os pontos de consumo, torna-se imprescindível dispor de sistemas de transmissão eficientes. Sendo assim, é de suma importância garantir que os sistemas de transmissão operem dentro de padrões de qualidade pré-definidos, de modo a satisfazer as necessidades dos consumidores. Para isto, deve-se procurar manter a continuidade de funcionamento e disponibilidade dos elementos responsáveis pela transmissão (linhas, transformadores e subestações).

Atualmente, os serviços de transmissão no Brasil possuem uma característica de monopólio, sendo controlados por um agente regulador. Com o intuito de possibilitar o controle da disponibilidade associada aos elementos de transmissão, estabeleceram-se critérios técnicos e econômicos que devem ser respeitados pelas empresas prestadoras deste tipo de serviço. Saliente-se que os crité-

rios preconizados normalmente acarretam uma redução de receita da empresa transmissora, caso deixem de ser observados.

Observa-se que de uma maneira geral as indisponibilidades verificadas nos elementos de transmissão podem ser de natureza programada ou intempestiva (não programada) [1], [2], [3]. Nos dois casos, observa-se uma perda de receita da empresa transmissora, tendo em vista que as indisponibilidades sempre são taxadas.

Os desligamentos intempestivos possuem um caráter randômico. Em consequência disto, a receita passa a ser volátil (em decorrência da citada aleatoriedade). Em [16] e [17] apresentam-se os fundamentos de uma metodologia para avaliação da perda de receita de uma empresa transmissora, decorrente deste tipo de desligamento. Os desligamentos programados são previsíveis, e por consequência resultam numa perda de receita que pode ser avaliada.

As referências [21], [23], [24], [25], [26], [27] e [28], mostram que técnicas de risco certamente se incorporarão de forma cada vez mais presente nos processos de decisão das empresas transmissoras. Observa-se que conforme relatado em [27] e [28], modernas técnicas de gestão da manutenção são também cada vez mais utilizadas e necessárias na gestão das empresas transmissoras.

Adicionalmente, como referenciado em [28] e [22], as pressões dos agentes reguladores bem como as mudanças de mercado, farão com que as empresas transmissoras tenham que buscar uma alta disponibilidade de seus ativos.

Deste quadro é que se formula a questão desta dissertação, que tem por base a seguinte pergunta: é possível se construir uma função randômica que relacione manutenções e desligamentos? Caso esta função possa ser avaliada, será possível estimar um risco de desligamento associado a uma determinada transição entre os de eventos de manutenção realizados em um dado período?

Procurou-se responder à questão criando-se uma métrica (desligamentos esperados) baseada em técnicas de probabilidade e modelos estatísticos. Na realidade, avalia-se o risco esperado devido à transição de um dado evento de manutenção em um certo período, para um outro evento de manutenção no período seguinte.

Os resultados numéricos apresentados são decorrentes da análise de dados históricos da operação de um conjunto de linhas de transmissão de 525 KV, responsáveis por significativa parcela da receita de uma determinada empresa transmissora. No caso analisado, a parcela de receita advinda das linhas de 525 é de 41% da receita total, sendo que as mesmas representam 9% dos equipamentos da empresa.

## **2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

A dissertação ora apresentada é constituída por seis capítulos, descritos de maneira sucinta a seguir.

No presente capítulo, faz-se uma apresentação dos objetivos pretendidos com o estudo, observando através da referência bibliográfica recente, que pressões por contenção de custo e altas disponibilidades serão a regra geral para as empresas transmissoras.

No capítulo 2, apresenta-se uma resenha do atual funcionamento do setor elétrico no Brasil, mostrando a forma pela qual pode ocorrer a perda de receita de uma empresa transmissora.

No capítulo 3, formula-se o problema proposto explicitando o porquê de se buscar correlação entre manutenção e desligamento. Descrevem-se também os fundamentos das ferramentas utilizadas no desenvolvimento matemático do trabalho.

No capítulo 4, apresentam-se as correlações obtidas ao se analisar os eventos de manutenção e desligamento a partir dos históricos de operação. Propõem-se outras maneiras de se avaliar as correlações entre manutenção e desligamento, apresentando os resultados numéricos obtidos ao se adotar os procedimentos propostos.

No capítulo 5, mostra-se a forma de obter o risco esperado de desligamento ao se transitar de um determinado evento de manutenção em um dado período, para outro evento de manutenção no período seguinte.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões finais do trabalho.

## **CAPÍTULO 2**

# **A REESTRUTURAÇÃO DO SETOR E A RECEITA DAS TRANSMISSORAS**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

Baseado em [4] [5], pode-se dizer que as duas últimas décadas foram marcadas pela tendência de mudanças no setor elétrico mundial, de uma estrutura monopolista para uma estrutura de mercado.

Esta evolução consolidou a idéia da indústria de energia elétrica, onde o enfoque da obrigação de servir é substituído pelo enfoque de mercado. Passa a se ter um mercado de energia elétrica onde o grande elemento balizador para todos os que nele operam, é o preço. Apesar de não haver um consenso ou uma modelagem única que representasse esta forma de funcionamento, a reforma ocorreu rapidamente na maioria dos países.

A introdução da competição no mercado de energia elétrica independe do fato dos preços representarem ou não custos reais, e é à base da reestruturação setorial. O fato é que nisto tudo a energia elétrica passa a ser considerada como uma mercadoria e, como tal se busca adquirir preferencialmente a energia de menor preço.

Para que isso se tornasse possível, foi necessário fazer a separação do serviço de transmissão da energia da própria energia. Este processo é chamado de desverticalização e nele são separadas as etapas de geração, transmissão e distribuição. É também criado um novo serviço denominado comercialização de energia elétrica.

O processo de reestruturação [5] tem em linhas gerais os seguintes e principais objetivos:

- aumentar a eficiência do processo ao possibilitar melhores decisões de investimento;
- inserir competitividade no setor;
- criar melhores oportunidades de escolha para os consumidores;
- atrair capital privado.

## **2.2 A REFORMA NO BRASIL**

Conforme mostrado em [4], várias foram às tentativas de mudanças no sistema elétrico brasileiro, porém, a Lei das Concessões de Serviços Públicos nº 8987/95 aprovada em 13/02/1995 e posteriormente modificada por medida provisória e transformada na lei nº 9074/95 em 07/07/1995, pode ser considerada como o marco inicial da reestruturação do setor elétrico no país. Um fato curioso, digno de nota segundo [6], é que as citadas leis trazem em seu bojo preocupações de naturezas distintas, como energia elétrica, saneamento, serviços funerários, transportes de carga e de passageiros, comunicações, limpeza urbana e outros.

Conforme descrito em [4], uma série de mudanças institucionais foram implementadas com o intuito de viabilizar a reforma do setor elétrico, sendo que se , destacam:

- Lei nº 9427 de 31/11/1997 que, entre outros atos, criou a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, entidade responsável por todas as atividades regulatórias do setor de energia elétrica.
- Lei nº 9648 de 27/05/1998 que, entre diversos atos, reestruturou a E-LETROBRÁS, definiu que os contratos de compra e venda de energia serão realizados no âmbito de um Mercado Atacadista de Energia - MÃE, e que as atividades de coordenação e controle da operação, da

geração e transmissão de energia elétrica, nos sistemas interligados, serão executadas pelo Operador Nacional do Sistema - ONS.

- Resolução nº 142 de 10/06/1999, que vetou a atuação das empresas transmissoras de energia elétrica no segmento de comercialização e estabeleceu que a forma de remuneração destas empresas se dará por meio do conceito de receita permitida.
- Resolução nº 66 de 16/04/1999, onde a ANEEL definiu os equipamentos e as instalações pertencentes à rede básica que se constitui no conjunto de elementos pertencentes às empresas transmissoras.
- Celebração do Contrato de prestação de serviço de transmissão entre o ONS e as empresas transmissoras de energia elétrica.

Desta forma, pode-se considerar que os elementos acima mencionados constituem os principais marcos institucionais da reforma setorial.

### **2.3 A ORGANIZAÇÃO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Considerando [4],[5], observa-se que a principal característica da indústria de energia elétrica, pós-reestruturação, é a livre concorrência na compra e na venda da mercadoria energia elétrica. Para que isto ocorra, como visto anteriormente, é fundamental a desverticalização setorial onde as atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização se processem de forma independente, de modo a assegurar, tanto quanto possível, condições de concorrência perfeita.

As atividades de transmissão e de distribuição conforme já citado anteriormente, são consideradas como um monopólio natural. Este fato se caracteriza por uma situação na qual uma única empresa, apresenta uma configuração topo-

lógica ótima, ou quase ótima, para o atendimento de todas as necessidades de um dado serviço. Desta forma, estas empresas devem ser reguladas para atender os usuários com alto nível de confiabilidade associada a níveis pré-definidos de qualidade do serviço. Em concordância com [4] vê-se que não seria prático, ou econômico, o estabelecimento de concorrência nestas áreas.

A existência de um ambiente competitivo, tanto na geração como na comercialização, apresenta como necessidade básica que estes dois agentes tenham livre acesso ao sistema de transmissão e distribuição. Por outro lado, como se verifica para o bom funcionamento de qualquer mercado, o mercado de energia elétrica também vai requerer:

- eficiência econômica dos agentes como um todo;
- ser auto-sustentável, de forma a garantir sua expansão;
- operação dos serviços com confiabilidade e padrões de qualidade pré-definidos;
- não haver discriminação na prestação do serviço;
- busca da universalização do serviço.

Os fatores acima descritos, bem como a participação dos agentes de comercialização, geração, transmissão e distribuição, requerem a participação de outros agentes que podem ser assim discriminados:

- Operador independente do sistema;
- Operador de mercado;
- Regulador de mercado;
- Planejador do sistema.

No Brasil essas funções são desempenhadas pelos seguintes agentes, respectivamente:

- Operador nacional do sistema (ONS);
- Administrador do mercado atacadista de energia (ASMAE);
- Agência nacional de energia elétrica (ANEEL);
- Comitê coordenador do planejamento expansão dos sistemas elétricos (CCPE).

## **2.4 AS FUNÇÕES DOS AGENTES DE MERCADO**

A seguir são descritas sucintamente as funções dos seis grandes agentes existentes no mercado de energia elétrica, após a introdução da reforma do setor:

### **2.4.1 OS AGENTES DE PRODUÇÃO**

A função de produção é executada pelas empresas geradoras. A sua mais importante característica é a livre competição, não sendo uma atividade regulada. Em nosso país ela é desempenhada pelos geradores que pertenciam às antigas empresas de eletricidade desverticalizadas na reestruturação setorial, aos produtores independentes de energia e às usinas de cogeração.

### **2.4.2 OS AGENTES DE TRANSMISSÃO**

A função de transporte de energia elétrica é desempenhada pelos agentes de transmissão e distribuição. Esse segmento cumpre o papel fundamental de promover a eficiência econômica global da indústria de energia elétrica ao permitir, de forma irrestrita, o livre acesso a qualquer agente de mercado. O livre acesso permite que os geradores mais eficientes consigam escoar sua produção total. É desenvolvida pelas empresas transmissoras e distribuidoras.

### **2.4.3 OS AGENTES DE COMERCIALIZAÇÃO**

A função de comercialização de energia é executada pelos agentes de comercialização, sendo esta atividade desempenhada de forma independente ou associada a uma empresa de geração ou de distribuição. Cumpre lembrar que às transmissoras é vedada a operação de comercialização [Resolução nº 142 de 10/06/1999]. As operações de comercialização se dão através da celebração de contratos de compra e venda, firmados entre os consumidores e as comercializadoras.

### **2.4.4 O AGENTE DE OPERAÇÃO**

A função de operação do sistema é desempenhada por um único órgão, o ONS – Operador Nacional do Sistema, que tem a responsabilidade do planejamento eletro-energético, programação, despacho e operação, visando a operação ótima do sistema integrado. Este órgão é também o responsável pela contratação dos serviços essenciais à operação do sistema.

Em particular um destes contratos com as empresas transmissoras, Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão - CPST, define entre outras obrigações o modo como a empresa transmissora é penalizada pelo não cumprimento de seus pré-requisitos. Adicionalmente o ONS tem sido também o responsável pela definição de obras prioritárias de curto prazo (4 anos).

### **2.4.5 O AGENTE PLANEJADOR**

O Agente planejador é responsável pelos estudos de planejamento de expansão do sistema tendo por finalidade adequar a oferta de geração à necessidade de demanda. No Brasil, o planejamento da expansão é determinativo na transmissão e apenas indicativo na geração. É desempenhado pelo Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão - CCPE.

#### **2.4.6 O AGENTE REGULADOR**

O Agente regulador tem a função de regular o preço da energia elétrica para os consumidores cativos e para os serviços de transmissão, que possuem características de monopólio. É também de sua responsabilidade a definição dos padrões de qualidade a serem alcançados e de buscar a eficiência econômica da indústria de energia elétrica. Com o intuito de se atingir este último objetivo, utiliza-se de dois tipos de regulação: a regulação técnica e a regulação econômica [4].

A regulação econômica [4] considera basicamente os seguintes aspectos :

- critérios de expansão da geração, visando o atendimento da demandas de energia e potência do sistema;
- critérios de expansão da transmissão e distribuição;
- qualidade do fornecimento;
- qualidade dos serviços de transmissão.

Na regulação técnica [20] e [4], basicamente são tratados os seguintes aspectos:

- controle de preços dos serviços de transmissão e distribuição;
- controle de preços para os consumidores cativos;
- redução e eliminação da prática do poder de mercado e de subsídios cruzados;
- preservação do equilíbrio econômico-financeiro dos agentes.

#### **2.4 A EMPRESA DE TRANSMISSÃO E OS CONTRATOS DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇO DE TRANSMISSÃO (CPST)**

Nos contratos firmados entre o ONS e as empresas transmissoras, ficam

estabelecidas as responsabilidades a serem cumpridas pelas empresas. Nestes contratos são também definidos os elementos de propriedade da empresa transmissora, basicamente linhas, subestações e equipamentos associados. Fica estabelecida a forma de remuneração da empresa pela prestação de seus serviços de transmissão, através de uma receita anual permitida (RAP). Os CPST estabelecem também formas de penalidade a serem cumpridas pelas empresas transmissoras, no caso de indisponibilidade de elementos de transmissão. Esta forma de atuação, chamada de regulação da qualidade, que pune com a perda de receita as indisponibilidades, vai possibilitar um melhor controle da qualidade do serviço prestado.

As empresas transmissoras serão, daqui para frente e antes de tudo, empresas fornecedoras de disponibilidade, uma vez que a obtenção de altos índices de continuidade dos serviços será vital para garantir a manutenção da receita.

## 2.6 A RECEITA DAS EMPRESAS TRANSMISSORAS

A receita de uma empresa transmissora pode simplificada ser entendida conforme o diagrama de bloco apresentado na Figura 2.1 .

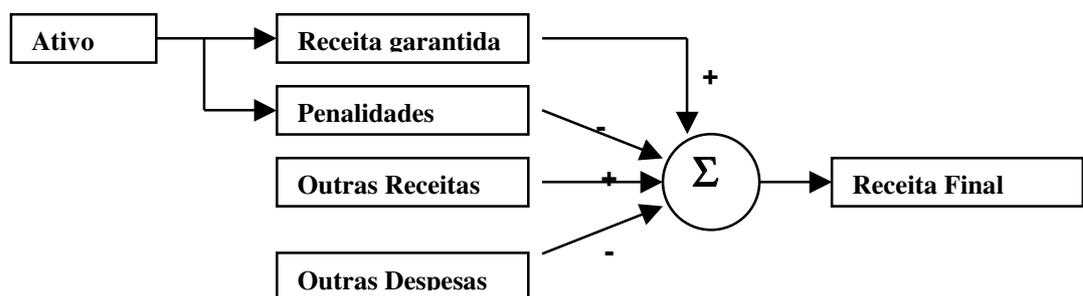


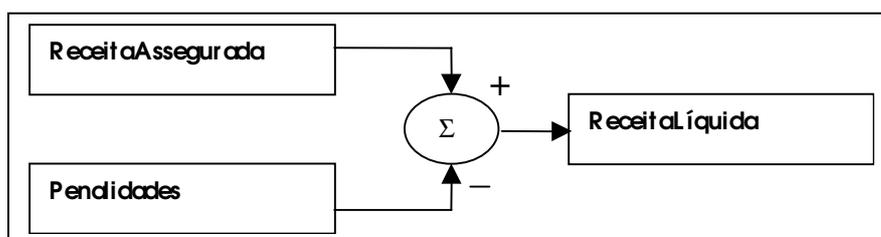
FIGURA 2.1 RECEITA DAS EMPRESAS TRANSMISSORAS

Com o intuito de simplificar esta análise, vamos considerar, sem perda de generalidade, apenas as parcelas associadas aos ativos, sendo que a sua formulação é dada por:

$$\text{Receita Líquida} = \text{Receita Assegurada} - \text{Penalidades} \quad (2.1) ,$$

- Receita Assegurada - receita anual definida no CPST ;
- Penalidade - é a perda de receita devido a desligamentos intempestivos e ou programados;
- Receita Líquida - valor real auferido pela empresa transmissora.

Desta forma, a receita líquida constitui-se no valor efetivo que a empresa auferirá pela prestação de seus serviços e a receita assegurada será a máxima receita que poderá estar disponível à ET. Isto é representado na Figura 2.2.



**FIGURA 2.2 RECEITA SIMPLIFICADA DE UMA EMPRESA TRANSMISSORA**

A receita assegurada é fixada no início da concessão, e cada um dos componentes de propriedade ou responsabilidade da empresa participa com um valor na composição total da referida receita. Assim, indisponibilidade de qualquer componente ao longo do tempo, acarreta um decréscimo na receita da ET. Neste sentido é que se reforça a idéia de que a empresa transmissora deve ser encarada sob a ótica de uma empresa geradora de disponibilidade de seus ativos. Isto, devido ao fato de que a sua receita é diretamente proporcional aos seus índices de disponibilidade e que o desligamento de um ativo, quer por indisponibilidade forçada quer por serviços de manutenção, vai implicar na diminuição de sua receita.

A penalidade imposta pelo agente regulador às ET, é dada por uma expressão do tipo:

$$\text{Penalidades} = K_o * \left( \sum_{i=1}^{\text{Saídas intempestivas}} (fpe_i/24 * D) * Dtf_i \right) + K_p * \left( \sum_{i=1}^{\text{Saídas programadas}} (fpe_i/24 * D) * Dtp_i \right) \quad (2.2)$$

Onde:

- $K_p$  - fator de penalidade para desligamento programado sendo igual à  $K_o/15$ ;
- $K_o$  - fator de penalidade para desligamento intempestivo ou forçado considerando-se até 5 horas depois de decorrido o 1º minuto de desligamento. O fator é reduzido a  $K_o/15$  após as 1ª 5 horas de desligamento;
- $fpe_i$  - valor monetário definido em base mensal no CPST, do  $i$ -ésimo elemento que tenha sofrido uma desconexão no período de avaliação da penalidade;
- $Dtp_i$  - intervalo de tempo no qual esteve fora de operação, por desligamento programado, o elemento  $i$ ;
- $Dtf_i$  - intervalo de tempo no qual não esteve em operação, por desligamento forçado, o elemento  $i$ ;
- $D$  - número de dias no mês considerado.

Dado um  $K_o = 150$  é fácil verificar da equação (2.2) que, para um mês típico de 30 dias, qualquer desligamento intempestivo de responsabilidade da empresa transmissora com duração superior a 4 horas e 48 minutos, acarretará a perda total da receita proporcionada pelo componente desligado. Da mesma forma se avalia que, em um mês típico de 30 dias, qualquer desligamento programado de responsabilidade da ET que dure mais de 48 horas, acarretará a perda total da receita proporcionada pelo componente desligado.

Uma proposta metodológica para a avaliação das penalidades, por desligamentos intempestivos, é descrita nas referências [16] e [17].

## **CAPÍTULO 3**

### **A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E AS FERRAMENTAS UTILIZADAS**

Este capítulo apresenta a formulação do problema tratado na dissertação e apresenta também as principais ferramentas utilizadas na construção da solução do mesmo. Ao longo do trabalho verifica-se que o problema é basicamente formulado através de variáveis randômicas discretas. Desta forma as definições aqui utilizadas restringiram-se a esta situação. Porém as definições e o formalismo necessário ao estudo de variáveis contínuas constam fartamente da bibliografia citada. Utilizou-se neste Capítulo de material referenciado em: [1], [2], [6], [7], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16] e [29].

#### **3.1 DADOS UTILIZADOS E CONCEITOS BÁSICOS**

Os dados utilizados foram obtidos de históricos cronológicos de observações verificadas no dia-a-dia da operação de linhas de transmissão de 500 KV de uma empresa transmissora. Para todos os componentes utilizados, os dados vão do início de sua energização até o último dia útil do ano 2000.

Na construção do modelo se considerou como desligamento, os intemppestivos e que afetam a receita da empresa transmissora. Os desligamentos intemppestivos impõem perda de receita à empresa transmissora, se a sua duração for superior a um minuto e inferior a 5 horas, estes tipos de desligamentos foram os considerados no tratamento dos dados. Por outro lado todas as manutenções não são classificadas em manutenções corretivas preventivas ou outras, pois os dados analisados assim não o permitem. Porém são eventos na qual melhorias ou gastos foram feitos nos componentes e conseqüentemente uma parcela da receita da empresa transmissora foi alocada nestes serviços.

### 3.2 A COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

Viu-se no Capítulo 2 que as empresas transmissoras passaram a auferir de uma receita garantida pela prestação dos seus serviços, porém passaram também a ter uma redução desta receita caso ocorra indisponibilidade nos seus componentes de transmissão, desta forma é imperioso um maior controle de receitas. Aliado a isso há também o fato de que as empresas transmissoras não são mais as responsáveis pela formulação de sua expansão. Este fato certamente impõe restrições ao crescimento da empresa, já que um aumento de receita só poderá acontecer por meio de concorrências ou outorgas feitas pelo agente regulador.

A confiabilidade associada aos projetos do setor elétrico é grande [3]. Certamente isto tem muito a haver com o modo de funcionamento proporcionado por um sistema verticalizado. É de se esperar que projetos com concepções seguras e conservativas, diminuam com as reformas impostas ao setor. Não significa que não tenha que se buscar níveis de desempenho elevado, já que as penalidades na receita conforme mostradas no capítulo anterior mostram, claramente esta necessidade. Porém com toda certeza atrasos de obras e melhorias que não ocorram com autorização de aumento de receita pelo agente regulador, serão postergadas ao máximo pelas empresas transmissoras. Evidentemente que isto será válido também para manutenções, que influenciam diretamente a receita da empresa.

Adicionalmente ao se analisar o primeiro contrato de prestação de serviço de uma empresa de transmissão se observa que, de um total de 135 elementos existentes e responsáveis pela receita garantida, apenas 13 elementos são responsáveis por 41% da receita. Portanto um pequeno número de elementos é responsável por significativa parcela da receita nesta empresa.

Portanto deverão se incorporados novos elementos à tomada de decisão no dia-a-dia das empresas, e uma das questões que se apresenta como de interesse é a de se buscar medir os benefícios de manutenção.

E é exatamente isto que se tenta mostrar nos Capítulos 4 e 5 da dissertação, sendo o problema expresso da seguinte forma:

- dado que se possui um histórico de operação onde estão retratados eventos de manutenção e eventos de desligamento intempestivos ocorridos ao longo da vida operativa dos elementos acima referidos, é possível se obter correlações estatísticas significativas entre manutenções e desligamentos, visando melhor atender o novo modelo de funcionamento do setor? Uma restrição a levantar quanto aos dados utilizados, é o fato de não se ter como segregar os diversos tipos de manutenção (i.é., qualquer intervenção de manutenção tem o mesmo significado neste trabalho, seja ela preventiva ou corretiva). Mas deve se levar em conta que tais eventos acarretaram gastos no equipamento.
- será possível se criar um modelo probabilístico que evidencie correlações estatísticas significativas entre eventos de manutenção e eventos de desligamento em linhas de transmissão de 525 KV de uma empresa transmissora?
- esta correlação é negativa, ou seja se aumentar um dos eventos diminui o outro?
- caso não seja possível obter a citada correlação entre manutenções e desligamentos, será possível construir uma métrica na qual se explicita uma eventual relação entre estas variáveis ?
- caso seja possível responder convenientemente à questão anterior, como construir uma nova função que forneça o valor esperado de desligamentos ao alterar-se o número de manutenções ? Ou seja, será possível a construção de um modelo que permita de alguma forma estimar

o número esperado de desligamentos ao se transitar de um dado número de eventos de manutenção para outro ?

Em linhas gerais isto é mostrado na dissertação, ou seja se constrói um modelo estocástico, que fornece uma estimativa da probabilidade esperada de desligamentos ao se transitar de um dado número de manutenções no presente para um outro número de manutenções no futuro. A Figura 3.1 ilustra a idéia apresentada.

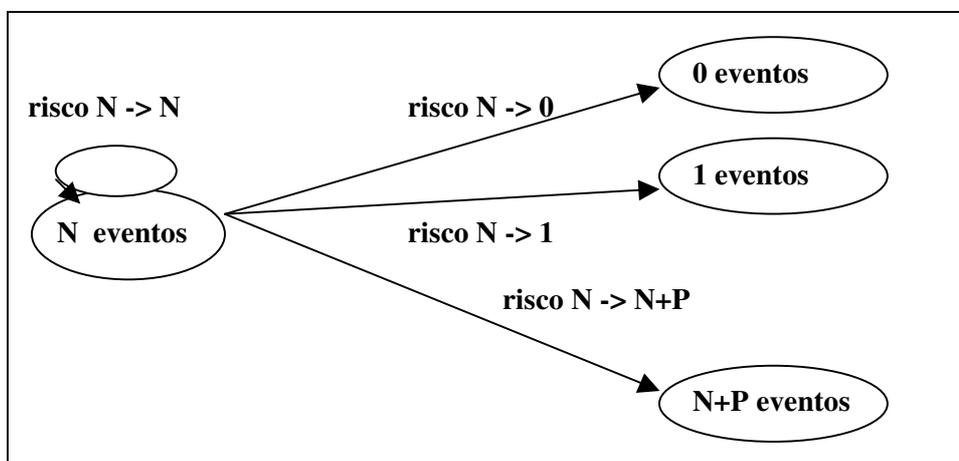


Figura 3.1 Desligamentos Esperados Entre As Transições Dos Eventos De Manutenção

Deste modo ao se conseguir modelar o impacto das manutenções pode-se verificar de forma mais precisa, o efeito da parcela variável devido à manutenção na receita da empresa. Conforme isto neste Capítulo, esta questão é específica de cada empresa dependendo bastante de custos precisos, não sendo tratadas aqui.

Para a construção do modelo, se utilizou intensivamente de conceitos de probabilidade e processos estocásticos, que passamos a conceituar a seguir.

### 3.3 EXPERIMENTOS RANDÔMICOS E ESPAÇOS AMOSTRAIS

Um importante conceito observado nos sistemas físicos é que ao se repetir experimentos em condições quase idênticas, consegue-se resultados que são essencialmente os mesmos. Desta forma ao medirmos a corrente que passa por um resistor de  $5k\Omega$  submetido a uma fonte de 5 V DC, obteremos corrente próximas a 1mA. Porém existem experimentos nos quais os resultados não são essencialmente os mesmos, ainda que as condições iniciais o sejam. Tais experimentos serão designados por experimentos randômicos. Um exemplo típico é o lançamento de um dado honesto a partir de uma altura fixa sobre uma mesa, o resultado poderá ser qualquer um número no conjunto  $\{1,2,3,4,5,6\}$ . Apesar das condições de realização do resultado serem essencialmente as mesmas, os resultados são totalmente distintos.

Ao conjunto  $\Lambda$  que consiste de todos os resultados possíveis de um experimento randômico, se denomina espaço amostral, e cada saída é chamada de ponto amostrado. Freqüentemente mais de um conjunto pode descrever o resultado de um experimento randômico, porém normalmente apenas um fornece o maior número de informações. Deve-se notar da definição acima que  $\Lambda$  é o conjunto universal. Se  $\Lambda$  possui um número finito de elementos, ele é chamado de espaço amostral finito ou contável. Se  $\Lambda$  possui tantos números quanto os existentes no conjunto dos naturais, ele é chamado de espaço amostral infinitamente contável. Se  $\Lambda$  possui tantos números quanto os existentes em um subconjunto limitado e contínuo por exemplo  $\{x \mid 0 \leq x \leq 1\}$  ele é chamado de espaço amostral infinito incontável. Um espaço amostral que é finito ou contável ou infinitamente contável ele é dito espaço amostral discreto.

### 3.4 EVENTOS E O CONCEITO DE PROBABILIDADE

Um evento é um subconjunto  $\Omega$  de um espaço amostral, isto é, um conjunto de possíveis resultados de um dado experimento. Um conjunto que consiste de

um único ponto de  $\Omega$  é chamado de um evento simples ou evento elementar. No histórico de dados avaliado na dissertação, um evento de manutenção é uma descrição da qual se pode concluir sobre a ocorrência de uma manutenção. Da mesma forma um evento de desligamento é um aparecimento no histórico da descrição de uma ocorrência de um desligamento com um tempo superior a 1 minuto.

Em todo experimento randômico sempre haverá uma incerteza sobre a ocorrência ou não do resultado de um determinado evento. Uma maneira de avaliar a incerteza do resultado de um determinado experimento, é se atribuir um número entre zero (0) e um (1) ao resultado.

Ao se considerar que o evento vai ocorrer diz-se que sua probabilidade é um (1) ou cem por cento (100%). Se existir a certeza de que o evento não vai acontecer diz-se que a sua probabilidade é zero (0) ou zero por cento (0%). Se a chance de ocorrência de um dado evento for de quarenta por cento (40%) a chance de não ocorrência será de sessenta por cento (60%).

### 3.4.1 O CONCEITO CLÁSSICO DE PROBABILIDADE

Classicamente se consideram duas definições através dos quais se pode estimar a probabilidade de um evento.

- Método clássico:

se um evento pode ocorrer em  $h$  saídas de um total de  $n$  possíveis experimentos, todos com igual chance, a probabilidade deste evento é dada por:

$$p = h / n \quad (3.1).$$

- Método da frequência :  
se após repetirmos um experimento  $n$  vezes onde  $n$  é grande, observam-se  $h$  vezes o aparecimento de um dado resultado  $a$  (evento) a probabilidade do evento  $a$  é dada por:

$$p = h / n \quad (3.2).$$

Esta definição é também chamada de probabilidade empírica de um evento.

### 3.4.2 DEFINIÇÃO AXIOMÁTICA DE PROBABILIDADE

As definições anteriores carecem de precisão quando descreve os conceitos expressos por:

- de iguais chances de ocorrência;
- $n$  é grande,

que ocorrem respectivamente nas definições clássicas e no método de frequência. Isso levou à construção de uma definição axiomática de probabilidade totalmente baseada na teoria dos conjuntos.

Suponha  $\Lambda$  um espaço amostral. Se  $\Lambda$  é discreto todo o subconjunto é de eventos e vice-versa. Porém se  $\Lambda$  for contínuo, apenas alguns de seus subconjuntos são eventos. Seja  $C$  a classe dos eventos. Se para cada evento  $A$  em  $C$  se associa um número real  $P(A)$ , onde  $P$  é uma Função real definida em  $C$ .  $P$  é chamada de Função de probabilidade,  $P(A)$  é a probabilidade do evento  $A$ , se os seguintes axiomas forem satisfeitos:

- Axioma 1 - para qualquer evento  $A \in C$ ,  $P(A) \geq 0$  (3.3);

- Axioma 2 - para a certeza na classe C,  $P(A)=1$  (3.4);
- Axioma 3 - para qualquer número de eventos mutuamente exclusivos  $A_1, A_2, \dots, A_n$  pertencentes a C tem-se :

$$P(A_1 \cup A_2 \dots \cup A_n) = P(A) = \sum_{j=1}^n P(A_j) \quad (3.5)$$

A partir dos axiomas acima podem ser demonstrados os seguintes teoremas:

- se  $A_1 \subset A_2$  então:
  - $P(A_1) \leq P(A_2)$  (3.6.0) ;
  - $P(A_1 - A_2) = P(A_1) - P(A_2)$  (3.6.1) ;
- para todo A :  $0 \leq P(A) \leq 1$  (3.7);
- $P(\emptyset) = 0$  (3.8);
- sendo  $A'$  o complemento de A :  $P(A') = 1 - P(A)$  (3.9);
- se  $A = A_1 \cup A_2 \dots \cup A_n$  e os eventos são exclusivos então :
  - $P(A) = \sum P(A_i)$  (3.10)

### 3.4.3 A ATRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE

Se um dado espaço amostral  $\Lambda$  é constituído somente pelos eventos elementares  $A_1, A_2, \dots, A_n$  então:

$$P(A) = \sum P(A_i) = 1 \quad (3.11).$$

Segue daí que se pode atribuir qualquer número não negativo para as probabilidades dos eventos elementares desde que a equação (3.11) seja satisfeita.

Particularmente se todos os eventos elementares tiverem a mesma probabilidade, então :

$$P(A_k) = 1/n \quad (3.12)$$

Então, se B é um evento no qual se detectou h ocorrências do mesmo, tem-se:

$$P(B) = h/n \quad (3.13)$$

Isto é equivalente à definição clássica de probabilidade dada pela equação (3.1), e a possibilidade de se atribuir probabilidade conforme mostrada acima permite a construção de modelos matemáticos, nas quais a validade ou sucesso pode ser testado por meio de experimentos tal como feito com experiências físicas.

#### 3.4.4 PROBABILIDADE CONDICIONAL

Sejam A e B dois eventos para os quais  $P(A) \geq 0$ . Representa-se por  $P(B|A)$ , a probabilidade do evento B ocorrer dado que o evento A ocorreu. Como A por hipótese ocorreu, ele é evidentemente o espaço amostral, e desta forma:

$$P(B|A) = P(A \cap B) / P(A) \quad (3.14)$$

e,

$$P(A \cap B) = P(B|A) * P(A) \quad (3.15)$$

Isto é mostrado na forma de diagrama de Venn da Figura 3.2.

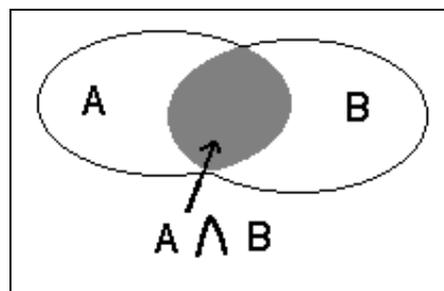


Figura 3.2 – Probabilidade Condicional

Pode-se mostrar que a probabilidade condicional satisfaz a todos os axiomas de probabilidades descritas em (3.4.2)

### 3.4.5 EVENTOS INDEPENDENTES E TEOREMA DE BAYES

Se a ocorrência de B não é afetada pelas ocorrências ou não ocorrências do evento A, se diz que os eventos A e B são exclusivos. E a equação (3.14) fica dada por:

$$P(B|A) = P(B) \quad (3.16),$$

sendo isto é equivalente a:

$$P(B|A) = P(A) * P(B) \quad (3.17)$$

O teorema de Bayes estabelece que se um espaço amostral A é constituído pelos eventos  $A_1, A_2, \dots, A_n$  disjuntos e  $A = A_1 \cup A_2 \dots \cup A_n$  então:

$$P(A_k | E) = \frac{P(A_k)P(E | A_k)}{P(A_1)P(E | A_1) + P(A_2)P(E | A_2) + \dots + P(A_n)P(E | A_n)} \quad (3.18)$$

Ao se pensar que os eventos  $A_1, A_2, \dots, A_n$  podem ser causas possíveis do evento E, o teorema de Bayes permite se calcular a probabilidade de ocorrência de um qualquer evento  $A_k$  dado que o evento E ocorreu.

## 3.5. VARIÁVEIS RANDÔMICAS

É um conceito fundamental ao trabalho, os principais tópicos são descritos a seguir.

### 3.5.1 DEFINIÇÃO

Considere um experimento randômico em um espaço amostral S. Uma va

riável randômica  $X=X(\zeta)$  é uma função real que associa o número real, dito o valor de  $X(\zeta)$ , a cada evento  $\zeta$  do espaço amostral  $S$ . A terminologia aqui adotada, é a consagrada pela literatura. Porém deve-se ter em mente que uma variável randômica, é em realidade uma função, não possuindo o sentido habitual atribuído a variáveis em estudos de outras áreas de matemática.

O espaço amostral  $S$  é denominado domínio da variável randômica, e o conjunto de todos os valores de  $X(\zeta)$  é denominado contradomínio da variável randômica.. Da definição de função segue que é possível se ter dois ou mais valores pertencentes ao domínio de  $S$ , que possuam o mesmo valor no contradomínio da variável randômica. Isto significa afirmar que um ou mais eventos podem ter a mesma probabilidade de ocorrência. Contudo não se pode ter dois valores diferentes no contradomínio associados a um único valor no domínio da variável randômica. . Isto significa afirmar que a ocorrência de um evento não pode se dar com mais de um valor de probabilidade. A Figura 3.3 ilustra o referido conceito.

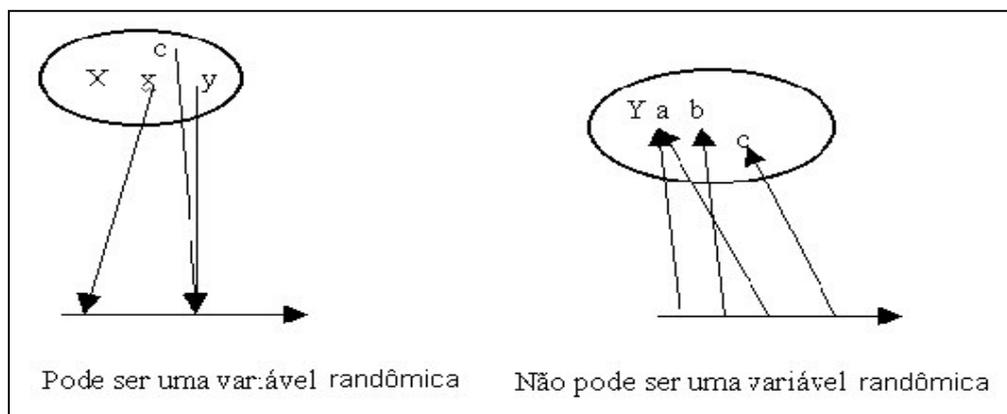


Figura 3.3 Exemplos de Variáveis Randômicas

### 3.5.2 DISTRIBUIÇÕES DISCRETAS DE PROBABILIDADE

Ao se avaliar o comportamento de populações, geralmente não se pode acessar todos os elementos das mesmas por que:

- ou as populações são muito grandes para serem medidas;
- ou a população é muita espalhada;
- ou as populações são hipotéticas e elaboradas por modelos.

As amostras da população permitem que se construam modelos que mostram como a população geradora da amostra se distribui. É este o papel desempenhado pelas distribuições de probabilidade, representar modelos teóricos de distribuições de uma dada população. Distribuições discretas de probabilidade são portanto modelos teóricos das distribuições relativas de freqüência de uma variável randômica discreta.

Seja  $X$ , uma variável randômica discreta, e suponha os valores por ela assumidos estejam arranjados de forma ordenada e crescente. Suponha que esses valores estão associados com probabilidades dadas por:

$$P(X = x_k) = f(x_k), \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (3.19)$$

O conceito de função de probabilidade, também conhecido como distribuição de probabilidade, é dado por :

$$P(X = x) = f(x) \quad (3.20)$$

Para  $x = x_k$  a função de probabilidade se reduz a (3.19) enquanto que para outros valores  $f(x) = 0$ .

A função  $f(x)$  é uma função de probabilidade se:

$$f(x) \geq 0 \quad (3.21)$$

$$\sum_x f(x) = 1 \quad (3.22)$$

Onde o somatório mostrado, significa que o mesmo é feito sobre todos os valores possíveis de X.

### 3.5.3 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO PARA VARIÁVEIS RANDÔMICA DISCRETAS

A função de distribuição, ou função acumulada de distribuição para uma variável randômica X é definida por:

$$F(x) = P(X \leq x) \tag{3.23}$$

onde x é qualquer número real definido no intervalo  $-\infty \leq x \leq \infty$ . A função de distribuição pode ser obtida da função de probabilidade, notando-se que:

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_y f(y) \tag{3.24}$$

onde o somatório  $\sum_y$  é feito com todos os valores para os quais  $y \leq x$ .

Se X assume valores apenas em um conjunto finito de valores  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a função de distribuição é dada por:

$$F(x) = \begin{matrix} 0 & ; -\infty \leq x \leq x_1; \\ f(x_1) & ; x_1 \leq x \leq x_2; \\ f(x_1)+f(x_2) & ; x_2 \leq x \leq x_3; \\ f(x_1)+f(x_2) + f(x_3) & ; x_3 \leq x \leq x_4; \\ \dots\dots & \\ \dots\dots & \\ f(x_1)+f(x_2) + \dots+f(x_n) & ; x_n \leq x \leq \infty ; \end{matrix} \tag{3.25}$$

$$\text{Adicionalmente, } f(x_1)+f(x_2) + \dots+f(x_n) = \sum f(x_i) = 1 \tag{3.26}$$

A forma típica de uma função de distribuição é mostrada na Figura 3.4.

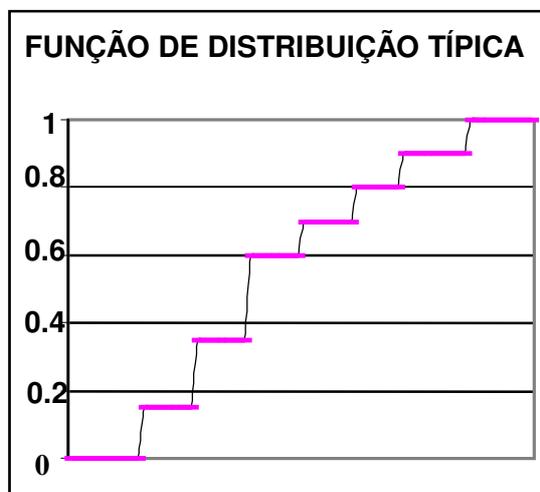


Figura 3.4 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO TÍPICA

Alguns aspectos importantes da função de distribuição são:

- a função de probabilidade pode ser obtida a partir dela, bastando que nas descontinuidades observadas seja subtraído do maior valor o menor valor;
- é uma função monotonamente crescente.

### 3.5.4 DISTRIBUIÇÕES CONJUNTAS

Este conceito é intensivamente utilizado na dissertação, quando da formulação das matrizes de transição de desligamento, sendo uma generalização de 3.5.3.

Se  $X$  e  $Y$  são duas variáveis randômicas discretas, definimos a função de probabilidade conjunta de  $X$  e  $Y$  pela seguinte função:

$$P(X=x, Y=y) = f(x, y) \tag{3.27}$$

$$f(x, y) \geq 0 \tag{3.28}$$

$$\sum_x \sum_y f(x, y) = 1 \tag{3.29}$$

Na equação (3.29) os somatórios são realizados sobre todos os valores possíveis das variáveis x e y e estes somatórios valem um (1).

Suponha que X possa assumir qualquer um dos m valores  $x_1, x_2, \dots, x_m$  e que Y possa assumir qualquer um dos n valores  $y_1, y_2, \dots, y_n$ . Então a probabilidade de um evento tal que  $X = x_j$  e  $Y = y_k$  é dada por:

$$P(X = x_j, Y = y_k) = f(x_j, y_k) \tag{3.30}$$

Uma função de probabilidade conjunta para as variáveis randômicas X e Y, pode ser representada por tabela de probabilidade conjunta ou tabela de decisão do tipo mostrado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** Forma típica das tabelas de probabilidade conjunta ou tabela de decisão

	$y_1$	$y_2$	...	$y_m$	Totais ↓
$x_1$	$f(x_1, y_1)$	$f(x_1, y_2)$	...	$f(x_1, y_m)$	$f_1(x_1)$
$x_2$	$f(x_2, y_1)$	$f(x_2, y_2)$	...	$f(x_2, y_m)$	$f_1(x_2)$
....	....	....	....	....	....
....	....	....	....	....	....
$x_m$	$f(x_m, y_1)$	$f(x_m, y_2)$	...	$f(x_m, y_m)$	$f_1(x_m)$
Totais ⇒	$f_2(y_1)$	$f_2(y_2)$		$f_2(y_m)$	1

Grande total ↑

Logo :

$$P(X = x_i) = f_1(x_i) = \sum_k f(x_i, y_k) \quad (3.31),$$

ou seja é a soma dos elementos da linha  $i$  da tabela de decisão.

Da mesma forma :

$$P(Y = y_i) = f_2(y_i) = \sum_k f(x_k, y_i) \quad (3.32),$$

ou seja é a soma dos elementos da coluna  $i$  da tabela de decisão.

Por outro lado :

$$\sum_{i=1}^m f_1(x_i) = 1 \quad (3.33) \text{ e,}$$

$$\sum_{i=1}^n f_2(y_i) = 1 \quad (3.34) \text{ e,}$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n f(x_j, y_k) = 1 \quad (3.35)$$

As expressões (3.31) e (3.32) recebem a designação de probabilidade marginal.

No capítulo 5 os conceitos de distribuição conjunta e probabilidade marginal aqui apresentados, são fundamentalmente a base da construção dos desligamentos esperados ao se transitar de um dado número de manutenções para outro.

### 3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES

Basicamente a caracterização de resultados de dados experimentais de

medidas é feita estatisticamente ou por meio de uma análise dita paramétrica, ou por meio de uma análise dita não paramétrica.

Na primeira forma, análise paramétrica, são feitos teste de hipóteses sobre os parâmetros associados à população considerando que a mesma possui uma dada distribuição. Na segunda forma, análise não paramétrica, se testam hipóteses sobre a distribuição da população ao invés de parâmetros da mesma. Cumpre ressaltar que algumas técnicas não paramétricas, inclusive independem de considerações sobre as distribuições da população da qual se amostram dados.

Basicamente a técnica não paramétrica consiste de um teste de hipótese, onde se utilizam duas hipóteses :

- a hipótese nula  $H_0$  é a hipótese sobre a qual se deve conseguir evidências para se rejeitar;
- a hipótese alternativa  $H_1$  é a hipótese sobre a qual se deve conseguir evidências para se aceitar.

A hipótese nula e a hipótese alternativa descrevem dois estados possíveis, porém mutuamente exclusivos, desta forma as duas hipóteses não podem ser aceitas ou rejeitadas simultaneamente.

Adicionalmente:

- a hipótese  $H_0$ , é o conceito aceito até que se tenha evidência de que o mesmo não é correto.  $H_0$  é o conceito inicial do teste de hipóteses;
- a hipótese  $H_1$ , somente será aceita se surgirem evidências de

que  $H_0$  não é mais correto;

- aceitar  $H_1$  é uma idéia mais forte do que aceitar  $H_0$ , pois foi necessário se obter evidências para validá-la enquanto que  $H_0$  foi aceita como uma premissa.

Nesta dissertação será suposto que :

- $H_0$  – admite que as duas variáveis (desligamentos e manutenções) são independentes;
- $H_1$  – admite que as duas variáveis não são independentes.

De [6], [7], [9], [10], verifica-se que a validação ou rejeição de  $H_0$  ou aceitação de  $H_1$  se dá através de testes baseados nas distribuições qui quadrado.

Na dissertação usou-se de recursos das duas técnicas. Conceitos extraídos da análise paramétrica são utilizados para se criar a metodologia, utilizando-se a avaliação das correlações através do coeficiente de correlação de Pearson,. Por outro lado conceitos extraídos da análise não paramétrica são utilizados para mostrar que a hipótese de se negar à relação obtida entre manutenções e desligamento com a metodologia proposta, implicam na comprovação de sua relação.

### 3.6.1 ESPERANÇA DE UMA VARIÁVEL DISCRETA RANDÔMICA FINITA

Suponha que  $X$  seja uma variável randômica única com uma distribuição de probabilidade expressa por :

$$\begin{array}{cccccc}
 x & x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \\
 f(x) & f(x_1) & f(x_2) & f(x_3) & \dots & f(x_n)
 \end{array} \quad (3.35)$$

Define-se  $E(X)$  como a esperança matemática ou valor esperado  $X$  a expressão seguinte:

$$E(X) = x_1 * f(x_1) + x_2 * f(x_2) + \dots + x_n * f(x_n) = \sum_{i=1}^n x_i f(x_i) \quad (3.36)$$

Se  $x_i$  são resultados possíveis de um dado experimento randômico,  $E(X)$  é o valor mais provável que deve ser obtido como resultado de um novo experimento. Um caso particular desta definição é dada em 3.6.2.

### 3.6.2 MÉDIA E VALOR ESPERADO OU ESPERANÇA MATEMÁTICA.

Suponha que  $X$  seja uma variável randômica em um espaço amostral equiprovável  $S = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ . A variável randômica  $X$  associa valor  $x_i$  ao evento  $a_i$  e todos  $x_i$  são diferentes. Desta forma todos  $x_i$  ocorrem com a mesma probabilidade  $p_i = 1/n$ , e se tem:

$$E(X) = x_1 * \frac{1}{n} + x_2 * \frac{1}{n} + \dots + x_n * \frac{1}{n} = \sum_{i=1}^n x_i * \frac{1}{n} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.37)$$

A expressão acima é denominada média da variável randômica  $X$  e representada por  $\mu$ . O valor esperado da variável  $X$  é também expresso por:

$$\mu_x = \mu = E(X) \quad (3.38)$$

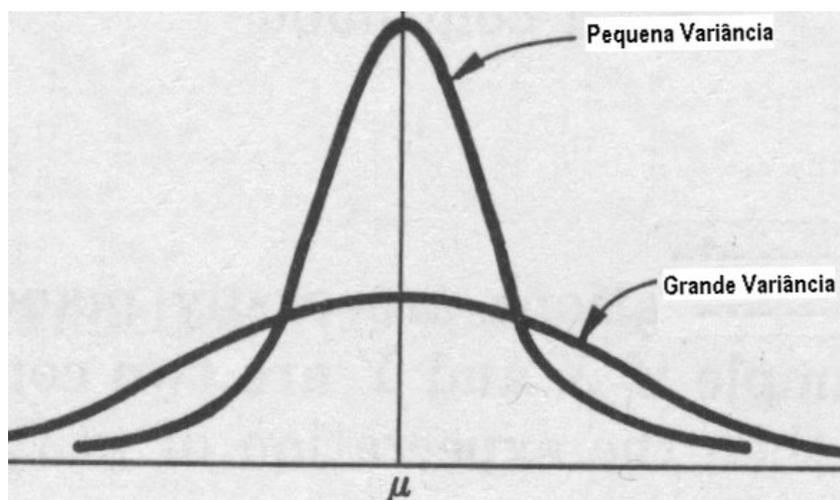
A média é um importante parâmetro na caracterização de inúmeras distribuições.

### 3.6.3 VARIÂNCIA E DESVIO PADRÃO

Em todo sentido, a média de uma variável randômica mede a posição

do ponto médio da distribuição. Porém os dados podem se dispersar muito ao redor desse valor médio.

A Figura 3.5 apresenta duas distribuições com a mesma média, porém formas bem distintas devido às suas diferentes variâncias.



**Figura 3.5** Distribuições Com Mesma Média Porém Variâncias Diferentes

Considere a variável randômica  $X$ , definida por sua distribuição de probabilidade descrita em (3.35). A variância da variável discreta  $X$  é definida pela seguinte expressão

$$\text{Var}(X) = E(X^2) = \sum (x_i - \mu)^2 \cdot f(x_i) \quad (3.38)$$

O desvio padrão da variável randômica  $X$ , é definido pela raiz quadrada positiva da variância, e representado por  $\sigma_X$ . Logo:

$$\sigma_X = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (3.39)$$

Obviamente que :

$$\text{Var}(X) = (\sigma_X)^2 \quad (3.40)$$

### 3.6.4 VARIÂNCIA E COVARIÂNCIA PARA DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA

Sejam  $X$  e  $Y$  duas variáveis randômicas discretas com função de densidade conjunta  $f(x,y)$ , a média e a esperança de  $X$  e  $Y$  são definidas pelas seguintes expressões :

$$\hat{i}_X = \sum_x \sum_y x f(x, y) \quad (3.4.1)$$

$$\hat{i}_Y = \sum_x \sum_y y f(x, y) \quad (3.42)$$

A covariância das variáveis  $X$  e  $Y$  é definida pela seguinte expressão:

$$\text{Cov}(X, Y) = \sum_x \sum_y (\hat{i}_X - x)(\hat{i}_Y - y) f(x, y) \quad (3.43)$$

Os somatórios acima são realizados sobre todos os valores discretos de  $x$  e  $y$ .

### 3.7 CORRELAÇÃO ESTATÍSTICA

As avaliações de correlação entre variáveis tentam mostrar se existe uma relação funcional entre variáveis, ainda que não se consiga modelar isto por meio de uma fórmula simples ou fechada. Avalia-se, portanto, se alterações em uma variável acarretam alterações em outra variável e se mede o acoplamento entre estas variações.

Este conceito é exhaustivamente utilizado no capítulo 4, sendo que o mesmo é que permite construir a medida entre as relações dos eventos de manutenção e eventos de desligamento.

Em análises de correlação se avalia o parâmetro  $\rho$  (rho) que recebe o nome de coeficiente de correlação, e é uma medida da associação entre duas variáveis  $X$  e  $Y$  da população. Este parâmetro permite avaliar o quanto que uma mudança detectada em uma variável afeta a mudança em uma outra variável.

### 3.7.1 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Devido a seu consagrado uso, o coeficiente de correlação de Pearson é um dos métodos mais comuns para se avaliar correlação entre duas variáveis. É também chamado de coeficiente de correlação do produto momento de Pearson.

Ele foi criado pelo matemático inglês Karl Pearson (1857 - 1936), baseando-se nos conceitos abaixo descritos.

Inicialmente será mostrado que:

$$\sigma_{XY} = E(XY) - E(X)E(Y) = E(XY) - \mu_X\mu_Y \quad (3.44)$$

Da definição de covariância tem-se :

$$\begin{aligned} \sigma_{XY} &= \text{Cov}(X,Y) = E((X - \mu_X)(Y - \mu_Y)) = \\ &= E(XY - X\mu_Y - Y\mu_X + \mu_X\mu_Y) = \\ &= E(XY) - \mu_Y E(X) - \mu_X E(Y) + E(\mu_X\mu_Y) = \\ &= E(XY) - \mu_Y\mu_X - \mu_X\mu_Y - \mu_X\mu_Y = \\ &= E(XY) - \mu_X\mu_Y = E(XY) - E(X)E(Y). \end{aligned}$$

Desta forma mostra-se a equação (3.44)

Algumas considerações adicionais se fazem necessárias a fim de tornar claro o significado do coeficiente de correlação de Pearson, como são expressas a seguir.

Se duas variáveis  $X$  e  $Y$  são estatisticamente independentes então :

$$\text{Cov}(X,Y) = 0 \quad (3.45) ,$$

isto porque se  $X$  e  $Y$  são independentes então :

$$E(XY) = E(X) E(Y) \quad (3.46),$$

levando-se isto na equação (3.44) tem-se que :

$$\sigma_{XY} = \text{Cov}(X,Y) = 0 \quad (3.47),$$

Se  $X$  e  $Y$  são totalmente dependentes :

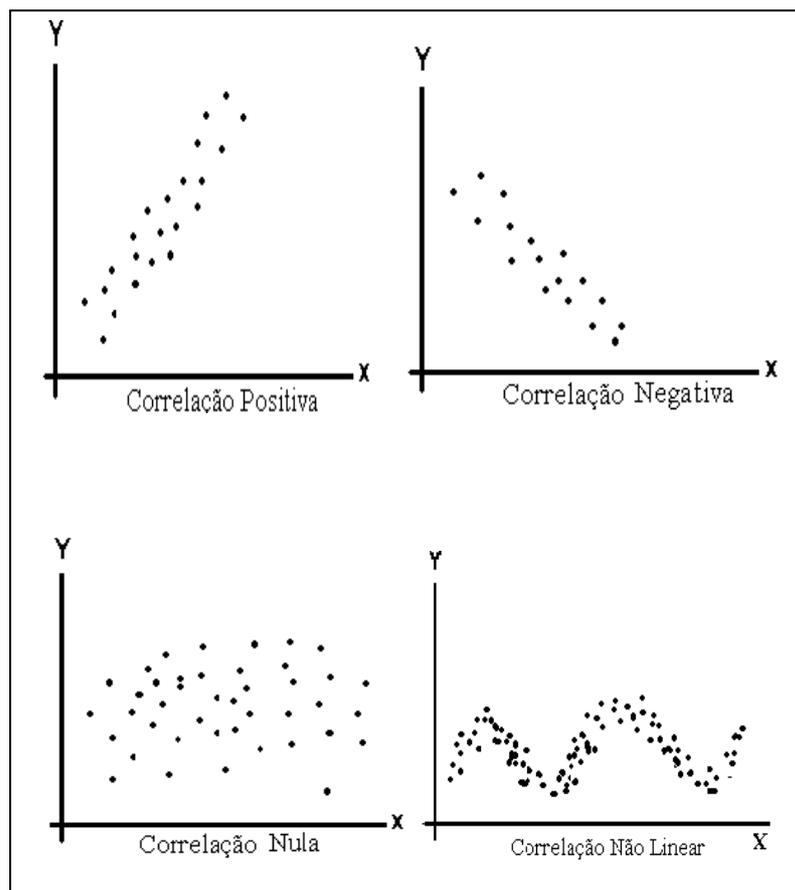
$$\text{Cov}(X,Y) = \sigma_{XY} = \sigma_X \sigma_Y \quad (3.48)$$

A equação (3.46)  $\text{Cov}(X,Y) = 0$  descreve a total independência das variáveis  $X$  e  $Y$ . Enquanto que a equação (3.47)  $\text{Cov}(X,Y) = \sigma_X \sigma_Y$  mostra caso de completa dependência situação na qual  $X=Y$ , tem-se que  $\rho = 1$ . Definimos o coeficiente correlação de Pearson pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3.49)$$

Este coeficiente é evidentemente adimensional e assume valores no conjunto de números reais definidos pelo seguinte intervalo  $-1 \leq \rho \leq +1$ .

A Figura 3.6 ilustra o significado físico do coeficiente de Pearson para diversos aglomerados (clusters) de dados, sendo explicativas por si mesmo.



**Figura 3.6** Formas De Correlações Entre Variáveis Randômicas

### 3.7.2 QUÃO FORTE É UMA CORRELAÇÃO

O coeficiente de correlação tenta exprimir de que forma uma dada variável se agrega e acompanha, se agrupa a uma outra dada variável. Conforme citado em [14], [15], [16] e [17] percebe-se que não há um consenso sobre como classificar o quão forte ou fraca é uma correlação estatística em função do valor de  $r$ .

Porém a classificação relativa proposta em [15], foi a considerada nesta dissertação, sendo apresentada na Tabela 3.2.

**TABELA 3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PEARSON SEGUNDO [15]**

$ \rho  = 1.00$	correlação perfeita (dados forjados?)
$ \rho  = (0.80,0.99)$	correlação muito forte (Premio Nobel)
$ \rho  = (0.60,0.79)$	correlação forte (bastante para ter posse)
$ \rho  = (0.40,0.59)$	correlação moderada (publique)
$ \rho  = (0.20,0.39)$	correlação fraca (não é terrível)
$ \rho  < 0.20$	esqueça isto

### 3.7.3 VALIDAÇÃO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Dado que se conhece o valor da correlação, expresso pelo seu coeficiente de correlação  $r$ , é importante saber se este valor indica uma associação linear real entre as variáveis ou um simples acaso de associação linear na amostra.

De [6] observa-se que existem diversos métodos para se avaliar tal fato entre eles cita-se:

- ♣ intervalo de confiança;
- ♣ teste de hipótese usando-se a distribuição  $\rho$  para verificar a correlação da população;
- ♣ testes de hipótese usando-se a distribuição  $t$ .

De acordo com [6] um bom critério para se validar  $\rho$ , é utilizar-se de teste de hipótese usando-se a distribuição  $\rho$  para verificar a correlação da população. Neste teste:

- ♣ A hipótese nula  $H_0$  é assumida como não havendo correlação na população, ou seja  $\rho=0$ ;
- ♣ A hipótese  $H_1$  supõem ou que:
  - $\rho = 0$  ou;

- $\rho < 1$  ou;
- $\rho > -1$ .

O valor crítico de  $\rho$ , representado por  $r^*$ , serve para rejeitar ou não a hipótese nula, que supõem  $\rho = 0$ . Eles são obtidos em tabelas para vários níveis de significância  $\alpha$  e graus de liberdade  $v$ . O APÊNDICE 3 apresenta os valores críticos dos coeficientes de correlação de Pearson e nesta tabela o valor crítico é denominado de  $r_{\alpha/2}$ . Devido à simetria da distribuição  $\rho$ , apenas os valores positivos são apresentados na tabela.

Dado que se calculou o coeficiente de correlação de Pearson, determina-se o valor crítico  $\rho^*$  do mesmo a partir da tabela do Apêndice 3. De [6] e [7] tem-se que o critério para rejeitar a hipótese nula é :

- \* rejeite  $h_0$  se  $r^* > r_{\alpha v}$  em um teste de meia distribuição (meia cauda);
- \* rejeite  $h_0$  se  $r^* > r_{\alpha/2}$  em um teste total (dupla cauda).

Este teste, é utilizado na dissertação para avaliação e validação das correlações calculadas entre intervenções de manutenção e desligamentos.

## CAPÍTULO 4

# CORRELAÇÃO MANUTENÇÃO-DESLIGAMENTO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Mostra-se neste capítulo que ao se avaliar as correlações estatísticas entre manutenções e desligamentos, a partir da análise dos dados obtidos do histórico da operação de linhas de transmissão de uma empresa transmissora, não se detecta correlação estatística significativa entre os desligamentos e as intervenções de manutenções observados em um mesmo mês.

Diversos são os fatores que podem acarretar estas baixas correlações, dentre os quais se destacam:

- a existência de uma correlação que é naturalmente baixa ou inexistente, em função da natureza do problema;
- realização de intervenções de manutenção acima de uma determinada frequência considerada ideal;
- o fato da manutenção realizada em um determinado período, poder estender o seu impacto para um período posterior.

Com isto, surge a pergunta:

- como criar um modelo que permita correlacionar tais dados e de que forma quantificar essa correlação?

Este fato é avaliado neste capítulo onde se apresenta uma forma de avaliar tais correlações. Fundamenta-se nos conceitos apresentados no Capítulo 3 desta dissertação, e em conceitos adicionais definidos no próprio Capítulo.

## 4.2 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES ENTRE OS DESLIGAMENTOS E AS INTERVENÇÕES DE MANUTENÇÃO REALIZADAS MENSALMENTE.

Conforme apresentado no Capítulo 3, uma figura de mérito para se avaliar correlações estatísticas entre duas variáveis é o coeficiente Pearson. Esse coeficiente permite avaliar de que forma duas variáveis se aglutinam ao redor de uma dada tendência. É utilizado nesta dissertação para avaliar as correlações obtidas entre as intervenções de manutenção em um dado período e o número de desligamentos que acarretam perda de receita no mesmo período.

No Apêndice A desta dissertação apresentam-se os resultados das correlações obtidas para as linhas analisadas, para se avaliar intervenções de manutenção em um determinado mês e desligamentos verificados no mesmo mês que acarretam perda de receita.

A Tabela 4.1 mostra um dos resultados apresentados no Apêndice 1 desta dissertação.

**TABELA – 4.1 COEFICIENTES DE PEARSON PARA MANUTENÇÕES E DESLIGAMENTOS OBSERVADOS NO MESMO MÊS**

LT - 1	-0,096
LT - 2	-0,039
LT - 3	-0,101
LT - 4	-0,081
LT - 5	-0,081
LT - 6	-0,099
LT - 7	-0,096
LT - 8	-0,101
LT - 9	-0,066

Analisando-se os coeficientes de correlação apresentados na Tabela

4.1, observa-se que existem correlações estatísticas negativas entre os desligamentos forçados e as intervenções de manutenção ainda que estas correlações sejam próximas a zero. Este resultado mostra que, de fato, a realização de intervenções para manutenção pode possibilitar a redução do número de desligamentos.

Como as correlações obtidas para o conjunto de dados apresentado são fracas, não é necessária uma análise exaustiva em mais linhas, pois essa amostra não pode ser considerada como uma exceção da regra.

Diante do exposto, é natural que surjam questionamentos de que a realização de manutenções se justifica. Isto é, ocorre uma diminuição na frequência de desligamentos com um incremento das manutenções? Ou não está ocorrendo um aumento nos desligamentos com um respectivo aumento das manutenções?

De modo a avaliar a afirmação anterior, sobre a relação entre intervenções de manutenção e desligamentos, é proposto aqui uma metodologia baseada em conceitos de probabilidade e processos estocásticos, que possibilita avaliar o grau das referidas correlações.

### **4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS**

Considerando-se o resultado anteriormente obtido, onde se correlacionaram desligamentos e intervenções de manutenção verificados em um mesmo mês, buscou-se a seguir outros critérios de agregação de dados com o propósito de melhor avaliar o problema.

Para tanto a frequência de manutenção e desligamentos que originariamente são registradas em base mensal, serão agrupadas em bases bimensais e trimensais com o propósito de se eliminar distorções (meses com um elevado

número de manutenções) e desta forma suavizar a freqüência das manutenções.

Com base nessas considerações, define-se então classe de manutenção N, como o conjunto de períodos que pode ser mensal, bimensal ou trimestral, em que a freqüência de manutenção observada no período é igual a N.

Portanto ao se referir à classe de manutenção 2 vai-se estar referindo ao conjunto dos períodos de observação no qual o número de manutenções realizadas foi igual a 2, ou seja meses nos quais ocorreram 2 manutenções. E de forma análoga ao se referir à classe de manutenção 0 vai-se estar referindo ao conjunto dos períodos de observação nos quais o número de manutenções realizadas foi igual a 0, ou seja meses nos quais não ocorreram manutenções.

Para cada classe de manutenção associam-se os correspondentes desligamentos observados. Desta forma define-se desligamento da classe de manutenção N como a freqüência de desligamentos associado à classe de manutenção N.

Também, para cada classe de manutenção, tem-se a relação de desligamento da classe de manutenção N, definida e calculada pela seguinte relação:

$$FMD = \frac{\text{número de desligamento da classe de manutenção}}{\text{cardinalidade da classe de manutenção}} \quad (4.1)$$

onde a cardinalidade de uma classe de manutenção é o número de vezes no qual essa classe ocorre. Portanto a relação FMD representa a freqüência média dos desligamentos pelas intervenções de manutenção observadas.

#### 4.4 AVALIAÇÃO DOS DESLIGAMENTOS ASSOCIADOS A UMA DADA CLASSE DE MANUTENÇÃO N

Ao se analisar as correlações existentes entre as classes de manutenção N e as respectivas relações de desligamentos da classe de manutenção N, nota-se que, a forma como se constroem os desligamentos e classes de manutenção, determina forte influencia no resultado das referidas correlações.

Tal fato mostra que manutenção e desligamento ocorrem temporalmente defasados. E é devido a este fato que outras formas de avaliação foram pensadas. Basicamente elas são avaliações mensais, bimensais e trimensais. Adicionalmente como geralmente os planos de manutenção atendem a calendários mensais, adotou-se intervalos múltiplos de mês para avaliação dos desligamentos e manutenções.

As diversas formas consideradas nesta dissertação para fazer a agregação dos dados são apresentadas a seguir:

- avaliação do TIPO 1 é aquela na qual as manutenções são computadas mensalmente e correlacionadas com os desligamentos no mês seguinte ao da avaliação da manutenção;
- avaliação do TIPO 2 é aquela na qual as manutenções são computadas mensalmente e correlacionadas com os desligamentos computados pela média dos desligamentos observados no mês da apuração da manutenção e no mês seguinte;
- avaliação do TIPO 3 é aquela na qual as manutenções são computadas em base bimensal e correlacionadas com os desligamentos computados no último mês da avaliação das manutenções;

- avaliação do TIPO 4 é aquela na qual as manutenções são computadas em base bimensal e correlacionadas com os desligamentos computados pela média dos desligamentos observados no último mês do bimestre de apuração da manutenção e o do mês seguinte;
- avaliação do TIPO 5 aquela na qual as manutenções são computadas em base trimestral, e correlacionadas com os desligamentos computado no mês seguinte ao da avaliação das manutenções.

Desta forma, as definições dos tipos acima são deslocamentos no tempo entre as avaliações de intervenções de manutenção e os desligamentos. Outras maneiras de avaliar o defasamento temporal entre as intervenções de manutenção e os desligamentos foram consideradas, porém as que forneceram resultados mais satisfatórios são as mencionadas.

**4.5 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 1 DE AGREGAÇÃO DE DADOS**

No procedimento do TIPO 1. o período de apuração dos desligamentos e das manutenções é mensal. Para cada classe de manutenção se avalia a frequência de desligamento no mês seguinte. A Tabela – 4.2 mostra a forma de avaliação dos dados para o TIPO 1.

**TABELA – 4.2 TIPO 1 DESLIGAMENTOS E MANUTENÇÃO VERIFICADOS MENSALMENTE**

Mês	1	.....	n-1	n	n+1	n+2	.....
Manutenção	$m_1$		$m_{n-1}$	$m_n$	$m_{n+1}$	$m_{n+2}$	
Desligamento	$n_1$		$d_{n-1}$	$d_n$	$d_{n+1}$	$d_{n+2}$	
Desligamento e Manutenção Considerados				$d_{n+1}$ $m_n$			

O resultado obtido ao se aplicar esta forma de avaliação ao histórico de dados é mostrado na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO 1

LT	Coeficiente De Pearson	Significância
LT - 1	-0,662	95 %
LT - 2	-0,561	95 %
LT - 3	-0,766	95 %
LT - 4	-0,842	95 %
LT - 5	-0,553	95 %
LT - 6	-0,792	95 %
LT - 7	-0,558	95 %
LT - 8	-0,822	95 %
LT - 9	-0,817	95 %

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 permitem concluir que os valores numéricos dos coeficientes de Pearson indicam correlações classificadas como correlações muito fortes ou correlações fortes ou correlações moderadas conforme apresentado na Tabela 3.2 do Capítulo 3.

Conforme visto no Item 3.7.2 desta dissertação , outro fato bastante significativo é que os testes de significância para os coeficientes de Pearson fornecem resultados maiores ou iguais a 95%. Isto significa dizer que ao se considerar um teste de hipótese conforme descrito em 3.7.2 para o resultado acima, teste esse no qual as premissas são:

- $H_0$  supõe nula a correlação entre intervenções de manutenção e desligamentos;
- $H_1$  supõe não nula a correlação entre intervenções de manutenção e desligamentos,

O resultado nos indica que se tem uma probabilidade que é de no mínimo de 95% de que tais correlações sejam verdadeiras para todas as linhas. Outro fato

extremamente importante e que possui um forte significado para o capítulo seguinte, é que todas as correlações obtidas são negativas.

**4.6 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 2 DE AGREGAÇÃO DE DADOS**

No procedimento do TIPO 1 o período de apuração das manutenções se dá em base mensal e o dos desligamentos pela média do desligamento apurado no mês de amostragem e no mês seguinte ao de amostragem. A Tabela – 4.4 mostra a forma de avaliação dos dados para o TIPO 2.

**TABELA – 4.4 TIPO 2 - DESLIGAMENTOS OBTIDOS PELA MÉDIA BIMENSAL E MANUTENÇÃO APURADA MENSALMENTE**

Mês	1	.....	n-1	n	n+1	n+2	.....
Manutenção	$m_1$		$m_{n-1}$	$m_n$	$m_{n+1}$	$m_{n+2}$	
Desligamento	$n_1$		$d_{n-1}$	$d_n$	$d_{n+1}$	$d_{n+2}$	
Desligamento E Manutenção Considerados				$(d_n+d_{n+1})/2$ $m_n=N$			

O resultado obtido ao se aplicar esta forma de avaliação ao histórico de dados é mostrado na Tabela 4.5.

**TABELA 4.5 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO 2**

LT	Coeficiente De Pearson	Significância
LT - 1	-0,405	85%
LT - 2	-0,510	90%
LT - 3	-0,692	92%
LT - 4	-0,389	85%
LT - 5	-0,431	85%
LT - 6	-0,733	93%
LT - 7	-0,441	80%
LT - 8	-0,717	92%
LT - 9	-0,464	85%

Os resultados apresentados na Tabela 4.5 permitem concluir que os coeficientes Pearson indicam correlações classificadas como fracas ou médias, conforme apresentado no Capítulo 2.

Ao se observar o resultado dos testes de significância para os coeficientes de Pearson, nota-se que apenas 3 fornecem resultados no intervalo de 90% a 93%. Os demais apresentam resultados que são inferiores a 90%. Isto significa dizer que ao se fazer um teste de hipótese como o proposto no Item 4.5 observa-se que para apenas uma linha, (Linha 6), teria uma probabilidade da ordem de 93% de certeza para a existência das correlações. Observa-se um expressivo número de linhas (6) com probabilidade da ordem de 85% para certeza da existência das correlações. Desta forma se conclui que este resultado é inferior ao do Tipo 1. Cabe lembrar que geralmente [6],[7] adota-se nível de significância da ordem e 95% para se aceitar uma dada amostra.

Continua a se observar que todas as correlações obtidas são negativas.

**4.7 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 3 DE AGREGAÇÃO DE DADOS**

No procedimento do TIPO 3, o período de apuração das manutenções é bimensal e os desligamentos são avaliados no último mês considerado. A Tabela 4.6 mostra a forma de avaliação dos dados para o TIPO 3.

**TABELA – 4.6 TIPO 3 - DESLIGAMENTOS VERIFICADOS NO MÊS SUBSEQUENTE AO BIMESTRE DE AVALIAÇÃO DAS MANUTENÇÕES**

Mês	1	.....	n-1	n	n+1	n+2	.....
Manutenção	$m_1$		$m_{n-1}$	$m_n$	$m_{n+1}$	$m_{n+2}$	
Desligamento	$n_1$		$d_{n-1}$	$d_n$	$d_{n+1}$	$d_{n+2}$	
Desligamento E Manutenção Considerados				$d_{n+1}$ $m_{n+}$ $m_{n-1}$			

O resultado obtido com esta forma de avaliação é apresentado na Tabela 4.7.

**TABELA 4.7 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO 3**

<b>LT</b>	<b>Coefficiente De Pearson</b>	<b>Significância</b>
LT - 1	0,097	80%
LT - 2	-0,428	83%
LT - 3	-0,241	80%
LT - 4	-0,439	83%
LT - 5	-0,386	80%
LT - 6	-0,590	83%
LT - 7	-0,517	83%
LT - 8	-0,077	80%
LT - 9	-0,574	83%

Os resultados apresentados na Tabela 4.7 permitem concluir que os coeficientes Pearson indicam correlações classificadas de médias para as Linhas 6,7 e 9, fraca ou inexistente para as demais.

Outro fato bastante significativo é todos os testes de significância para os coeficientes, fornecem resultados menores que 90%. Isto significa dizer que ao se fazer um teste de hipótese como o proposto no Item 4.5, todas as linhas analisadas teriam uma probabilidade menor que 90% para certeza da existência das correlações.

Desta forma se observa um alto grau de incerteza nesta avaliação (de pelo menos 10%), levando à conclusão de que este resultado também é inferior ao do Tipo 1.

Observa-se para a linha 1 uma correlação quase nula, porém positiva, para as demais continua a se observar correlações negativas.

### 4.8 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 4 DE AGREGAÇÃO DE DADOS

No procedimento do TIPO 4, tanto o período de apuração das manutenções quanto o dos desligamentos é bimestral. Porém a observação dos desligamentos é realizada com defasamento de um mês. A Tabela 4.8 mostra a forma de avaliação dos dados para o TIPO 4.

TABELA - 4.8 TIPO 4 – DESLIGAMENTOS E MANUTENÇÃO AVALIADA BIMESTRALMENTE

Mês	1	.....	n-1	n	n+1	<b>n+2</b>	.....
Manutenção	$m_1$		$m_{n-1}$	$m_n$	$m_{n+1}$	<b><math>m_{n+2}</math></b>	
Desligamento	$n_1$		$d_{n-1}$	$d_n$	$d_{n+1}$	<b><math>d_{n+2}</math></b>	
Desligamentos E Manutenções Considerados				$(d_{n+1} + d_n)/2$ $m_{n+1} m_{n-1}$			

O resultado obtido com esta forma de avaliação é apresentado na tabela 4.9.

TABELA 4.9 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO 4

LT	Coeficiente De Pearson	Significância
LT - 1	-0,282	80%
LT - 2	-0,205	80%
LT - 3	-0,444	85%
LT - 4	-0,095	80%
LT - 5	-0,204	80%
LT - 6	-0,482	85%
LT - 7	-0,321	80%
LT - 8	-0,694	90%
LT - 9	-0,190	80%

Os resultados apresentados na Tabela 4.8 permitem concluir que os coeficientes Pearson indicam correlações classificadas como médio para as Linhas 8 e fraco ou inexistente para as demais.

Outro fato bastante significativo, retirado dos resultados, é todos os testes de significância para os coeficientes, fornecem resultados menores que 90%. Isto significa dizer que ao se fazer um teste de hipótese como o proposto no Item 4.5, apenas uma das linhas analisadas, a linha 8, teria uma probabilidade maior que 85% para certeza da existência das correlações, todas as outras apresentariam probabilidade de certeza inferior a este valor. Desta forma se observa um alto grau de incerteza nesta avaliação (de no mínimo 15%), conclui portanto que este resultado também é inferior ao do Tipo 1.

Neste caso se observa que todas as correlações obtidas são também negativas.

**4.9 RESULTADO DAS CORRELAÇÕES OBTIDAS COM O TIPO 5 DE AGREGAÇÃO DE DADOS**

No procedimento do TIPO 4 o período de apuração das manutenções acontece em base trimestral, enquanto que os desligamentos são avaliados em base mensal, considerando-se o mês seguinte à apuração das manutenções. A Tabela Figura 4.10 mostra a forma de avaliação dos dados para o TIPO 5.

**TABELA 4.10 – TIPO 5 DESLIGAMENTOS AVALIADAS MENSALMENTE E MANUTENÇÃO AVALIADAS TRIMESTRALMENTE**

Mês	1	.....	n-1	n	n+1	<b>n+2</b>	.....
Manutenção	$m_1$		$m_{n-1}$	$m_n$	$m_{n+1}$	<b><math>m_{n+2}</math></b>	
Desligamento	$n_1$		$d_{n-1}$	$d_n$	$d_{n+1}$	<b><math>d_{n+2}</math></b>	
Desligamentos E Manutenções Consideradas				$d_{n+1}$ $m_{n-2} + m_{n-1} + m_n$			

O resultado obtido com esta forma de avaliação é apresentado na tabela 4.11.

TABELA 4.11 COEFICIENTES DE PEARSON PARA A AGREGAÇÃO DO TIPO  
5

LT	Coefficiente De Pearson	Significância
LT - 1	0,209	80%
LT - 2	0,463	80%
LT - 3	-0,190	80%
LT - 4	-0,007	80%
LT - 5	0,137	80%
LT - 6	-0,464	80%
LT - 7	-0,310	80%
LT - 8	-0,692	85%
LT - 9	-0,549	85%

Observa-se aqui que de uma maneira geral uma degradação dos coeficientes de Pearson e conseqüentemente das correlações.

Os resultados apresentados na Tabela 4.11 permitem concluir que os coeficientes Pearson indicam correlações médias para as Linhas 8 e 9 e fraca ou inexistente para as demais.

Outro fato bastante significativo é todos os testes de significância para os coeficientes, fornecem resultados menores que 85%. Isto significa dizer que ao se fazer um teste de hipótese como o proposto no Item 4.5, todas as linhas analisadas teriam uma probabilidade menor que 85% para certeza da existência das correlações. Desta forma se observa um alto grau de incerteza nesta avaliação (de no mínimo 15%), conclui portanto que este resultado também é inferior ao do Tipo 1.

Observa-se também que nem todas as correlações obtidas são negativas.

#### 4.10 SISTEMATIZAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS.

A partir das definições feitas nos Itens 4.3 e 4.4, tem-se o seguinte procedimento para avaliação das correlações.

Para todos os tipos de agregação de dados faça:

- pré-processamento dos dados históricos com a finalidade de se eliminar registros que apresentem:
  - ♣ erros de sintaxe existentes na base de dados;
  - ♣ dados repetidos;
  - ♣ desligamentos em um mesmo horário e descritos para os dois terminais da linha. Isto permite computar tal descrição como um único desligamento;
  - ♣ desligamentos causados por defeitos sistêmicos que acarretaram desconexão da linha em estudo;
  - ♣ múltiplos desligamentos em uma mesma linha causada por uma mesma causa, como exemplo cita-se cadeia de isolador quebrada que acarretou inúmeros desligamentos em um mesmo dia. Tal tipo de evento é considerado como um evento único;
- construa as classes de manutenção;
- construa os desligamentos associados a cada classe de manutenção;
- construa a relação de desligamentos associados à classe de manutenção;
- avalie a correlação estatística, através do coeficiente de correlação de Pearson, existente entre as classes de manutenção e as respectivas relações de desligamentos associados a cada uma das classes de manutenção.

Basicamente esta é o procedimento adotado para se tratar os dados deste tipo de problema.

#### 4.11 CONCLUSÃO

A Tabela 4.12 é um resumo das avaliações obtidas para os diversos tipos de agregação de dados considerados.

**TABELA 4.12 RESUMO DAS DIVERSAS FORMAS DE AVALIAÇÃO**

	TIPO-1	TIPO-2	TIPO-3	TIPO-4	TIPO-5
LT - 1	-0,662	-0,405	0,097	-0,282	0,209
LT - 2	-0,561	-0,510	-0,428	-0,205	0,463
LT - 3	-0,766	-0,692	-0,241	-0,444	-0,190
LT - 4	-0,842	-0,389	-0,439	-0,095	-0,007
LT - 5	-0,553	-0,431	-0,386	-0,204	0,137
LT - 6	-0,792	-0,733	-0,590	-0,482	-0,464
LT - 7	-0,558	-0,441	-0,517	-0,321	-0,310
LT - 8	-0,822	-0,717	-0,077	-0,694	-0,692
LT - 9	-0,817	-0,464	-0,574	-0,190	-0,549
Menor Significância Observada	95	80	80	80	80

Os dados apresentados na Tabela 4.12, permitem a conclusão de que as avaliações do TIPO 1 fornecem para o conjunto de linhas acima os coeficientes de correlação Pearson com os maiores valores e as melhores significâncias. A significância conforme visto no Capítulo 3 fornece uma medida da certeza das avaliações. Os resultados obtidos para o TIPO 2 ainda apresentam vários coeficientes de Pearson com valores expressivos, porém deve-se ressaltar a menor segurança obtida com esta forma de avaliação, fato este que é mostrado pela baixa significância. Portanto para esta forma de agregação dos dados, e as demais, as significâncias mostradas sugerem que os mesmos devam ser descartados. Adicionalmente nas avaliações associadas às medições dos TIPOS 3, e do TIPO 5 existem correlações que são positivas, poderiam indicar para estes períodos um número de intervenções maior que o necessário.

Ao se fazer uma avaliação dos resultados apresentados no Apêndice A desta dissertação, se observa que as classes de manutenção associadas a 5,6 ou 7 manutenções, acumulam pelo menos 95% de todas as manutenções realizadas.

Adicionalmente se observa que classes de manutenção superiores às classes 5,6 ou 7, não necessariamente ocorrem em todas as linhas.

Desta forma, no sentido de se poder efetuar avaliações segundo um mesmo critério foi adotado o critério de se considerar as classes de manutenção que juntas acumulam 95% de todas as manutenções observadas, e o resultado levando-se em conta esta consideração é apresentado na Tabela 4.13.

**TABELA 4.13 RESULTADOS CLASSES QUE JUNTAS ACUMULAM 95% DE TODAS AS MANUTENÇÕES**

	TIPO-1	TIPO-2	TIPO-3	TIPO-4	TIPO-5
LT - 1	-0,899	-0,545	-0,608	-0,326	0,211
LT - 2	-0,673	-0,638	-0,322	0,285	0,172
LT - 3	-0,770	-0,524	-0,466	-0,098	-0,074
LT - 4	-0,635	-0,745	-0,165	0,229	0,204
LT - 5	-0,913	-0,796	-0,003	0,095	-0,040
LT - 6	-0,722	-0,479	-0,232	-0,418	-0,342
LT - 7	-0,571	-0,452	-0,507	-0,247	-0,174
LT - 8	-0,749	-0,731	-0,682	-0,778	-0,665
LT - 9	-0,750	-0,280	-0,506	-0,097	-0,491

Os dados acima mostrados reforçam a conclusão de que as avaliações do TIPO 1 fornecem para cada uma das linhas os melhores coeficientes de correlação.

No próximo Capítulo será mostrado como se pode associar um risco ao se transitar de uma dada classe de manutenção para outra, e se adotará como resultado satisfatório os apresentados pelas correlações obtidas com o TIPO 1 de agregação de dados.

## **CAPÍTULO 5**

### **AVALIAÇÃO DO RISCO DE DESLIGAMENTO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DE MANUTENÇÃO**

#### **5.1 - INTRODUÇÃO**

Conforme apresentado no Capítulo 4 constata-se que a partir da construção de um modelo baseado no conceito de classe de manutenção ( frequência de manutenções observadas em um dado período), verifica-se a existência de correlação estatística significativa entre as frequências de intervenção para manutenção (classes) e os desligamentos considerados.

Adicionalmente, os resultados mais significativos destas correlações são obtidos ao se considerar os agrupamentos de dados do tipo que se definiu por TIPO 1. Para esta forma de agrupamento, observa-se o efeito que as intervenções de manutenção de um dado mês têm sobre os desligamentos ocorridos no mês seguinte. Desta forma todos os resultados numéricos e as respectivas conclusões aqui apresentadas baseiam-se nesta forma de agrupamento de dados.

Neste capítulo, apoiado nas correlações obtidas para o TIPO 1 de agregação de dados, apresenta-se um modo de avaliar o número de desligamentos esperados ao se transitar de uma dada classe de manutenção para outra. Deste modo, pode-se avaliar o efeito da realização ou não de um determinado número de intervenções no futuro.

#### **5.2 MATRIZES DE TRANSIÇÃO DE CLASSES ( MTC )**

Define-se nesta dissertação, transição de classe de manutenção como a passagem de uma dada classe de manutenção em um período, para outra

classe em um período seguinte. Caso considere-se que cada classe é um estado representativo das intervenções de manutenção, então a transição de classe de manutenção é uma mudança de estado.

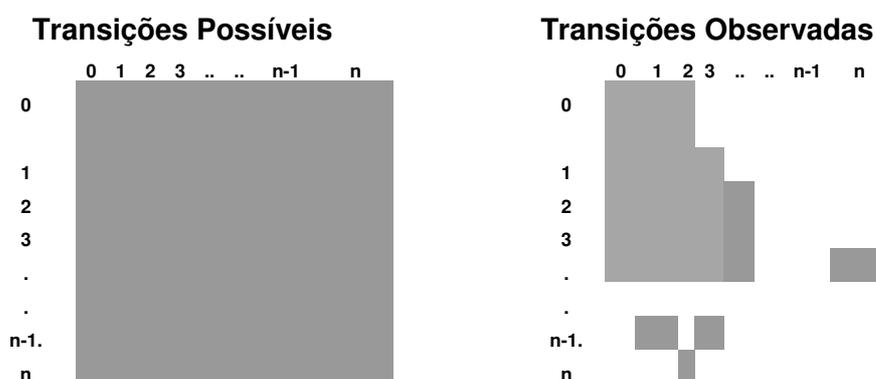
Do histórico das linhas analisadas constatou-se que os valores de intervenção para manutenção, situam-se entre 0 e 24 intervenções de manutenção por mês. Porém para cada linha de transmissão os valores máximos observados são diferentes entre si, enquanto que os mínimos foram sempre iguais a zero.

Apresenta-se agora o conceito de matriz de transição de classes de manutenção, que é definida por meio de uma matriz quadrada de ordem  $n$  onde:

- o índice de linha desta matriz é utilizado para representar a classe atual de manutenção;
- e o índice de coluna desta matriz é utilizado para representar a futura classe de manutenção.

Ao conjunto de todas as transições situadas entre os valores mínimo e máximo de intervenções de manutenção para uma dada linha de transmissão, se denomina de espaço de transições possíveis.

A Figura 5.1 ilustra o conceito de espaço transições e transições observadas para uma dada linha supondo-se que o mínimo e o máximo das intervenções de manutenção sejam respectivamente zero e  $n$ .



**Figura 5.1 TRANSIÇÕES POSSÍVEIS E OBSERVADAS EM UMA LINHA**

Ao se associar a cada transição observada, os desligamentos ocorridos um mês após a ocorrência da transição, cria-se o conceito de matriz de desligamento associado à transição de classe de manutenção.

### **5.3 MATRIZ DE DESLIGAMENTOS ASSOCIADA À MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE CLASSES DE MANUTENÇÃO ( MDA )**

Define-se a matriz de desligamentos associada à matriz de transição de classe de manutenção ( MDA ), como uma matriz bidimensional que cujos elementos são o número de desligamentos observados entre cada transição de classe.

Tal como definido na Seção 5.2 onde se conceitua a matriz de transição de classes de manutenção, aqui também:

- o índice de linha desta matriz é utilizado para representar a classe atual de manutenção;
- e o índice de coluna desta matriz é utilizado para representar a classe futura de manutenção do período subsequente.
- $MDA(j, k)$  é o número de desligamentos verificados no histórico ao se transitar da classe  $j$  para a classe  $k$ .

### **5.4 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO ( MTR ) DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO**

Define-se a matriz de transição de risco (MTR) de uma dada linha de transmissão, como:

- uma matriz bidimensional que representa o risco de desligamento associado às transições de classe de manutenção.

Tal como definido na Seção 5.2 onde se conceitua a matriz de transição de classes de manutenção, aqui também:

- o índice de linha desta matriz é utilizado para representar a frequência atual de manutenção;
- e o índice de coluna desta matriz é utilizado para representar a futura frequência de manutenção do período subsequente.

Porém a novidade é que:

- $MTR(j, k)$  é uma medida do risco ao se transitar da classe  $j$  para a classe  $k$ .

Desta forma, para essas matrizes, o índice da linha representa a frequência atual de manutenção, o índice da coluna representa a frequência para onde se transita (estado futuro). Cada elemento da matriz representa o risco de desligamento associado a uma dada transição, sendo o risco expresso pela probabilidade de desligamento.

O conceito acima permite que se tenha uma associação de risco, ao se transitar de uma classe de manutenção para outra. Como no presente se está sobre uma classe de manutenção conhecida ( sabe-se o número de manutenção previsto para o período), consegue-se ter uma avaliação do risco esperado no futuro.

Desta forma, se  $MTR$  é a de matriz de transição de risco de uma dada linha de transmissão, então cada elemento  $MTR(j, k)$  representa o risco associado de desligamento ao se transitar da classe de manutenção  $j$  para a classe de manutenção  $k$ .

Estas definições possibilitam a construção de uma função na qual o número de intervenções de manutenções previsto para um novo período, é entrada para a avaliação do risco de desligamento no próximo período. Desta forma o número de manutenções a se realizar, pode ser encarado como uma variável de controle onde a variável controlada é a receita associada à linha e é uma função do risco de desligamento.

Esta proposição é o que se crê ser um novo suporte ao processo de tomada de decisão que pode ser disponibilizado desta dissertação. Com ela se pode avaliar o risco das intervenções de manutenção futuras de forma relativamente simples a partir do histórico de operação.

#### **5.4.1 PROPRIEDADES DAS MATRIZES DE TRANSIÇÃO DE RISCO**

Definindo-se para uma determinada linha de transmissão, a matriz MDA como a matriz de desligamentos associada à classe de manutenção, então:

- MTR (X,Y), representa o risco esperado para se ir da classe de manutenção X para a classe de manutenção Y. Desta forma se  $MTR(X,Y) \neq 0$ , então  $MDA(X,Y) \neq 0$ ;
- MTR (X,X), representa o risco associado a se repetir o número de manutenções realizadas no mês.

#### **5.5 CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO**

As matrizes de transição de risco são obtidas a partir de dados históricos por meio do seguinte procedimento:

- construção da matriz de transição de classes de manutenção MTC,
- construção da matriz de desligamento associado à transição de classe MDA;
- construção da matriz da relação de desligamentos associados às classes de manutenção  $MRD(j,k) = MDA(j,k) / MTC(j,k)$ .
- obtenção do número médio de desligamentos por transição ( nmdt ) a partir da matriz MRD, sendo este valor obtido somando-se todos os elementos da MRD;
- obtenção da matriz de probabilidades de todas as transições de classe para as demais classes, sendo esta matriz a nossa medida de risco, ou seja a MTR. É uma tabela de probabilidade conjunta, onde se tem a probabilidade de desligamentos por transição de intervenções de manutenção. Esta matriz tem cada um de seus elementos dado por:  $MTR(j,k) = MRD(j,k) / nmdt$ ;

Na próxima Seção são mostrados todos os resultados necessários para a construção da citada matriz. Particularmente eles são obtidos a partir do tratamento do histórico de operação da Linha 1. No apêndice C são apresentadas as funções de risco obtidas para todas as linhas avaliadas.

## **5.6 EXEMPLO DE MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE UMA LINHA**

Apresenta-se a seguir os resultados obtidos ao se calcular a matriz de transição de risco para a Linha 1. O exemplo numérico, além de mostrar os dados obtidos do histórico, ajuda a ilustrar os conceitos apresentados neste capítulo.

A matriz de desligamento associada às classes de manutenção é apresentada na Tabela 5.1. Nesta matriz, a linha dada por classe futura representa a frequência da manutenção futura para onde se transita, e a coluna dada por classe

atual representa frequência da manutenção atual. Cada elemento desta matriz é o número de desligamentos observados ao se transitar de uma dada classe de manutenção para outra classe de manutenção. Portanto na matriz apresentada na Tabela 5.1, o valor da posição (0,1) é 3, o qual representa o número de desligamentos observados para todas as transições da classe de manutenção 0 para a classe de manutenção 1.

**TABELA 5.1 MATRIZ DE DESLIGAMENTOS ASSOCIADO ÀS CLASSES DE MANUTENÇÃO DA LT – 1**

Classe Futura ⇒	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Classe Atual ↓										
<b>0</b>	7	3	2	1	0	1	0	0	0	0
<b>1</b>	7	4	0	1	1	0	0	0	0	0
<b>2</b>	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0
<b>3</b>	1	4	2	0	0	0	0	0	0	0
<b>4</b>	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>6</b>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
<b>7</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>8</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>9</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A matriz da Tabela 5.2 apresenta a frequência das classes de manutenção. Nesta matriz, a linha dada por classe futura representa a frequência da manutenção futura para onde se transita, e a coluna dada por classe atual representa frequência da manutenção atual.. Cada elemento desta matriz é o número de todas as manutenções observados ao se transitar de uma classe de manutenção para outra.

Portanto na matriz da Tabela 5.2 o valor da posição (0,2) da matriz é 12, o qual representa a frequência de manutenções observadas ao se efetuarem todas as transições da classe de manutenção 0 para a classe de manutenção 2.

**TABELA 5.2 FREQUÊNCIA DAS CLASSES DE MANUTENÇÃO DA LT – 1**

Classe Futura ⇒	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Classe Atual ↓										
<b>0</b>	28	19	12	11	2	2	0	0	0	0
<b>1</b>	24	23	6	5	3	0	1	1	0	0
<b>2</b>	13	6	8	4	3	1	1	0	0	0
<b>3</b>	7	8	7	5	0	0	1	0	0	0
<b>4</b>	2	4	1	2	2	0	2	0	0	0
<b>5</b>	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>6</b>	0	0	1	1	1	0	0	0	0	2
<b>7</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>8</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>9</b>	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0

A matriz mostrada na Tabela 5.3 apresenta a relação obtida entre desligamentos e frequência das classes de manutenção. Nesta matriz, a linha dada por classe futura representa a frequência da manutenção futura para onde se transita, e a coluna dada por classe atual representa frequência da manutenção atual.. Cada elemento desta matriz é o número de desligamentos associado a uma dada transição, dividido pela respectiva frequência da classe de manutenção da mesma transição. Esta relação só está definida se houver transição.

**Tabela 5.3 DESLIGAMENTOS ASSOCIADOS A UMA DADA TRANSIÇÃO, PELA RESPECTIVA FREQUÊNCIA DA CLASSE DE MANUTENÇÃO DA MESMA TRANSIÇÃO**

Classe Futura ⇒ Classe Atual ↓	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Soma- tório
<b>0</b>	0,250	0,158	0,167	0,091	0,000	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000	1,165
<b>1</b>	0,292	0,174	0,000	0,200	0,333	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,999
<b>2</b>	0,077	0,333	0,375	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,785
<b>3</b>	0,143	0,500	0,286	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,929
<b>4</b>	0,000	0,750	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,750
<b>5</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>6</b>	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
<b>7</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>8</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>9</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Na matriz mostrada da Tabela 5.3 o valor da posição (1,4) da matriz é 0.333, que representa a relação entre desligamentos por número de transições de classes de manutenção, ao se efetuarem, no histórico, todas as transições da classe de manutenção 1 para a classe de manutenção 4.

Desta tabela se calcula o número total médio de desligamentos por transição e que para este caso particular, vale 5,628. Este valor é obtido somando-se os valores existentes na citada matriz. Com ele é possível se determinar as probabilidades de desligamentos mostrados na Tabela 5.4.

Na Tabela 5.4 Nesta matriz, a linha dada por classe futura representa a frequência da manutenção futura para onde se transita, e a coluna dada por classe atual representa frequência da manutenção atual.

Cada elemento desta matriz corresponde à probabilidade de ocorrer desligamentos ao se transitar de uma determinada classe de manutenção para outra.

Esta probabilidade só é definida se houver transição, e é representada por meio de uma distribuição conjunta de probabilidade ou de probabilidades marginal. Tal fato é confirmado por meio da probabilidade marginal mostrada na referida tabela.

**Tabela 5.4 PROBABILIDADES DESLIGAMENTOS / EVENTOS DE TRANSIÇÕES DE CLASSES DE MANUTENÇÃO**

Classe Futura ⇒	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	<i>Risco Da</i>
Classe Atual ↓											<i>Classe</i>
											<i>Atual</i>
<b>0</b>	0,044	0,028	0,030	0,016	0,000	0,089	0,000	0,000	0,000	0,000	0,207
<b>1</b>	0,052	0,031	0,000	0,036	0,059	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,177
<b>2</b>	0,014	0,059	0,067	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,140
<b>3</b>	0,025	0,089	0,051	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,165
<b>4</b>	0,000	0,133	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,133
<b>5</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>6</b>	0,000	0,000	0,000	0,178	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,178
<b>7</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>8</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>9</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Risco da</b>	0,135	0,340	0,147	0,229	0,059	0,089	0,000	0,000	0,000	0,000	<b>1,000</b>
<b>Classe Futura</b>											

↓  
Probabilidade Marginal

Nesta a matriz posição (2,2) da matriz é 0.067, e representa a probabilidade de desligamentos pelo número de transições de classes de manutenção, ao se transitar da classe de manutenção 2 para a classe de manutenção 2.

Na Tabela 5.4, a coluna Risco da Classe Atual representa o risco associado a todas as transições que começam sempre em uma dada classe de manutenção e terminam em qualquer uma das classes de manutenção existentes. O valor

aí existente é obtido somando-se todas as colunas de uma mesma linha, e representa o risco de todas as transições que começam na classe de manutenção desta linha. Desta forma 0,177 representa o risco associado a todas as transições que tiveram como classe inicial 1 intervenção de manutenção.

Da mesma forma, na Tabela 5.4 a linha Risco da Classe Futura representa o risco associado a todas as transições que terminam na classe cujo índice é dado pela classe de manutenção futura. O valor aí existente é obtido somando-se todas as linhas de uma mesma coluna, e representa o risco de todas as transições que terminam na classe de manutenção desta coluna. Desta forma 0,135 representa o risco associado a todas as transições que terminam na classe de manutenção 0.

De uma maneira geral observa-se que:

- há um aumento no risco ao se diminuir o número de intervenções de manutenção para onde se transita;
- não se observam benefícios na função de risco quando se efetuam transições entre os valores elevados de intervenções de manutenção;
- o risco associado às transições que ocorrem de baixos valores de intervenções de manutenção para valores de intervenções maiores é geralmente decrescente.

Porém para o exemplo mostrado observa-se que devido à existência de 1 desligamento ocorrido em uma transição da classe 6 para a classe 3, uma severa penalidade é imposta à classe 3. Isto pode se observar na linha de somatório horizontal da citada tabela, onde os riscos devido a todas as transições para a classe 3 aparecem com um valor de 22,9%. Com os dados disponíveis não se tem condição de se afirmar categoricamente que 6 intervenções de manutenção foram

um número excessivo e que as mesmas não estão correlacionadas com este desligamento.

Por outro se observa na coluna de somatórios verticais, que as transições que se iniciam na classe 0 são as maiores de todas, e a tendência do crescimento do risco se dá quando se transita de uma classe maior para uma classe menor. Este tipo de resultado de uma maneira geral se observa também nas outras linhas, conforme se pode ver no Apêndice C. O fato de existirem diversos valores nulos para pares de transições na tabela, significa que ao longo do histórico não se detectou desligamentos para estas transições.

O Apêndice C apresenta as MTR para as demais linhas analisadas. Constatou-se dos resultados apresentados que as observações feitas nesta seção são aplicáveis.

## **5.7 IMPLEMENTAÇÃO**

Os procedimentos acima foram utilizados na elaboração dos módulos do programa que calcula as funções de risco, e foram implementados utilizando-se o Visual Basic for Application existente como linguagem de programação dentro do MS Excel.

## **5.8 CONCLUSÕES**

Apresentou-se neste capítulo o modo de se construir e a forma de se associar um risco a uma dada transição de classe de manutenção. A aplicação da metodologia proposta leva à obtenção de diversas matrizes definidas neste capítulo onde se observa dos resultados obtidos que de uma maneira geral que:

- há um aumento no risco ao se diminuir o número de intervenções de manutenção para onde se transita;
- não se observam benefícios na função de risco quando se efetuam transições entre os valores elevados de intervenção de manutenção;
- o risco associado às transições que ocorrem de baixos valores de intervenções de manutenção para valores de intervenções maiores é geralmente decrescente.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

#### 6.1 CONCLUSÕES

Conforme visto no Capítulo 2 desta dissertação, a reforma estrutural do setor elétrico teve como característica básica a implantação de livre concorrência na compra e venda de energia elétrica. Para isto se tornar possível, foi indispensável se promover a separação das atividades de geração transmissão e distribuição. Este processo foi chamado de desverticalização.

A reforma leva o setor a funcionar basicamente em uma forma tal que:

- as atividades de geração e comercialização são realizadas basicamente sobre o pressuposto de livre concorrência;
- nos sistemas de transmissão e distribuição, as atividades possuem características de monopólio natural. Não sendo prático, portanto, a implementação de um sistema de livre concorrência.

As empresas transmissoras funcionam em um processo de regulação técnica e econômica, passando a auferir de uma receita devida à prestação de seus serviços de transmissão. Porém estão sujeitas a penalidades devido à indisponibilidade de seus equipamentos. Estas penalidades ocorrem basicamente quer por intervenções de manutenção nas quais seja necessária a desconexão dos equipamentos, quer devido a desligamentos intempestivos que venham a ocorrer com os mesmos. Desta forma, é de se pensar que as empresas transmissoras podem ser encaradas antes de tudo, como empresas fornecedoras de disponibilidade e continuidade de operação de seus equipamentos.

Ao se avaliarem as correlações estatísticas entre intervenções de manutenção em um mês e desligamentos observados no mesmo mês, observa-se a existência de coeficientes de correlação negativos, o que sugere que a realização de manutenção pode trazer benefícios para o desempenho das instalações. Não obstante a esta constatação, as correlações obtidas são fracas, sugerindo uma melhor avaliação do problema. Desta forma, diversas formas de agregação de dados são propostas para realizar tais avaliações. Basicamente avalia-se a relação entre as intervenções de manutenção e os desligamentos ocorridos, considerando-se diferentes intervalos de observação. Os melhores resultados são obtidos quando os desligamentos são computados para o período subsequente ao período de observação das intervenções para manutenção.

A partir da determinação das correlações estatísticas bem como a de suas respectivas significâncias estatísticas, constrói-se um modelo probabilístico que permite a avaliação do risco de desligamentos ao se transitar de um dado número de manutenções em um mês para outro em um mês seguinte. A metodologia é aplicada a um conjunto de 9 linhas de transmissão de 525 kV, sendo as referidas funções apresentadas em forma tabular no Apêndice C. Com estas tabelas é possível se ter uma estimativa do risco de se transitar de um dado número de intervenções de manutenções em um mês, para um novo número de manutenções no mês seguinte.

A análise das funções de risco nos permite concluir que de uma maneira geral:

- há um aumento no risco ao se diminuir o número de intervenções de manutenção;
- não se observam benefícios na função de risco quando se efetuam transições entre os valores de intervenção elevados de manutenção;

- o risco associado às transições que de baixos valores de intervenções de manutenção para valores de intervenções maiores é geralmente decrescente.

Convém lembrar que os dados analisados são obtidos de históricos de operação das linhas, não sendo possível com eles caracterizar tipos de manutenção ou mesmo intervenções com o intuito de atender proposta de melhorias operativas. De qualquer forma, podem ser encarados como gastos efetuados em um dado ativo da receita, no qual se tenta avaliar eventuais benefícios. Talvez esta forma, seja a melhor maneira de se encarar as funções de risco apresentadas.

No que pese a preparação de dados, ainda se necessita de razoável intervenção para a sua montagem. O tempo necessário à obtenção das matrizes de transição de risco, é desprezível para fins práticos. O referido tempo ao se utilizar um micro-computador K7-Athlon de 900 MHz, com 256 Mbytes de memória RAM trabalhando com o sistema operacional Windows 98, é inferior a 1 minuto. A sua grande versatilidade é, em nosso entender, o fato de se ter sido desenvolvido totalmente em Visual Basic for Applications (VBA), dentro do MSExcel, do qual foi utilizada a versão 97

## 6.2 Sugestões

Embora os resultados iniciais possam não ser consistentes em função de não se poder classificar corretamente os dados, e visando uma melhor avaliação da aplicabilidade desta dissertação, algumas conclusões adicionais podem ser obtidas em futuros trabalho, ficando para tanto as seguintes sugestões:

- avaliação da metodologia proposta, na qual se considerem vários ativos menos significativos para a receita assegurada da empresa, com a finalidade de se avaliar a robustez da metodologia;

- avaliação da metodologia proposta, levando-se em conta diversos dados históricos de ativos de mesma classe de tensão e de empresas diferentes, com a finalidade de se verificar a aderência da metodologia a outras formas e critérios de manutenção;
- utilizar a metodologia com dados que permitam separar os desligamentos para intervenções de manutenção dos desligamentos para intervenções de melhorias operativas. Isto permite que se avalie a relação custo benefício de um plano de manutenção, ou a vantagem de um plano de manutenção sobre outro. Este tipo de análise pode também levar a uma melhor avaliação do efeito da manutenção nos ativos responsáveis pela receita assegurada da empresa, já que esta medida poderá ser então avaliada na forma de custo.

## **APÊNDICE A**

### **RESULTADOS OBTIDOS DA AVALIAÇÃO DOS HISTÓRICOS DE OPERAÇÃO**

Neste Apêndice apresentam-se os resultados das avaliações das correlações estatísticas, entre manutenções e desligamentos observados em séries históricas de operação de linhas de transmissão de uma empresa transmissora.

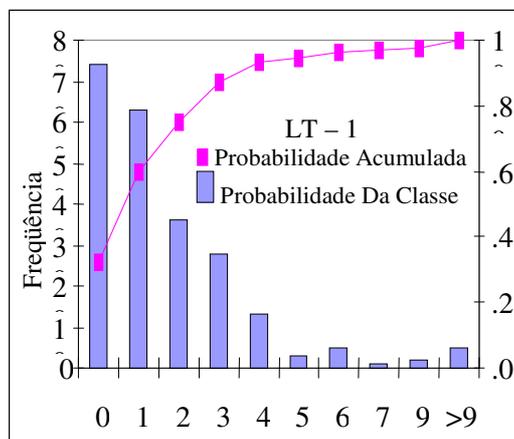
**A.1.1 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT - 1**

Para esta linha obtem-se o seguinte valor para coeficiente de correlação de Pearson : -0,095905.

Uma análise da distribuição da manutenção em função de suas respectivas ocorrências fornece a função de distribuição para a manutenção, mostrada a seguir sob forma tabular e gráfica:

**TABELA A.1 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 1**

Manutenções Mensais	Freqüência	Acumulativo %
0	74	32,17
1	63	59,57
2	36	75,22
3	28	87,39
4	13	93,04
5	3	94,35
6	5	96,52
7	1	96,96
9	2	97,83
mais	5	100



**FIGURA – A.1 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 1**

Desta forma ao se considerar o conjunto de todos os eventos no qual se observam até 6 manutenções mensais, verifica-se que o mesmo é responsável por mais de 95 % de ocorrência de todas as manutenções. Este fato, é válido para esta linha em particular, e veremos à frente que esta ordem de grandeza se verifica também para outras linhas. O coeficiente de Pearson considerando o conjunto das manutenções que acumulam 95% de todas as manutenções, é= - 0,083315.

Pode-se concluir dos resultados apresentados, que não existe uma correlação estatística significativa no conjunto de valores analisados.

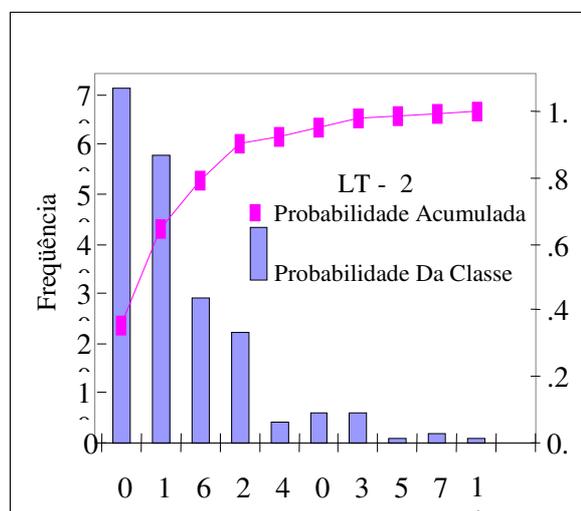
**A.1.2 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT – 2**

Para esta linha obtem-se o seguinte valor para coeficiente de correlação de Pearson : -0,0393.

Uma análise da distribuição da manutenção em função de suas respectivas ocorrências fornece a função de distribuição para a manutenção, mostrada a seguir sob forma tabular e gráfica:

**TABELA A.2 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 2**

<i>Manutenções Mensais</i>	<i>Freqüência</i>	<i>Acumulado %</i>
0	71	35,50
1	58	64,50
6	29	79,00
2	22	90,00
4	4	92,00
0	6	95,00
3	6	98,00
5	1	98,55
7	2	99,50
11	1	100,00



**FIGURA – A.1 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 2**

Desta forma ao se considerar o conjunto de todos os eventos no qual se observam até 6 manutenções mensais, verifica-se que o mesmo é responsável por 95 % de ocorrência de todas as manutenções. Este fato, é válido para esta linha em particular, e veremos à frente que esta ordem de grandeza se verifica para outras linhas. O coeficiente de Pearson considerando o conjunto das manutenções que acumulam 95% de todas as manutenções, é vale – 0,022. Desta forma, pode-se concluir dos resultados apresentados, que também aqui, não existe uma correlação estatística significativa no conjunto de valores analisados.

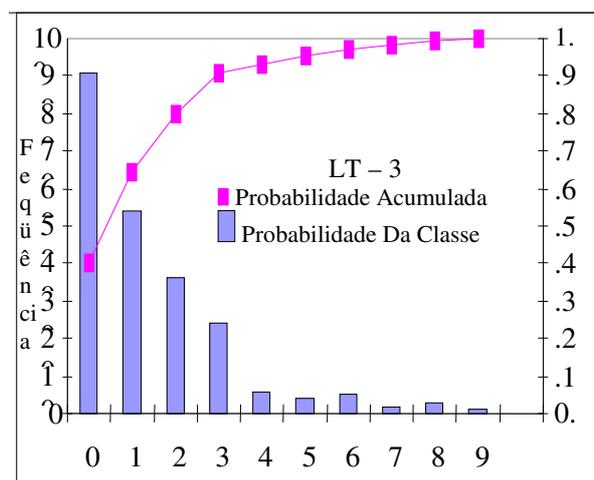
**A.1.3 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT – 3**

Para esta linha obtem-se o seguinte valor para coeficiente de correlação de Pearson : -0,1008.

Uma análise da distribuição da manutenção em função de suas respectivas ocorrências fornece a função de distribuição para a manutenção, mostrada a seguir sob forma tabular e gráfica:

**TABELA A.3 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 3**

Manutenções Mensais	Freqüência	Acumulativo %
0	91	40,27
1	54	64,16
2	36	80,09
3	24	90,71
4	6	93,36
5	4	95,13
6	5	97,35
7	2	98,23
8	3	99,56
9	1	100,00



**FIGURA - A.3 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 3**

Desta forma ao se considerar o conjunto de todos os eventos no qual se observam até 5 manutenções mensais, verifica-se que o mesmo é responsável por mais de 95 % das ocorrências de todas as manutenções. Este fato, é válido para esta linha em particular, e veremos à frente que esta ordem de grandeza se verifica para outras linhas. O coeficiente de Pearson considerando o conjunto das manutenções que acumulam 95% de todas as manutenções, é - 0.06. Observa-se dos resultados apresentados aqui, que também não existe uma correlação estatística significativa no conjunto de valores analisados.

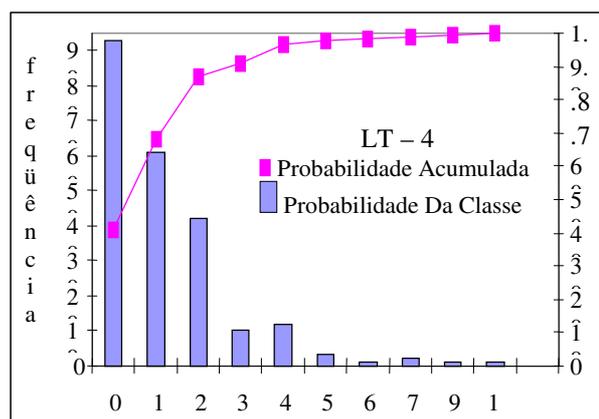
**A.1.4 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT – 4**

Para esta linha obtem-se o seguinte valor para coeficiente de correlação de Pearson : -0,0806.

Uma análise da distribuição da manutenção em função de suas respectivas ocorrências fornece a função de distribuição para a manutenção, mostrada a seguir sob forma tabular e gráfica:

**TABELA A.4 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 4**

Manutenções Mensais	Freqüência	Acumulativo %
0	93	41,15
1	61	68,14
2	42	86,73
3	10	91,15
4	12	96,46
5	3	97,79
6	1	98,23
7	2	99,12
9	1	99,56
11	1	100,00



**FIGURA – A.4 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 4**

Desta forma ao se considerar o conjunto de todos os eventos no qual se observam até 4 manutenções mensais, verifica-se que o mesmo é responsável por mais de 95 % das ocorrências de todas as manutenções. Este fato, é válido para esta linha em particular, e sendo esta, a ordem de grandeza se verifica para outras linhas. O coeficiente de Pearson considerando o conjunto das manutenções que acumulam 95% de todas as manutenções, é : - 0,052. Pode-se concluir dos resultados apresentados, que também aqui, não existe uma correlação estatística significativa no conjunto de valores analisados.

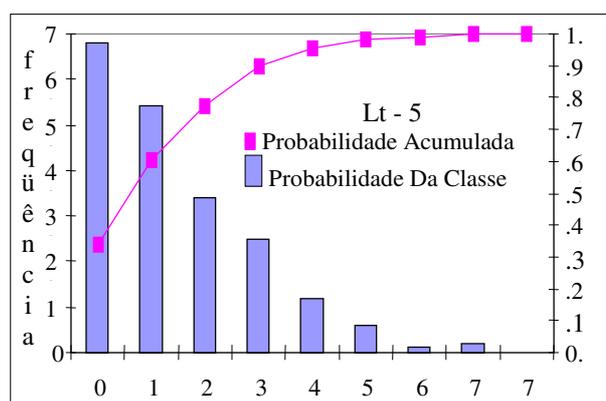
### A.1.5 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT – 5

Para esta linha obtém-se o seguinte valor para coeficiente de correlação de Pearson : -0,0811.

Uma análise da distribuição da manutenção em função de suas respectivas ocorrências fornece a função de distribuição para a manutenção, mostrada a seguir sob forma tabular e gráfica:

**TABELA A.5 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 5**

Manutenções Mensais	Frequência	Acumulativo %
0	68	33,66
1	54	60,40
2	34	77,23
3	25	89,60
4	12	95,54
5	6	98,51
6	1	99,01
7	2	100,00



**FIGURA – A.5 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 5**

Desta forma ao se considerar o conjunto de todos os eventos no qual se observa até 4 manutenções mensais, verifica-se que o mesmo é responsável por mais de 95 % das ocorrências de todas as manutenções. Este fato, é válido para esta linha em particular, sendo compatível com os valores das demais linhas. O coeficiente de Pearson considerando o conjunto das manutenções que acumulam 95% de todas as manutenções, é – 0,1023. Pode-se concluir dos resultados apresentados, que também aqui, não existe uma correlação estatística significativa no conjunto de valores analisados.

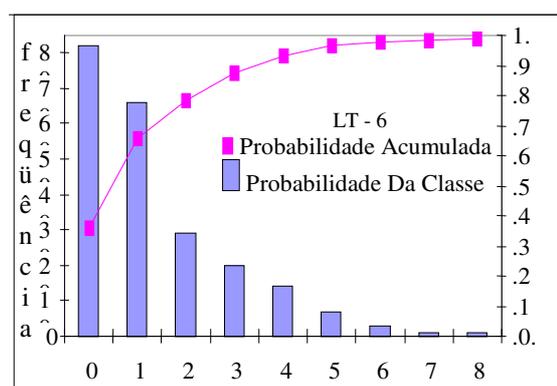
**A.1.6 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT – 6**

Para esta linha obtem-se o seguinte valor para coeficiente de correlação de Pearson : -0,0995.

Uma análise da distribuição da manutenção em função de suas respectivas ocorrências fornece a função de distribuição para a manutenção, mostrada a seguir sob forma tabular e gráfica:

**TABELA A.6 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 6**

Manutenções Mensais	Freqüência	Acumulativo %
0	47	50,00
1	26	77,66
2	7	85,11
3	6	91,49
4	1	92,55
5	2	94,68
7	1	95,74
8	4	100,00



**FIGURA – A.6 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 6**

Desta forma ao se considerar o conjunto de todos os eventos no qual se observam até 7 manutenções mensais, verifica-se que o mesmo é responsável por mais de 95 % das ocorrências de todas as manutenções. Este valor é válido para esta linha em particular sendo compatível com as demais linhas. O coeficiente de Pearson considerando o conjunto das manutenções que acumulam 95% de todas as manutenções, vale: - 0,07966. Pode-se concluir dos resultados apresentados, que também aqui, não existe uma correlação estatística significativa no conjunto de valores analisados.

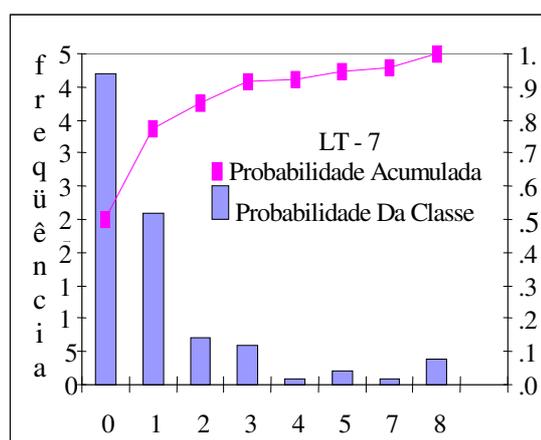
**A.1.7 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT – 7**

Para esta linha obtem-se o seguinte valor para o coeficiente de correlação de Pearson : -0,0955.

Uma análise da distribuição da manutenção em função de suas respectivas ocorrências fornece a função de distribuição para a manutenção, mostrada a seguir sob forma tabular e gráfica

**TABELA A.7 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 7**

Manutenções Mensais	Frequência	Acumulativo %
0	82	36,28
1	66	65,49
2	29	78,32
3	20	87,17
4	14	93,36
5	7	96,46
6	3	97,79
7	1	98,23
8	1	98,67



**FIGURA – A.7 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 7**

Desta forma ao se considerar o conjunto de todos os eventos no qual se observam até 5 manutenções mensais, verifica-se que o mesmo é responsável por mais de 95 % das ocorrências de todas as manutenções. Este valor é válido para esta linha em particular sendo compatível com as demais linhas. O coeficiente de Pearson considerando o conjunto das manutenções que acumulam 95% de todas as manutenções, vale:- 0,07966. Pode-se concluir dos resultados apresentados, que também aqui, não existe uma correlação estatística significativa no conjunto de valores analisados.

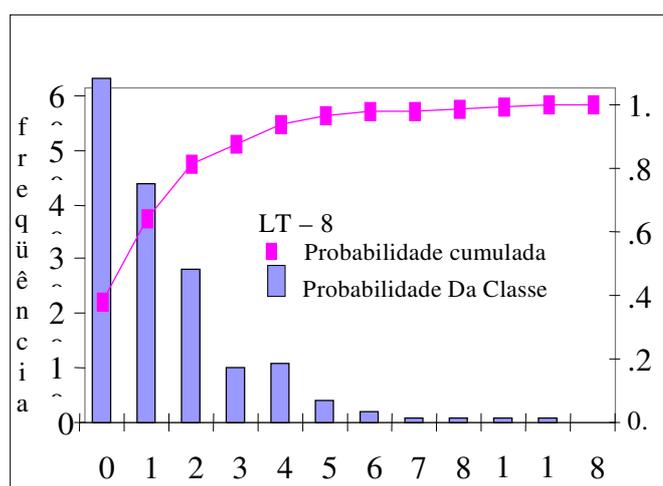
### A.1.8 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT – 8

Para esta linha obtem-se o seguinte valor para o coeficiente de correlação de Pearson : -0,1012

Uma análise da distribuição da manutenção em função de suas respectivas ocorrências fornece a função de distribuição para a manutenção, mostrada a seguir sob forma tabular e gráfica:

**TABELA A.8 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 8**

Manutenções Mensais	Frequência	Acumulativo %
0	63	37,95
1	44	64,46
2	28	81,32
3	10	87,35
4	11	93,97
5	4	96,38
6	2	97,59
7	1	98,18
8	1	98,79
10	1	99,39
12	1	100,00



**FIGURA – A.8 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 8**

Desta forma ao se considerar o conjunto de todos os eventos no qual se observam até 5 manutenções mensais, verifica-se que o mesmo é responsável por mais de 95 % das ocorrências de todas as manutenções. Este fato, é válido para esta linha em particular, e compatível com os demais. O coeficiente de Pearson considerando o conjunto das manutenções que acumulam 95% de todas as manutenções, vale: 0,00834. Pode-se concluir dos resultados apresentados, que também aqui, não existe uma correlação estatística significativa no conjunto de valores analisados.

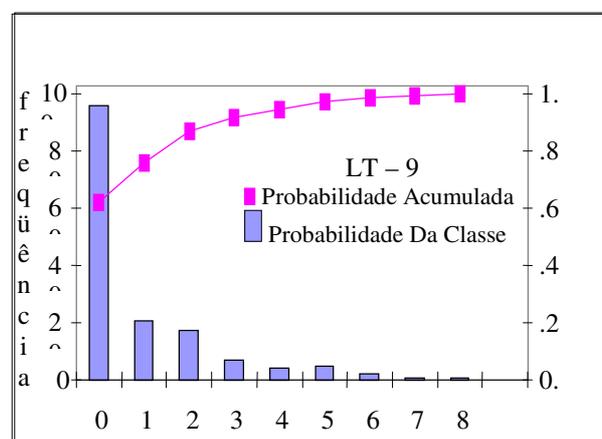
**A.1.9 RESULTADOS ASSOCIADOS À LT – 9**

Para esta linha obtem-se o seguinte valor para o coeficiente de correlação de Pearson =-0,0664.

Uma análise da distribuição da manutenção em função de suas respectivas ocorrências fornece a função de distribuição para a manutenção, mostrada a seguir sob forma tabular e gráfica:

**TABELA A.9 TABELA DA FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 9**

<i>Manutenções Mensais</i>	<i>Freqüência</i>	<i>Acumulativo %</i>
0	96	62,34
1	21	75,97
2	17	87,01
3	7	91,56
4	4	94,16
5	5	97,40
6	2	98,70
7	1	99,35
8	1	100,00



**FIGURA – A.9 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA LT 9**

Desta forma ao se considerar o conjunto de todos os eventos no qual se observam até 5 manutenções mensais, verifica-se que o mesmo é responsável por mais de 95 % das ocorrências de todas as manutenções. Este fato, é válido para esta linha em particular, e veremos à frente que esta ordem de grandeza se verifica para outras linhas. O coeficiente de Pearson considerando o conjunto das manutenções que acumulam 95% de todas as manutenções vale: - 0,051. Pode-se concluir dos resultados apresentados, que também aqui, não existe uma correlação estatística significativa no conjunto de valores analisados.

## **APÊNDICE B**

### **MATRIZES DE TRANSIÇÃO DE RISCO OBTIDAS**

Neste Apêndice são apresentadas as tabelas das Matrizes de Transição de Risco obtidas para as nove linhas analisadas.

Nestas tabelas tem-se que :

- o risco de todas as transições que começam na transição  $i$ , é dado pela soma da linha onde coluna atual for igual a  $i$ . O valor aí existente é obtido somando-se todas as colunas de uma mesma linha, e é uma medida do risco de todas as transições que começam na classe de manutenção  $i$  ou seja :

$$\sum_{k = \text{menor\_classe}}^{k = \text{maior\_classe}} \text{MTR} (i,k) \quad \text{B.3}$$

- o risco de todas as transições que terminam na transição  $i$ , é obtido somando-se todas as linhas de uma mesma coluna, e é uma medida do risco de todas as transições que terminam na classe de manutenção desta coluna, ou seja :

$$\sum_{k = \text{menor\_classe}}^{k = \text{maior\_classe}} \text{MTR} (k,i) \quad \text{B.2}$$





**TABELA B.4 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 4**

Classe Futura ⇒	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Risco Da Classe Atual
Classe Atual ↓											
0	0,083	0,055	0,055	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,233
1	0,061	0,032	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,115
2	0,062	0,024	0,132	0,000	0,079	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,297
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,119	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,119
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,237	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,237
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Risco da Classe Futura	0,207	0,111	0,445	0,040	0,198	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

**TABELA B.5 MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE RISCO DA LINHA 5**

Classe Futura ⇒	0	1	2	3	4	5	6	7	Risco Da Classe Atual
Classe Atual ↓									
0	0,043	0,031	0,028	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,101
1	0,035	0,000	0,031	0,028	0,000	0,000	0,000	0,000	0,093
2	0,037	0,035	0,000	0,278	0,000	0,000	0,000	0,000	0,350
3	0,046	0,062	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,108
4	0,000	0,069	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,069
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,278	0,000	0,000	0,278
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Risco da Classe Futura	0,161	0,197	0,059	0,306	0,000	0,278	0,000	0,000	1,000





APÊNDICE C

VALORES CRÍTICOS DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

DE ACORDO COM [15]

NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA PARA DE UMA CAUDA					NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA PARA UM TESTE TESTE DE UMA CAUDA				
	0,05	0,025	0,01	0,005	v	0,05	0,025	0,01	0,005
NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA PARA DE DUPLA CAUDA					NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA PARA UM TESTE TESTE DE DUPLA CAUDA				
v	0,10	0,05	0,02	0,01	v	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,988	0,997	0,9995	0,9999	24	0,330	0,388	0,453	0,49
2	0,900	0,950	0,98	0,990	26	0,317	0,374	0,437	0,47
3	0,805	0,878	0,93	0,959	28	0,306	0,361	0,423	0,46
4	0,729	0,811	0,88	0,917	30	0,296	0,349	0,409	0,44
5	0,669	0,755	0,83	0,875	35	0,275	0,325	0,381	0,41
6	0,622	0,707	0,78	0,834	40	0,257	0,304	0,358	0,39
7	0,582	0,666	0,75	0,798	45	0,243	0,288	0,338	0,37
8	0,549	0,632	0,71	0,765	50	0,231	0,273	0,322	0,35
9	0,521	0,602	0,68	0,735	55	0,220	0,261	0,307	0,33
10	0,497	0,576	0,65	0,708	60	0,211	0,250	0,295	0,32
11	0,476	0,553	0,63	0,684	70	0,195	0,232	0,274	0,30
12	0,458	0,532	0,61	0,661	80	0,183	0,217	0,256	0,28
13	0,441	0,514	0,59	0,641	90	0,173	0,205	0,242	0,26
14	0,426	0,497	0,57	0,623	100	0,164	0,195	0,230	0,25
15	0,412	0,482	0,55	0,606	120	0,150	0,178	0,210	0,23
16	0,400	0,468	0,54	0,590	150	0,134	0,159	0,189	0,20
17	0,389	0,456	0,52	0,575	200	0,116	0,138	0,164	0,18
18	0,378	0,444	0,51	0,561	300	0,095	0,113	0,134	0,14
19	0,369	0,433	0,50	0,549	400	0,082	0,098	0,116	0,12
20	0,360	0,423	0,49	0,537	500	0,073	0,088	0,104	0,11
22	0,344	0,404	0,47	0,515	1000	0,052	0,062	0,073	0,08

v - número de graus de liberdade,

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] **ENDRENY J.**; Reliability Modeling in Electrical Power Systems; John Wiley & Sons; New York; 1978,
- [2] **ANDERS A. J.**; Probability Concepts In Electrical Power Systems; John Wiley & Sons; USA; 1999
- [3] **FERREIRA D.** ; ANÁLISE DAS LEIS DE CONCESSÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS; Florianópolis; Intersindical dos Eletricitários do Sul do Brasil.
- [4] **SILVA E. L.** ; Formação de Preço em Mercados de Energia Elétrica; Editora SagraLuzzatto; Porto Alegre; 2001
- [5] **HUNT S., SHUTTLEWORTH G.** ; Competition and Choice in Electricity; John Wiley & Sons; USA; 1996
- [6] **BERNSTEIN S., BERNSTEIN R.** ; Elements Of Statistics II: Inferential Statistics; McGraw-Hill; USA; 1999
- [7] **SPIEGEL M. R.** ; Probability And Statistics; McGraw-Hill; USA; 1999
- [8] **UFSC-PPGEEL**; Notas De Aula das Disciplinas De Planejamento e Economia Do Mestrado Profissional; Florianópolis; 2000
- [9] **CLARKE B. A. , DISNEY R. L.** ; Probabilidade E Processos Estocásticos; Livraria Técnico Científica; Rio de Janeiro; 1979
- [10] **PAPOULLIS A.** ; Probability, Random Variables and Stochastic Processes; MCGraw-Hill; 1965; Tokyo

- [11] **BREIMAN L.** ; Probability and Stochastic Processes With a a View Toward Application; The Scientific Press; Palo Alto; 1986
- [12] **POLLATSCHEK M. A.** ; Programming Discrete Simulations – Tools for Modeling the Real World; R&D Books; Kansas; 1995
- [13] **[www.nmu.edu/politicalscience/profpages/Nelson/PS341/Statnotes.htm](http://www.nmu.edu/politicalscience/profpages/Nelson/PS341/Statnotes.htm)**  
Referência à classificações de valores dos coeficientes de Pearson.
- [14] **[traffic.ce.gatech.edu/nchrp2045/glossary.html](http://traffic.ce.gatech.edu/nchrp2045/glossary.html)**  
Referência à classificações de valores dos coeficientes de Pearson.
- [15] **[users.twave.net/gcappelletty/Stats1\\_05.htm](http://users.twave.net/gcappelletty/Stats1_05.htm)**  
Referência à classificações de valores dos coeficientes de Pearson.
- [16] **PENNA E. C., TONDELLO C.** ; Metodologia Para Estimção Da Parcela Variável Da Receita Das Empresas Transmissoras De Energia Elétrica; Trabalho Orientado do Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica Da UFSC; Florianópolis; 2000.
- [17] **TONDELLO C.** ; Uma Metodologia Para Gerenciamento Do Risco De Empresas De Transmissão; Dissertação De Mestrado do Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica Da UFSC; Florianópolis; 2001.
- [18] **DAVID A. K.** ; Risk Modeling In Energy Contracts Between Host Utilities and BOT Plant Investors, IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol 17 N° 2 Junho de 1997.

- [19] **TAMROUGLAK S.; HOOWITZ S.; PHADKE A . G.; THORP J. S. ;** Anatomy Of Power Blackouts: Preventive Relaying Strategies; Transactions on Power Delivery; Vol 11 N ° 2 Abril de 1996.
- [20] **WEBER E., et all ;** Reporting Bulk Power System Delivery Point Reliability - A Report By The IEEE Task Force On Bulk Power System Reliability Guidelines; IEEE TPAS Volume 11 n ° 3, Agosto de 1996.
- [21] **VEJDANI A. F.; WILLIAMS R.D.; GAMBEL W.; EN L.; SUDDETH B.N ;** Experience With Application Of Reliability And Values Service In System Planning; IEEE TPS Vol 11 n ° 3 Agosto de 1996.
- [22] **SILVEIRA A. SILVEIRA ;** Da Técnica À Análise De Custos: Moda Ou Deslocamento Histórico Da Engenharia; XIII Congresso Brasileiro De Automática Florianópolis; Setembro de 2000.
- [23] **FARAG A. S ;** Probability Techniques Application For Economics Operation Of Power Cables; Transactions on Power Delivery; Vol 14 N ° 3 ; Julho de 1999
- [24] **WANN H., MCALLEY J.D, FARAG A. S ;** Increasing Thermal Rating by Risk Analysis; Transactions on Power Systems; Vol 14 N ° 3 ; Agosto de 1999
- [25] **PEARSON D. ;** Engineering And Planning For Aging T&D Infrastructures; IEEE Power Engineering Society - Summer Meeting; 2000.
- [26] **LEE WILLIS H. ;** Panel Session On; Aging T&D Infrastructures And Customers Service Reliability; IEEE Power Engineering Society - Summer Meeting; Seattle Washington; 2000.

[27] **GOODFELLOW J. W.** ; Applying Reliability Centered Maintenance (RCM) To Overhead Electric Utility Distribution Systems; IEEE Power Engineering Society - Summer Meeting; Seattle Washington; 2000.

[28] **BEETHLER M. E.** ; Reliability Centered Maintenance For Transmission Systems; Transactions on Power Delivery; Vol 12 N<sup>o</sup> 3 ; Abril de 1997.

[29] **HENLEY E. J.; KUMAMOTO H.** ; Probability Risk Assessment Reliability Engineering, Design, And Analysis; IEEE Press, Piscataway, 1991