5
Modelo de Apoio à Decisão para Obtenção do Intervalo de Manutenção Programada do Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão

Neste capítulo, serão realizadas simulações tomando como base a estrutura formal do modelo markoviano apresentado no Capítulo 4. Deseja-se derivar conclusões sobre o intervalo entre manutenções dos equipamentos de proteção de sistemas elétricos.

O intervalo entre manutenções programadas será obtido relacionando-se os dados de confiabilidade disponíveis dos estados dos sistemas de proteção, tais como suas taxas de falha e probabilidades em regime permanente, com as penalidades incorridas devido às indisponibilidades programadas e não programadas dos equipamentos.

Para fins da análise de resultados do pagamento por indisponibilidade de equipamentos, será considerado que, quando o sistema de proteção estiver no estado de manutenção programada (TESTE) ou no de manutenção corretiva (FALHA), o respectivo equipamento protegido também ficará indisponível durante toda a duração da manutenção.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

5.1
Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do Modelo Markoviano em Função da Periodicidade da Manutenção Programada

Através das análises desenvolvidas nos Capítulos 3 e 4 para a determinação das probabilidades em regime permanente de cada estado do modelo markoviano do sistema de proteção, sendo o período total de observação de onze anos e com manutenções programadas realizadas a cada três anos, sugere-se estimar os seguintes parâmetros: a) freqüência de desligamentos indevidos do equipamento protegido por parte do sistema de proteção e freqüência de recusas de atuação da proteção considerando-se outros intervalos fixos de manutenção programada;

b) a taxa de falha da proteção para os novos intervalos fixos de manutenção programada.

Foi mostrado na Seção 3.4 que um determinado equipamento ou componente pode apresentar taxa de falha constante no intervalo $t + \Delta t$ e a partir daí, a taxa de falha apresentar gradual crescimento, podendo ser representada por exemplo, por uma função densidade de probabilidade de Weibull.

Supõe-se que a manutenção programada seja realizada em intervalos fixos de tempo e na região onde a taxa de falha é constante, ou seja, antes da taxa de falha atingir a região de desgaste na "curva da banheira", conforme ilustrado na Figura 5.1. Nesta região, a taxa de falha do sistema de proteção é representada por uma função densidade de probabilidade exponencial, cujo valor esperado é o inverso de sua taxa de falha.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

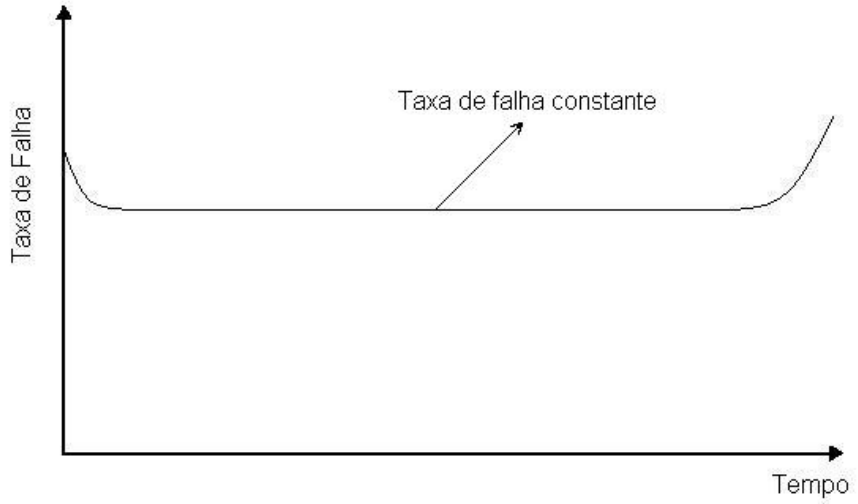

Figura 5.1 – Curva da Banheira Considerando-se um Intervalo Fixo de Manutenção Programada

5.1.1
Freqüência de Desligamentos Forçados dos Sistemas Protegidos Considerando Diferentes Intervalos Fixos de Manutenção Programada

No caso do sistema de proteção de linhas de transmissão, observou-se na Tabela 4.4 que, para o intervalo fixo entre manutenções programadas a cada

três anos, onde o período total de observação foi de onze anos, a taxa de falha da proteção de linhas de transmissão – λ_f foi de 5,0773e-5 falhas/hora.

Na Seção 3.4.1, verificou-se que a adoção de manutenção programada resulta na diminuição da taxa de falha de um determinado componente. Portanto, quanto maior for a freqüência fixa de manutenções programadas, maior será o tempo médio para falhas, ou menor será a taxa de falha, conforme ilustrado na Figura 5.2.

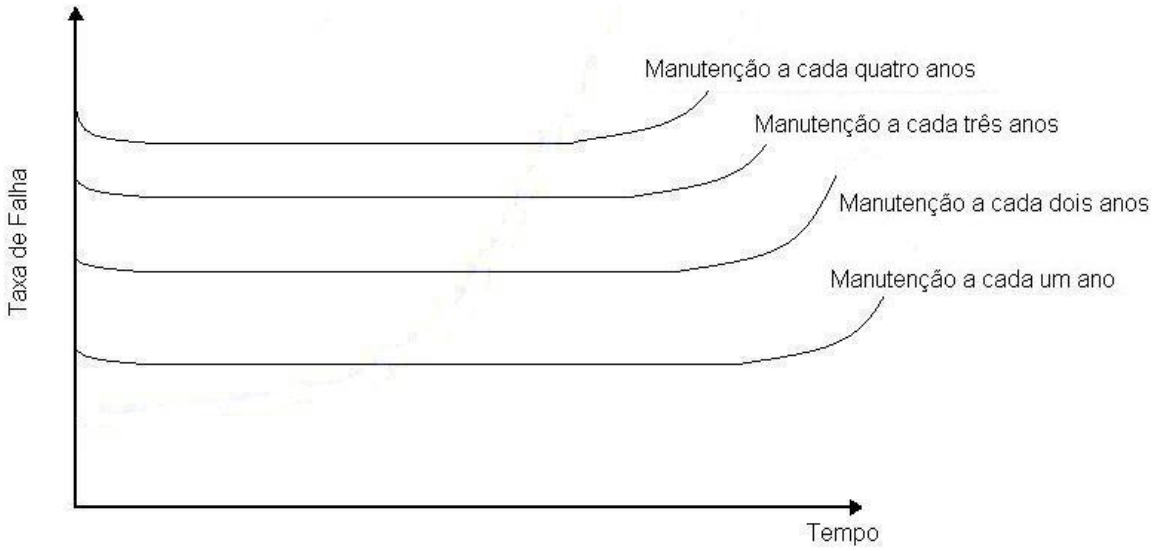

Figura 5.2 – Variação da Taxa de Falha em Função do Aumento do Intervalo de Manutenção Programada

A freqüência de desligamentos indevidos dos sistemas protegidos aumenta proporcionalmente com o aumento do intervalo entre manutenções, conforme pode ser observado na Figura 5.3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

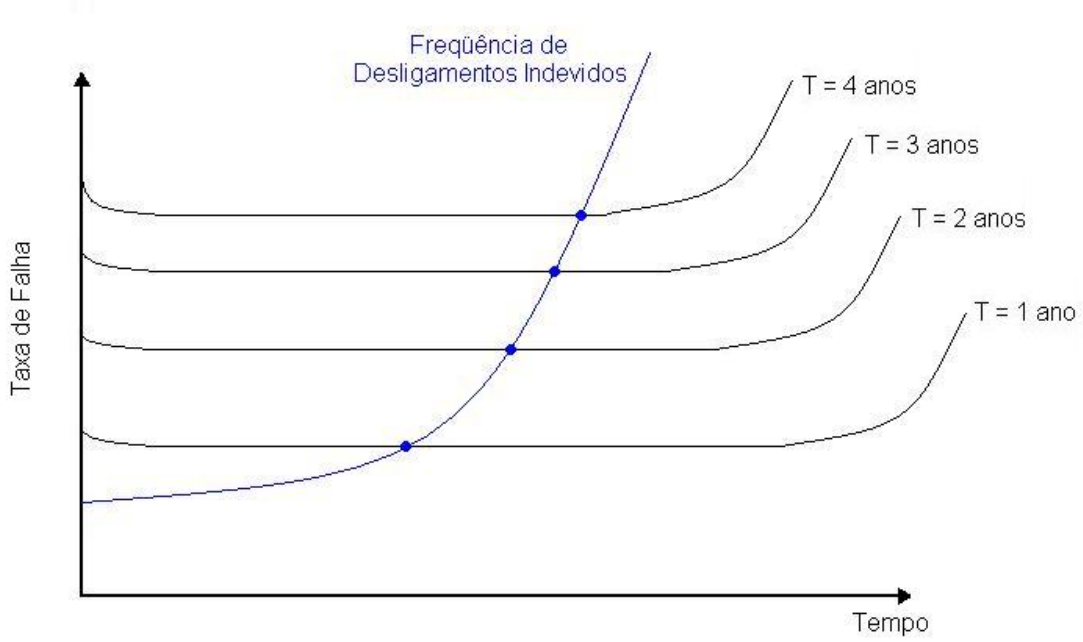

Figura 5.3 – Taxa de Falha em Função do Intervalo Fixo de Manutenções Programadas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Na Figura 5.3, para o intervalo fixo de manutenções programadas a cada um ano, obtém-se uma "curva da banheira" com sua respectiva taxa de falha. Caso as manutenções programadas fossem realizadas em intervalos fixos de dois anos, obtém-se uma nova "curva da banheira". Assim sucessivamente, determina-se, na região onde a taxa de falha é constante em cada "curva da banheira", o lugar geométrico das taxas de falhas para diferentes intervalos fixos de manutenção. Este lugar geométrico, conforme (4.31), é diretamente proporcional à freqüência de desligamentos indevidos dos sistemas protegidos.

Arbitra-se, para 3 casos, o crescimento da freqüência de desligamentos indevidos - F_e [occ / mês] em função do aumento do intervalo fixo de manutenção programada. No primeiro caso, apresentado na Tabela 5.1, a freqüência de desligamentos indevidos cresce levemente a medida que aumenta-se o intervalo fixo entre manutenções. Já no terceiro caso, apresentado na Tabela 5.2, a freqüência de desligamentos aumenta de forma significativa com o aumento do intervalo fixo entre manutenções. Uma freqüência de desligamentos intermediária aos casos 1 e 3 é apresentada no caso 2, Tabela 5.3.

O número de desligamentos indevidos do sistema protegido por parte dos equipamentos de proteção é calculado por:

$$\sum N^{o}(DESLIGAMENTOS) = F_e \cdot T \cdot \sum EQP \qquad (5.1)$$

No Apêndice A mostra-se que o sistema elétrico em análise possui 630 equipamentos de proteção de linhas de transmissão.

Tabela 5.1 – Freqüência de Falhas Devido a Desligamentos Indevidos do Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão para Diferentes Intervalos Fixos de Manutenções Programadas (Caso 1)

Subsistema de proteção	T [ano]	F_e [occ / mês]	Nº desligamentos
Linhas de transmissão	1	0,015119	114
Linhas de transmissão	2	0,022858	346
Linhas de transmissão	3	0,034558	784
Linhas de transmissão	4	0,052248	1578
Linhas de transmissão	5	0,078993	2986

Tabela 5.2 – Freqüência de Falhas Devido a Desligamentos Indevidos do Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão (Caso 2)

Subsistema de proteção	T [ano]	F_e [occ / mês]	Nº desligamentos
Linhas de transmissão	1	0,027101	204
Linhas de transmissão	2	0,030603	462
Linhas de transmissão	3	0,034558	784
Linhas de transmissão	4	0,039024	1181
Linhas de transmissão	5	0,044066	1666

Tabela 5.3 – Freqüência de Falhas Devido a Desligamentos Indevidos do Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão (Caso 3)

Subsistema de proteção	T [ano]	F_e [occ / mês]	Nº desligamentos
Linhas de transmissão	1	0,0032572	25
Linhas de transmissão	2	0,010610	161
Linhas de transmissão	3	0,034558	784
Linhas de transmissão	4	0,11256	3404
Linhas de transmissão	5	0,36665	13860

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Por construção, para o intervalo de manutenção programada a cada 3 anos, o número de desligamentos causados por falhas devido a desligamentos indevidos é de 784 nos três casos apresentados.

5.1.2
Freqüência de Falhas Devido a Recusas de Atuação da Proteção Considerando Diferentes Intervalos Fixos de Manutenção Programada

Utilizando-se o mesmo critério adotado na Seção 5.1.1, faz-se a determinação da variação da freqüência de falhas devido a recusas de atuação da proteção, onde o número de falhas causadas por recusas de atuação aumenta em função do aumento do intervalo fixo entre manutenções programadas. A variação da freqüência de falhas causadas por recusas de atuação da proteção em função da variação do intervalo fixo entre manutenções programadas para três casos distintos é mostrada respectivamente nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6.

Nas Tabela 5.4, 5.5 e 5.6 o número de falhas causadas por recusas de atuação da proteção é calculado por:

$$\sum Nº(RECUSAS) = F_r \cdot T \cdot \sum EQP \tag{5.2}$$

Tabela 5.4 – Freqüência de Falhas Causadas por Recusas de Atuação da Proteção de Linhas de Transmissão (Caso 1)

Subsistema de proteção	T [ano]	F_r [occ / mês]	Nº recusas
Linhas de transmissão	1	1,2511e-3	9
Linhas de transmissão	2	1,5653e-3	24
Linhas de transmissão	3	1,9583e-3	45
Linhas de transmissão	4	2,4501e-3	74
Linhas de transmissão	5	3,0653e-3	116

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Tabela 5.5 – Freqüência de Falhas Causadas por Recusas de Atuação da Proteção de Linhas de Transmissão (Caso 2)

Subsistema de proteção	T [ano]	F_r [occ / mês]	Nº recusas
Linhas de transmissão	1	1,6394e-3	14
Linhas de transmissão	2	1,7918e-3	27
Linhas de transmissão	3	1,9583e-3	45
Linhas de transmissão	4	2,1403e-3	65
Linhas de transmissão	5	2,3392e-3	85

Tabela 5.6 – Freqüência de Falhas Causadas por Recusas de Atuação da Proteção de Linhas de Transmissão (Caso 3)

Subsistema de proteção	T [ano]	F_r [occ / mês]	Nº recusas
Linhas de transmissão	1	0,26954e-3	3
Linhas de transmissão	2	0,72653e-3	11
Linhas de transmissão	3	1,9583e-3	45
Linhas de transmissão	4	5,2784e-3	160
Linhas de transmissão	5	14,228e-3	538

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

5.2
Relação entre a Taxa de Falha e o Aumento do Intervalo Fixo de Manutenção Programada do Sistema de Proteção

Com os dados referentes à freqüência de falhas devido a atuação indevida - F_e e causadas por recusas de atuação do sistema de proteção - F_r ; tempo médio de duração do reparo - r e tempo médio de duração da manutenção programada - m, determina-se a variação da taxa de falha do sistema de proteção de linhas de transmissão considerando-se diversas faixas de intervalos fixos de manutenção.

A taxa de falha em função do intervalo de manutenções programadas foi calculada no Capítulo 4, através de (4.31), e é repetida aqui por conveniência:

$$\lambda_f = \frac{\left(F_r + F_e\right)}{1 - F_t \cdot m - r \cdot \left(F_r + F_e\right)} \tag{5.3}$$

Na Figura 5.4, ilustra-se o lugar geométrico das variações da taxa de falha e do tempo médio para falha do sistema de proteção das linhas de transmissão, considerando-se diferentes intervalos fixos de manutenção programada. Para este resultado, foram considerados os dados apresentados no Caso 1 das Seções 5.1.1 e 5.1.2.

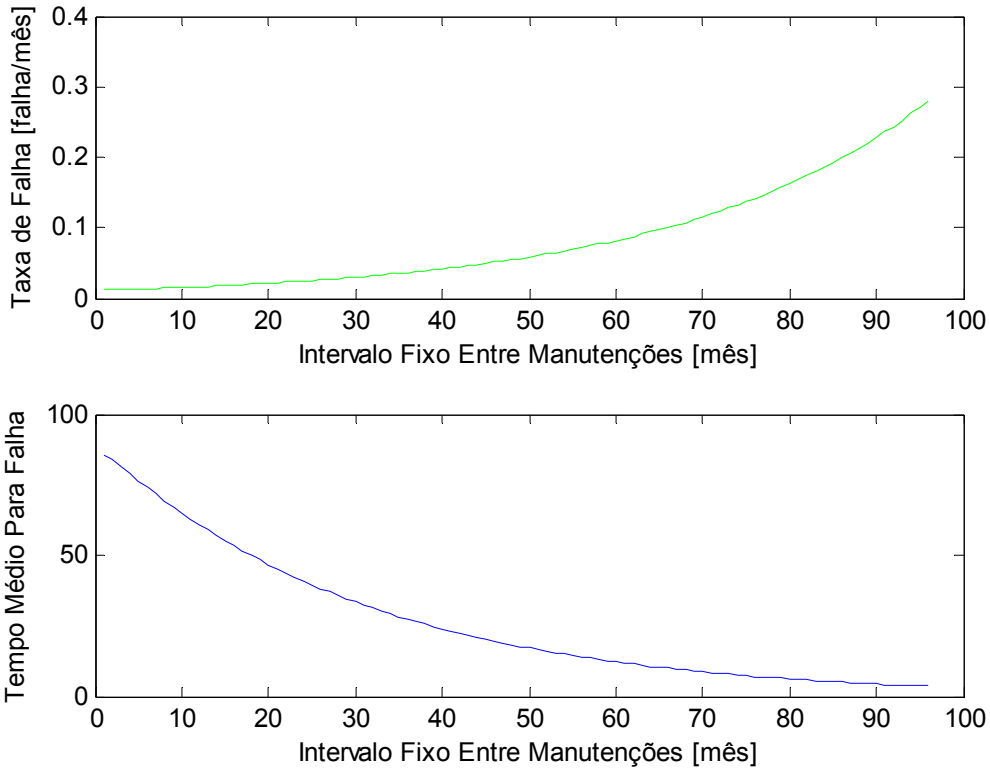

Figura 5.4 – Taxa de Falha e Tempo Médio para Falha em Função da Variação do Intervalo Fixo de Manutenção Programada

No cálculo do valor de λ_f em (5.3), os valores de *m* e *r* têm seus respectivos valores multiplicados por *720* para que sejam transformados em meses. Neste caso *m* é igual à 3,0207e-2 meses e *r* é igual à 6,0918e-3 meses.

Considerando-se a região da "curva da banheira" onde a taxa de falha é constante, representada por uma função densidade de probabilidade exponencial, o tempo médio para a falha é o inverso da taxa de falha, conforme descrito na Seção 3.4.2.

Observa-se, pela análise dos resultados apresentados na Figura 5.4 e Tabela 5.7, que a medida que a freqüência de manutenção - F_t aumenta, a taxa de falha

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

- λ_f irá aumentar, uma vez que as freqüências F_e e F_r também aumentam. Observa-se também que para intervalos fixos de manutenção a cada 3 anos, a taxa de falha do sistema de proteção é a mesma que a determinada no Capítulo 4 desta tese, como desejado.

Tabela 5.7 – Taxa de Falha e Tempo Médio para Falha em Função da Periodicidade da Manutenção

Subsistema	F_t *[mês]*	m *[h]*	r *[h]*	F_e *[occ/mês]*	F_r *[occ/mês]*	λ_f *[f/mês]*	*E[f]*
Linhas	1	20,095	4,3861	0,010350	1,0188e-3	1,1724e-2	85,29
Linhas	12	20,095	4,3861	0,015119	1,2511e-3	1,6413e-2	60,92
Linhas	24	20,095	4,3861	0,022858	1,5653e-3	2,4458e-2	40,88
Linhas	36	20,095	4,3861	0,034558	1,9583e-3	3,6556e-2	27,35
Linhas	48	20,095	4,3861	0,052248	2,4501e-3	5,4751e-2	17,65
Linhas	60	20,095	4,3861	0,078993	3,0653e-3	8,2141e-2	12,17
Linhas	72	20,095	4,3861	0,11943	3,8350e-3	12,341e-2	8,10
Linhas	84	20,095	4,3861	0,18056	4,7981e-3	18,564e-2	5,38
Linhas	96	20,095	4,3861	0,27299	6,0029e-3	27,956e-2	3,57

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

5.3
Probabilidades em Regime Permanente dos Estados do Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão em Função da Variação do Intervalo entre Manutenções

Com base em (4.40), (4.41) e (4.42), deduzidas no Capítulo 4, para determinar, respectivamente, as probabilidades em regime permanentes dos estados NORMAL, TESTE e FALHA, do modelo markoviano do sistema de proteção, calcula-se a variação destas probabilidades para diferentes intervalos fixos de manutenção do sistema de proteção de linhas de transmissão.

Novamente *m* e *r* permanecem os mesmos para qualquer intervalo fixo de manutenção. O que varia com a mudança do intervalo fixo entre manutenções são as freqüências de falhas causadas por desligamentos indevidos e falhas causadas por recusas de atuação do equipamento de proteção.

$$P_1 = \frac{1 - F_t \cdot m}{1 + \lambda_f \cdot r} \tag{5.4}$$

$$P_2 = F_t \cdot m \tag{5.5}$$

$$P_5 = \frac{\lambda_f \cdot (1 - F_t \cdot m) \cdot r}{1 + \lambda_f \cdot r} \tag{5.6}$$

Os resultados para o Caso 1 descrito nas Seções 5.1.1 e 5.1.2, são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Probabilidades em Regime Permanente do Modelos de Estados em Função do Intervalo entre Manutenções (Caso 1)

Subsistema	T [anos]	NORMAL	TESTE	FALHA
Linhas	1	0,9973830	0,00252	0,99723e-4
Linhas	2	0,9985926	0,00126	1,48781e-4
Linhas	3	0,9989385	0,00084	2,22453e-4
Linhas	4	0,9990375	0,00063	3,33212e-4
Linhas	5	0,9989967	0,00050	4,99886e-4
Linhas	6	0,9988296	0,00042	7,50900e-4

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Os resultados apresentados na Tabela 5.8 e na Figura 5.5 mostram que as probabilidades do sistema de proteção encontrarem-se no estado NORMAL crescem até que o intervalo fixo entre manutenções programadas seja aproximadamente de 4 anos (50 meses). A partir daí, as probabilidades de permanência no estado NORMAL começam a decrescer uma vez que a probabilidade de permanência no estado de FALHA aumenta com o aumento do intervalo fixo entre manutenções programadas, conforme ilustrado na Figura 5.6.

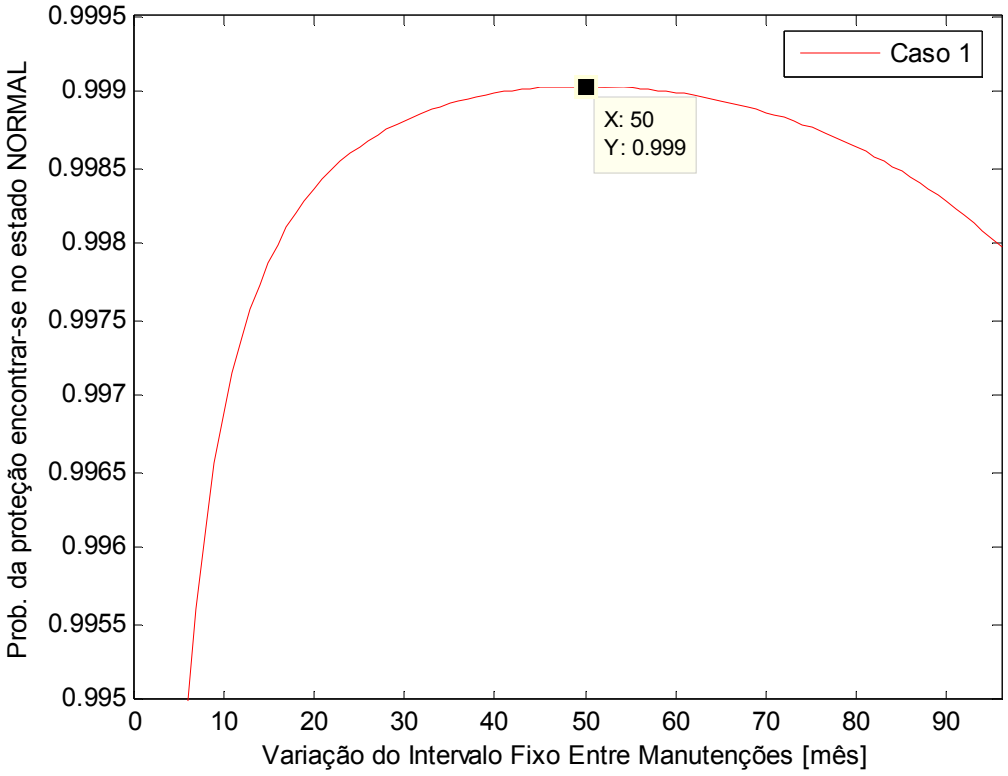

Figura 5.5 – Probabilidade de Permanência no Estado NORMAL em Função da Variação do Intervalo Fixo entre Manutenções Programadas (Caso 1)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

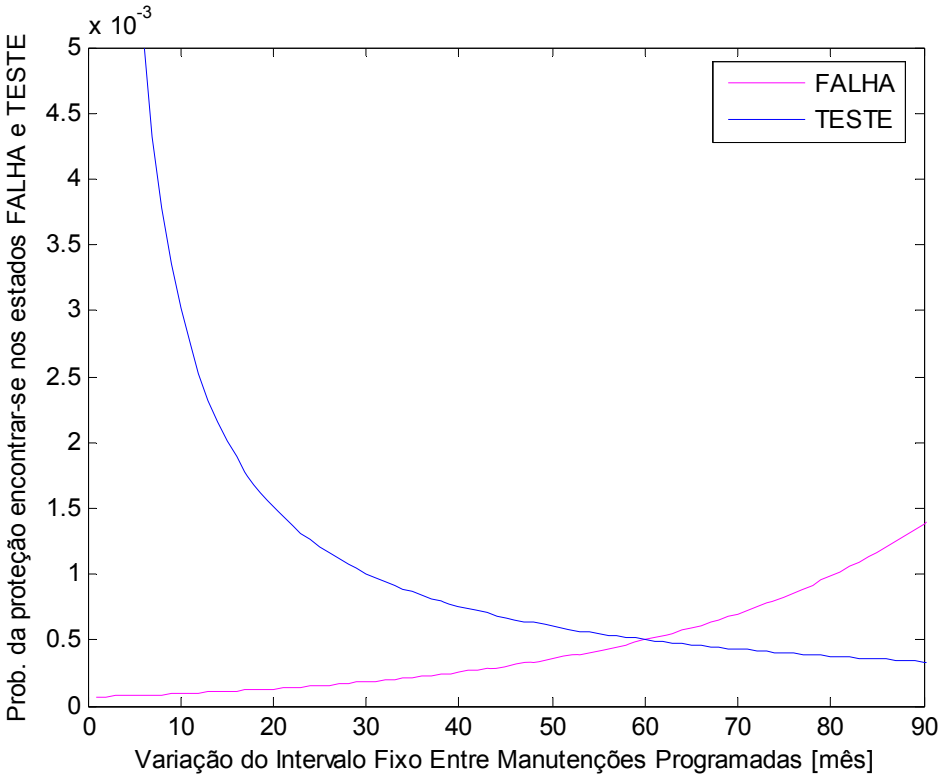

Figura 5.6 – Probabilidade de Permanência nos Estados FALHA e TESTE em Função da Variação do Intervalo Fixo entre Manutenções Programadas (Caso 1)

Pela simples análise dos resultados apresentados na Tabela 5.8 e nas Figuras 5.5 e 5.6, pode-se concluir que a cada 4 anos é necessário realização de manutenção programada no sistema de proteção. Em uma primeira análise, este intervalo entre fixo manutenções acarretaria em uma maior permanência no estado NORMAL do sistema de proteção de linhas de transmissão.

Para os Casos 2 e 3, os intervalos fixos entre manutenções programadas seriam, respectivamente, a cada 7,5 anos (90 meses) e a cada 2 anos (36 meses), conforme ilustrado nas Figuras 5.7 e 5.8.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

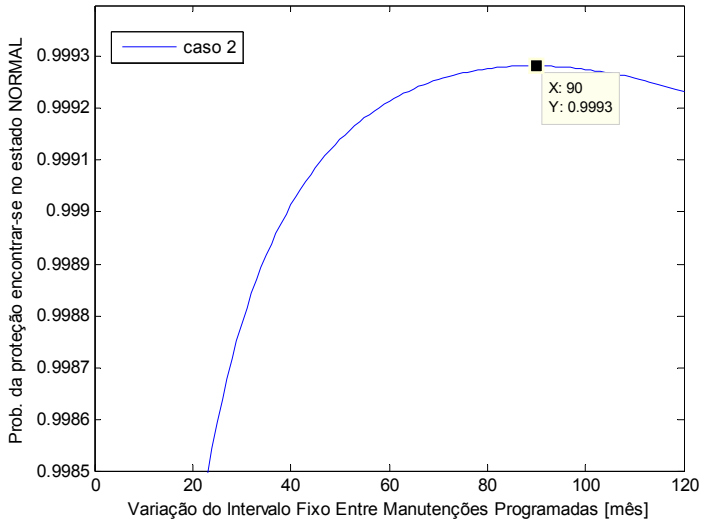

Figura 5.7 – Probabilidade de Permanência no Estado NORMAL em Função da Variação do Intervalo Fixo entre Manutenções Programadas (Caso 2)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

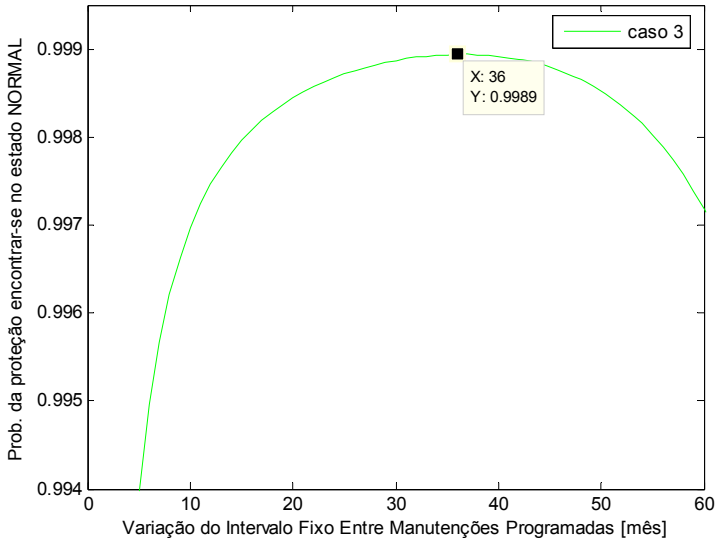

Figura 5.8 – Probabilidade de Permanência no Estado NORMAL em Função da Variação do Intervalo Fixo entre Manutenções Programadas (Caso 3)

No entanto, nestas análises não foram incluídos os efeitos de penalidades devido à interrupção de funcionamento dos equipamentos em função das manutenções programadas e não programadas na ocorrência de falha do sistema de proteção.

Observou-se no resultado, para o Caso 1, ilustrado na Tabela 5.8 e Figura 5.6, que a taxa de falhas no sistema de proteção das linhas de transmissão aumenta

consideravelmente devido ao acréscimo do intervalo fixo entre manutenções programadas. Deste modo, faz-se necessária a análise do risco a ser incorrido pela alternativa de aumentar-se o intervalo entre manutenções programadas.

Nas próximas seções, os efeitos das penalidades serão inseridos ao problema da determinação do intervalo de manutenção programada.

5.4
Cálculo do Desconto da Receita Anual Permitida Devido a Indisponibilidade do Sistema de Proteção

Para o cálculo da parcela variável referente à indisponibilidade de equipamentos de uma instalação elétrica, são necessárias informações contábeis da empresa. Os dados de confiabilidade adquiridos neste trabalho referem-se ao sistema de proteção de um sistema elétrico de grande porte. Entretanto, para a análise do problema em questão, esse sistema é muito amplo para o cálculo de penalidades por interrupção programada e não programada, uma vez que este possui inúmeras linhas de transmissão de energia e estas percorrem uma grande quantidade de territórios.

Para simplificar, determina-se o desconto da parcela variável sobre a RAP do sistema de linhas de transmissão da concessionária Sul Transmissão de Energia – STE, pelo fato desta empresa possuir apenas uma única linha de transmissão de energia.

Partindo da usina termelétrica de Uruguaiana, no Rio Grande do Sul, a linha de transmissão da STE atravessa treze municípios deste estado, até sua finalização na subestação de Santa Rosa, totalizando 389 km de comprimento, em rede de alta tensão de 230 kV [NTE-STE, 2008]

Para a implantação, operação e manutenção da instalação das linhas de transmissão da STE, foi determinada uma RAP de R$ 25.800.000,00 corrigida anualmente pelo IGP-M (Índice Geral de Preços do Mercado) e válida pelos primeiros 15 anos, contados a partir do início da operação comercial. No período

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

restante, a receita será reduzida a 50% do seu valor original corrigido [NTE-STE, 2008].

5.4.1
Cálculo da Parcela Variável

Conforme descrito no parágrafo 1º da cláusula 26ª do CPST padrão de 05/04/2004, a "*parcela variável por indisponibilidade de equipamentos*" é calculada segundo:

$$PV = \frac{PB}{24 \cdot 60 \cdot D}\left(\sum_{i=1}^{NP} K_{p_i} DDP_i\right) + \frac{PB}{24 \cdot 60 \cdot D}\left(\sum_{i=1}^{NO} K_{o_i} DOD_i\right) \qquad (5.7)$$

onde:

PV parcela variável por indisponibilidades de equipamentos,

PB parcela equivalente ao duodécimo da RAP, associada à plena disponibilização dos ativos que compõem uma instalação de uma empresa de transmissão de energia.

K_p fator para desligamentos programados, sendo $K_p = 10$

K_o fator para desligamentos não programados, sendo
$K_o = 150$ até a 5ª hora de desligamento não programado,
$K_o = K_p$ a partir da 5ª hora de desligamento não programado,

NP número de desligamentos programados da instalação durante o mês,

NO número de desligamentos não programados da instalação ao longo do mês,

D número de dias do mês,

DDP duração em minutos de cada desligamento programado que ocorra no mês,

DOD duração em minutos de cada desligamento não programado que ocorra no mês.

Segundo o “site” da STE, sua RAP é de R$ 25.800.000,00, portanto o Pagamento Base (mensal) da empresa é de R$ 2.150.000,00. Não há informações sobre o tempo médio de manutenção e o intervalo entre manutenções programadas da linha de transmissão da STE.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

5.4.1.1
Desconto da RAP Devido a Indisponibilidades Programadas

Para efeitos do cálculo da PV devido à indisponibilidade programada, utiliza-se o tempo médio de manutenção - *m* do subsistema de proteção de linhas de transmissão e supõe-se que durante a manutenção dos equipamentos de proteção as linhas de transmissão também ficarão indisponíveis. No caso do sistema de proteção de linhas de transmissão, o tempo médio de manutenção programada foi de 23,095 horas.

Para o desconto da RAP devido somente à indisponibilidade programada do sistema de proteção de linhas de transmissão, o fator para desligamentos não programados – K_0 é igual à zero. De acordo com (5.7):

$$PV = \frac{PB}{24 \cdot 60 \cdot D}\left(k_p \cdot F_t \cdot m \cdot K\right) \tag{5.8}$$

Onde *K* é o fator de conversão de unidade. No caso, a freqüência de manutenção - F_t ocorre a cada ano e a duração da manutenção - *m* é dada em horas, logo:

$$K = \left[\frac{manut}{ano}\right] \cdot \left[horas\right] = \left[\frac{horas}{ano}\right] = \frac{60\ meses}{12\ meses} = 5 \tag{5.9}$$

Portanto, a PV é determinada por:

$$PV = \frac{2.150.000{,}00}{24 \cdot 30 \cdot 60}\left(10 \cdot F_t \cdot m \cdot 5\right) \tag{5.10}$$

Para um intervalo fixo de uma manutenção a cada mês, o pagamento por indisponibilidade programada será de *R$ 689.642,36.* Este valor corresponde a 2,67% da RAP ou 32,08% do PB da empresa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

5.5
Desconto da RAP Devido a Indisponibilidades Programada e Não Programada em Função do Intervalo entre Manutenções

Na Tabela 5.9 mostra-se o desconto por indisponibilidade programada do sistema de proteção das linhas de transmissão da STE em função do aumento do intervalo fixo entre manutenções.

As probabilidades em regime permanente dos estados NORMAL e FALHA foram calculadas segundo os dados fornecidos pelo Caso 1, descritos nas Seções 5.1.1 e 5.1.3. Para o cálculo da variação da PV, divide-se o percentual do PB pelo intervalo de manutenções programadas.

Observa-se, na última coluna dos resultados apresentados na Tabela 5.9, que conforme o intervalo entre manutenções programadas aumenta, o valor do desconto da RAP devido à manutenção programada diminui. Por outro lado, conforme pode ser observado na penúltima coluna, a probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA aumenta com o aumento do intervalo entre manutenções programadas.

Caso uma falha ocorra antes da realização de uma manutenção programada, o desconto da RAP devido a realização da manutenção não programada será muito maior do que o desconto devido ao adiamento da manutenção programada no período considerado, uma vez que o fator de desligamentos não programados k_0 vale 150.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Tabela 5.9 – Desconto da RAP por Indisponibilidade Programada em Função da Variação da Periodicidade da Manutenção (Caso 1)

Subsistema de Proteção	Intervalo entre manutenções		Probab. permanência no estado NORMAL	Probab. permanência no estado FALHA	PV Programada [%]
	[mês]	[ano]			
Linhas	1	0	0,9697237	0,69260e-4	32,08
Linhas	2	0	0,9848249	0,71586e-4	16,04
Linhas	3	0	0,9898570	0,73993e-4	10,69
Linhas	4	0	0,9923718	0,76482e-4	8,02
Linhas	5	0	0,9938795	0,79056e-4	6,412
Linhas	6	0	0,9948838	0,81718e-4	5,35
Linhas	7	0	0,9956002	0,84471e-4	4,58
Linhas	8	0	0,9961368	0,87319e-4	4,01
Linhas	9	0	0,9965534	0,90265e-4	3,56
Linhas	10	0	0,9968860	0,93312e-4	3,21
Linhas	11	0	0,9971574	0,96463e-4	2,92
Linhas	12	1	0,9973830	0,99723e-4	2,67
Linhas	24	2	0,9985926	1,48781e-4	1,34
Linhas	36	3	0,9989385	2,22453e-4	0,89
Linhas	48	4	0,9990375	3,33212e-4	0,67
Linhas	60	5	0,9989967	4,99886e-4	0,53
Linhas	72	6	0,9988296	7,50900e-4	0,45
Linhas	84	7	0,9985112	11,2918e-4	0,38

Conclui-se que o risco incorrido devido ao adiamento da atividade de manutenção programada pode trazer significativas perdas financeiras à empresa. Na Seção 5.6, o risco de adiar-se a manutenção programada será avaliado de forma mais criteriosa, com base nos conceitos de Teoria do Consumidor (conceito de microeconomia), apresentado no Apêndice B.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

5.6
Determinação do Intervalo entre Manutenções Programadas em Função do Desconto da RAP por Indisponibilidades Programadas e Não Programadas

Serão determinados os intervalos entre manutenções programadas em função do desconto da RAP por indisponibilidade programada e não programada tendo como base o modelo de estados markovianos do sistema de proteção de linhas de transmissão de energia elétrica. Para este propósito, faz-se necessário a definição de Taxa Marginal de Substituição – *TMS*.

5.6.1
Taxa Marginal de Substituição

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Mostra-se na Figura 5.9 uma curva de indiferença do consumidor, conforme descrito no Apêndice B, para o caso onde há a opção de escolha entre pagar pouca penalidade devido a realização de manutenções programadas em intervalos curtos, ou adiar a manutenção programada e correr o risco de pagar por penalidades devido à falhas do sistema de proteção.

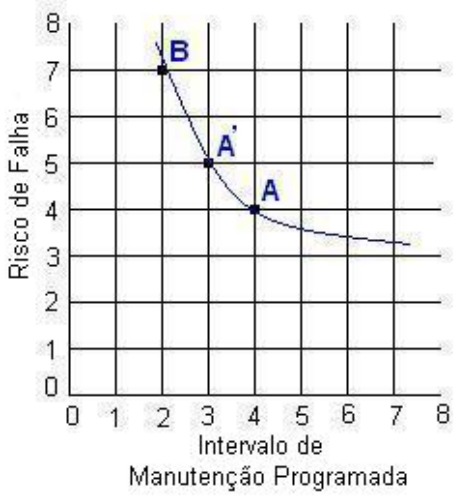

Figura 5.9 – Curva de Indiferença do Consumidor (Risco vs Penalidade)

Ao caminhar de *B* para *A*, está se admitindo que a diminuição da probabilidade de falha será compensada pelo aumento da freqüência de manutenções programadas. No entanto, a concessionária irá pagar mais pela realização de

manutenções programadas. A quantidade de um bem ou produto que um consumidor desiste em troca de outro é denominada Taxa Marginal de Substituição – *TMS* [Baídya et all, 1999].

Matematicamente, descreve-se a definição de *TMS* como:

$$TMS = -\frac{\Delta F}{\Delta PV} \tag{5.11}$$

onde *ΔF* é a variação da probabilidade de ocorrer falha e *ΔPV* é a variação da penalidade incorrida devido a realização de manutenções programadas. Como o valor de *ΔF* é sempre negativo, introduz-se um sinal negativo de tal modo que a *TMS* será sempre positiva.

Portanto, a TMS será o quociente, precedido pelo sinal negativo, entre a variação do termo do eixo da ordenada pela variação do termo do eixo da abscissa.

Quando a curva de indiferença for representada por meio de uma função contínua, pode-se definir a TMS como sendo o resultado do quociente, precedido pelo sinal negativo, entre os diferenciais dos dois produtos. Esta situação é ilustrada na Figura 5.10 [Baídya, et all, 1999].

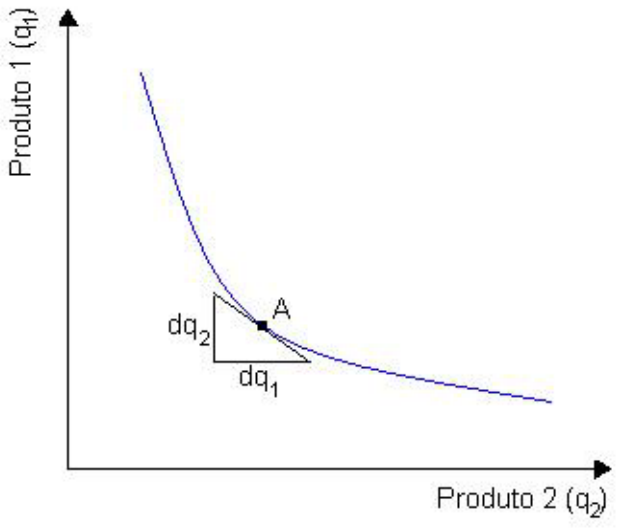

Figura 5.10 – Taxa Marginal de Substituição para uma Curva de Indiferença Contínua

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Assim, a *TMS* em *A* de q_1 por q_2 é definida como:

$$TMS = -\frac{dq_1}{dq_2} \tag{5.12}$$

A taxa marginal de substituição, em um ponto qualquer da curva de indiferença, será á derivada da variável da ordenada em relação à variável da abscissa, considerando sempre o sinal negativo.

Ilustra-se na Figura 5.11, a curva de indiferença e pontos onde foram calculados a *TMS*. Observa-se que quando o consumidor possui uma quantidade elevada do produto 2, como no caso do ponto *B*, ele admite perder uma grande quantidade do produto 2 para ser recompensado pelo ganho de uma unidade do produto 1.

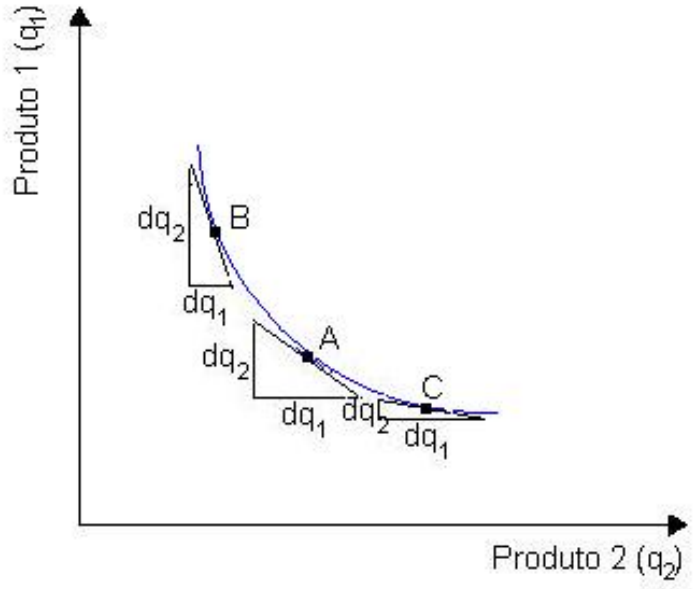

Figura 5.11 – Curva de Indiferença e Respectivas TMS

O equilíbrio é atingido no ponto *A* da curva de indiferença do consumidor. Neste ponto, a TMS é igual à um, ou seja, a perda de uma unidade do produto 1 é compensada com o ganho de uma unidade do produto 2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

5.6.2
Determinação dos Intervalos de Manutenção Programada Através da Análise da Taxa Marginal de Substituição

Na Tabela 5.9 mostrou-se, para o Caso 1, o desconto por indisponibilidade programada e não programada do sistema de proteção das linhas de transmissão da STE em função do aumento do intervalo entre manutenções.

Observa-se na Figura 5.12 que o desconto da RAP por indisponibilidade programada dos equipamentos diminui à medida que a probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA aumenta.

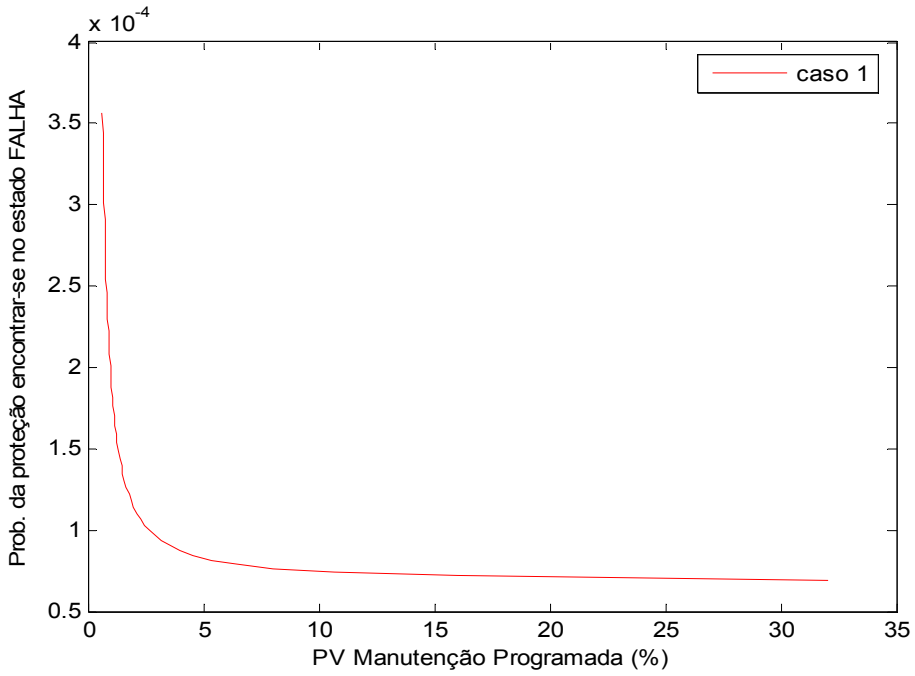

Figura 5.12 – Curva de Probabilidade de Falha *x* PV Programada

Através da análise da Figura 5.12 e dos conceitos de elasticidade – Risco da Parcela Variável, apresentado no Apêndice B, verifica-se que há pouca variação da PV quando o a probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA é elevada. Ou seja, a relação “ΔPV/PV” praticamente não é alterada, enquanto que a relação “ΔR/R” é passível de sofrer grandes variações. Nesta situação, o analista não acataria um nível da PV tão baixo em detrimento de um nível de risco extremamente elevado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Por outro lado, quando a probabilidade da proteção encontrar-se no estado FALHA atinge valores muito baixos, as PVs programadas atingem níveis tão elevados que pode inviabilizar economicamente o ativo de transmissão.

Faz-se necessário a determinação de um ponto na curva de "Probabilidade de Falha x PV programada", onde um decréscimo da probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA, é compensado por um aumento de mesma proporção na quantidade da PV. Este ponto pode ser obtido pela análise da Taxa Marginal de Substituição – *TMS*.

Calculou-se na Seção 5.3, para o Caso 1, que a probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado NORMAL é máxima quando o intervalo fixo entre manutenções programadas for de 4 em 4 anos. Determina-se a variação da TMS para cada freqüência de manutenção programada, segundo os dados apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Desconto da RAP do Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão por Indisponibilidade Programada e a Variação da *TMS* (Caso 1)

Subsistema de Proteção	Intervalo entre manutenções		Probab. proteção no estado FALHA F	PV Progr.	ΔF	ΔPV	TMS
	[mês]	[ano]		[%]	[%]	[%]	
Linhas	1	0	0,69260e-4	32,08	0,032502	0,50	0,0650
Linhas	2	0	0,71586e-4	16,04	0,032522	0,3333	0,0976
Linhas	3	0	0,73993e-4	10,69	0,032541	0,25	0,1302
Linhas	12	1	0,99723e-4	2,67	0,032702	0,769	0,4251
Linhas	24	2	1,48781e-4	1,34	0,032889	0,4	0,7890
Linhas	29		1,75886e-4	1,11	0,032958	0,333	0,9888
Linhas	30		1,81881e-4	1,07	0,032972	0,322	1,0221
Linhas	31		1,88082e-4	1,03	0,032985	0,312	1,0555
Linhas	36	3	2,22453e-4	0,89	0,033048	0,270	1,2228
Linhas	48	4	3,33213e-4	0,67	0,033181	0,204	1,6259
Linhas	50		3,356481e-4	0,64	0,033202	0,196	1,6933

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Na Tabela 5.10, ΔF e ΔPV foram calculados respectivamente por:

$$\Delta F_i = \frac{F_{i+1} - F_i}{F_{i+1}} \tag{5.13}$$

$$\Delta PV_i = \frac{PV_{i+1} - PV_i}{PV_{i+1}} \tag{5.14}$$

Para o Caso 1, a TMS é aproximadamente igual a um, quando o intervalo entre manutenções programadas ocorrer a cada 30 meses (2 anos e 6 meses). Neste ponto, o nível de risco associado à falha do sistema de proteção estará em equilíbrio com o nível pagamento de parcela variável referente à manutenção programada. A probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA é de *1,81881e-4*.

Para um intervalo entre manutenções programadas a cada 50 meses, que é a probabilidade máxima do sistema de proteção encontrar-se no estado NORMAL, a probabilidade deste sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA é de *3,356481e-4*. Portanto, há uma redução de aproximadamente 51,02% [(1,81881e-4 * 100)/3,356481e-4] de risco de ocorrer falha do sistema de proteção caso a manutenção programada seja realizada a cada 30 meses. Por outro lado, a variação da parcela variável devido à manutenção programada aumenta aproximadamente 67% [(1,07*100)/0,64], devido ao aumento de 20 meses do intervalo fixo entre manutenções programadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

5.6.2.1
Modelo de Seleção do Nível de Risco e da Parcela Variável [Barros e Melo, 2006]

Apresenta-se o trabalho de Barros e Melo [Barros e Melo, 2006] a título de comparação de resultados. Mostrou-se que a curva de variação do risco em função da parcela variável tem um comportamento semelhante ao da Figura 5.13 [Barros e Melo, 2006], dado que se o risco aumenta a parcela variável diminui. Ou seja, se a empresa ou investidor desejar assumir uma PV menor, ela estará sujeita a trabalhar com um nível de risco maior. Na curva de variação do risco em função da parcela variável, Figura 5.13, observa-se que no intervalo [A-B] a taxa de decrescimento do nível de risco é mais acentuada que no intervalo [B-C],

sendo o ponto “B” da curva de nível de Risco x PV o local onde ocorre a mudança do nível de decrescimento.

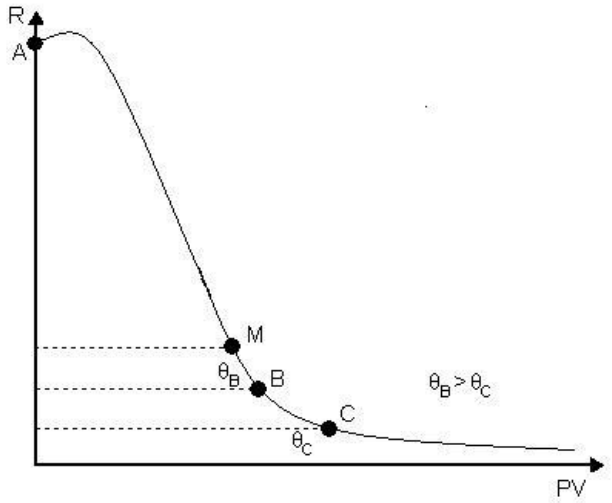

Figura 5.13 – Curva do Nível de Risco *vs* PV

Estas características peculiares das taxas de decrescimentos dos níveis de risco permitem o traçado de uma curva de *trade-off* “R x ΔR/ΔPV” com comportamento semelhante ao da Figura 5.14 [Barros e Melo, 2006], onde a inversão do sinal da derivada ocorre no ponto “B”. Isto significa que a derivada no ponto “B” é maior que no ponto “C”, conseqüentemente $\theta_B > \theta_C$, conforme indicado na Figura 5.13.

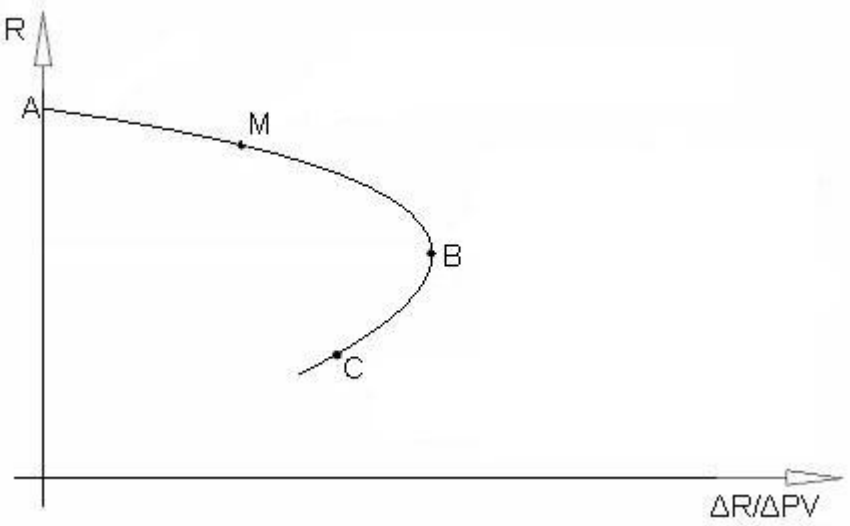

Figura 5.14 – Curva Característica “R *vs* ΔR/ΔPV”

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Como pode ser observado na curva característica “R *x* ΔR/ΔPV”, no intervalo [A-B] o nível de risco associado à PV diminui enquanto a relação “ΔR/ΔPV” aumenta. Já no intervalo [B-C], apesar do nível de risco diminuir, a relação “ΔR/ΔPV” diminui. Chama-se a atenção de que, em ambos os intervalos, os níveis de parcelas variáveis aumentam.

5.6.3
Determinação da Curva “Risco x ΔR/ΔPV” do Problema em Análise

A curva Nível de Risco x Parcela Variável apresenta as mesmas características da curva Probabilidade de Falha x Parcela Variável, ilustrada na Figura 5.12, onde seus respectivos pontos são mostrados novamente na Tabela 5.11.

Os riscos representam as probabilidades de existirem valores de penalidades por indisponibilidades superiores ao montante que está sendo considerado, ou seja, representam as probabilidades de haver penalidades devido à ocorrência de manutenção não programada.

Tabela 5.11 – “Risco *vs* ΔR/ΔPV” (Caso 1)

Subsistema de Proteção	Intervalo entre manutenções		Probab. permanência no estado FALHA	ΔR	ΔPV	ΔR/ΔPV
	[mês]	[ano]	F	[%]	[%]	
Linhas	1	0	0,69260e-4	1443840	36,08	40018
Linhas	2	0	0,71586e-4	1396911	18,04	77434
Linhas	3	0	0,73993e-4	1351481	12,03	112374
Linhas	12	1	0,99723e-4	1002780	3,01	333519
Linhas	24	2	1,48781e-4	672126	1,50	447090
Linhas	30		1,81881e-4	549810	1,20	457159
Linhas	36	3	2,22453e-4	449531	1,00	448534
Linhas	48	4	3,33213e-4	200044	0,75	332668
Linhas	60	5	4,99888e-4	133172	0,60	26574
Linhas		∞	1,00	1	0,00	Indef.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Na Tabela 5.11, assume-se que a probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA é máxima, quando seu valor for igual a 1. Neste caso, o risco de falha será de 100% e a parcela variável por indisponibilidade programada igual a 0.

Considerando-se o risco máximo de 100%, a variação proporcional do risco – *ΔR*, para cada intervalo de manutenção programada foi calcula por:

$$\Delta R_i = \frac{100 - F_i}{F_i} \tag{5.15}$$

Utilizando-se as mesmas informações contidas na Tabela 5.11 para a determinação da curva "Probabilidade de Falha x PV Programada", determina-se a curva "R x ΔR/ΔPV", apresentada na Figura 5.15.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

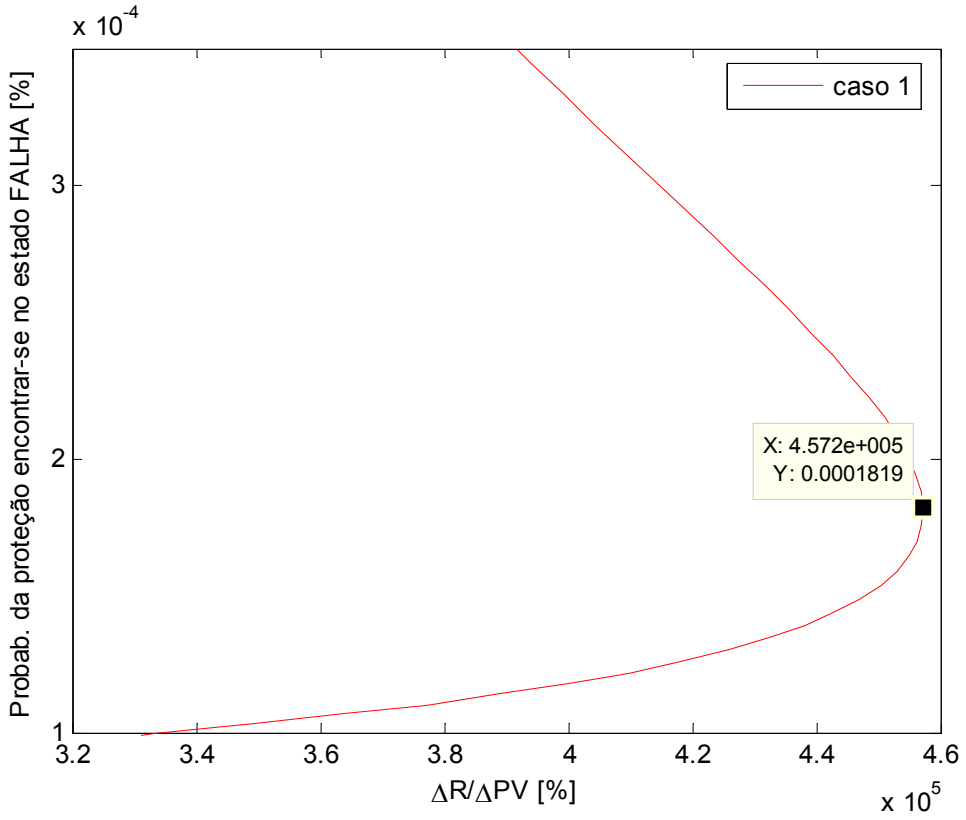

Figura 5.15 – Variação da Probabilidade da Proteção Encontrar-se no Estado FALHA *vs* ΔR/ΔPV

Observa-se na Figura 5.15 que o ponto onde ocorre a mudança da inclinação da tangente à curva corresponde ao nível de risco de 1,81881e-4. De acordo com a Tabela 5.11, o intervalo fixo de manutenção programada correspondente a este nível de risco é a cada 30 meses.

Portanto, verifica-se que o método da Taxa Marginal de Substituição e o método da curva do "Nível de Risco x PV" apresentam como resultado, o mesmo período para realização de manutenção programada. Isto ocorre porque ambos os métodos utilizam como parâmetro a variação proporcional na quantidade da PV em função de uma variação proporcional no risco.

5.6.4
Estabelecimento dos Níveis de Riscos Aceitáveis (Restrições do Problema)

Tendo em vista que o objetivo da concessionária consiste em estabelecer uma estratégia que minimize tanto o nível de risco como o da PV, e conseqüentemente a relação "ΔR/ΔPV", devem ser estabelecidos critérios para a determinação do intervalo ideal de manutenção programada.

Em 1998, Young [Young, 1998] propôs um modelo de otimização de portfólio onde as incertezas com relação aos retornos dos ativos candidatos são representadas de forma discreta através de cenários, e que utiliza como medida de risco o resultado do cenário de pior retorno.

Supõe-se que, escolhido um determinado modelo, ocorrerá o pior evento possível. A alternativa será escolhida como aquela que tem a melhor entre as piores opções de todas as alternativas. Em outras palavras, deve-se determinar o lucro mínimo para cada alternativa e, em seguida, escolher a alternativa com o maior lucro mínimo. Por outro lado, se a decisão for tomada em cima de custos (ao invés de lucros), deve-se minimizar o custo máximo. Desta forma, deve-se adotar o critério análogo ao critério Maximin, que é o critério Minimax. Este tipo de estratégia é conhecida como *pessimista ao extremo*.

Matematicamente, este critério é dado pela seguinte relação:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

$$Rd_{Mini\max R} = \underset{R_i}{Min}\left\{ \underset{\theta_j}{Max} V\left(R_i, \theta_j\right)\right\} \quad (5.16)$$

onde,

$$\theta_j = \frac{\Delta R_j}{\Delta PV_j}$$

Através dos resultados apresentados na Tabela 5.11, pode-se concluir que a estratégia Minimax de Risco é optar pela realização de manutenções programadas a cada mês. Entretanto, o Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão estabelece um limite máximo de desconto da parcela variável em 12,5%, cabendo penalidades às concessionárias que ultrapassarem este valor. Tendo em vista esta condição, e observando-se os cálculos apresentados na Tabela 5.9, o intervalo mínimo entre manutenções programadas deverá ser de 3 em 3 meses, cujo custo representa 10,69% do pagamento base mensal da empresa. A probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA, correspondente à esta parcela variável é de 0,73993e-4, conforme observado na Tabela 5.11.

Uma vez que a inversão do sinal da derivada ocorre no ponto B da curva “R x ΔR/ΔPV”, cujo valor da relação “ΔR/ΔPV” é máximo, conforme ilustrado na Figura 5.12, a estratégia Maximax PV (estratégia otimista ao extremo) representará a outra restrição do problema.
Neste critério, o decisor escolhe a estratégia que maximiza o máximo benefício possível, conseqüentemente a relação ΔR/ΔPV é a mais favorável [Barros e Melo, 2006].

Matematicamente, este critério é definido por:

$$Rd_{Maxi\max PV} = Rd_{Mini\min R} = \underset{R_i}{Max}\left\{ \underset{\theta_j}{Max} V\left(R_i, \theta_j\right)\right\} \quad (5.17)$$

De acordo com o apresentado na Tabela 5.11, a estratégia mais otimista seria a realização de manutenções programadas a cada 30 meses, que corresponde a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

probabilidade de 1,81881e-4 do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA.

5.6.4.1
Critério de Seleção do Nível de Risco Máximo Aceitável

O último passo consiste em selecionar o nível de risco máximo aceitável que atenda aos requisitos de mínimo nível de risco "R" e menor "PV". Para atender a estes requisitos conflitantes é proposta a regra de decisão $Rd_{Hurwicz}$, baseada no *critério de* Hurwicz (critério do realismo), o qual se baseia na seguinte expressão:

$$Rd_{Hurwicz} = \underset{R_i}{Min}\left\{\alpha \cdot \underset{\theta_j}{Min}V\left(R_i,\theta_j\right)+\left(1-\alpha\right)\cdot \underset{\theta_j}{Max}V\left(R_i,\theta_j\right)\right\} \qquad (5.18)$$

Como pode ser observado, este critério pondera os dois critérios descritos anteriormente, através do parâmetro "α" (0 < α < 1) denominado de "*índice de otimismo*" do decisor. Nota-se que, se *α = 1* o critério reduz-se a estratégia Minimin risco e para *α = 0* a expressão reduz-se a estratégia Minimax risco.

Os níveis de risco que estão situados entre as estratégias Minimax e Minimin pertencem ao conjunto "Ω" denominado Fronteira de Eficiência de Risco [Barros e Melo, 2006]

Na Tabela 5.12, calcula-se o intervalo de manutenção programada para 6 pontos pertencentes ao conjunto "Ω".

Por exemplo, utilizando-se o índice de otimismo *α = 0,2,* a probabilidade do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA é de *0,95571e-4*, que corresponde a um intervalo entre manutenções de 11 meses.

$$Rd_{Hurwicz} = \underset{R_i}{Min}\left\{0{,}2\cdot \underset{\theta_j}{Min}V\left(R_i,\theta_j\right)+\left(0{,}8\right)\cdot \underset{\theta_j}{Max}V\left(R_i,\theta_j\right)\right\} = 0{,}95571e-4$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Tabela 5.12 – Intervalos entre Manutenções Contidos na Fronteira de Eficiência de Risco

Critério	Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão		Intervalo entre Manutenções
	Prob. FALHA	Parcela Variável	mês
Minimax Risco (α=0)	0,73993e-4	10,69 %	3
Hurwicz (α=0,2)	0,95571e-4	3,28%	11
Hurwicz (α=0,4)	1,17148e-4	2,12%	17
Hurwicz (α=0,6)	1,38725e-4	1,64%	22
Hurwicz (α=0,8)	1,60303e-4	1,39%	27
Minimin Risco (α=1)	1,81881e-4	1,20	30

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Portanto, a concessionária planejará o intervalo entre manutenções programadas de acordo com os interesses da empresa. Pode-se dizer que, para o Caso 1, o intervalo entre manutenções programadas poderá ser escolhido dentro dos limites da Fronteira de Eficiência de Risco, que varia de 3 a 30 meses.

No que se refere ao Caso 2, de acordo com que foi apresentado na Seção 5.3, o intervalo ótimo de manutenção programada, quando não são inseridos ao problema os efeitos das penalidades por indisponibilidades, é a cada 90 meses, conforme ilustrado na Figura 5.7.

Observa-se na Tabela 5.13 que as variações das probabilidades do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA apresentam pouca variação na faixa que abrange os intervalos entre manutenções programadas de 1 mês à 101 meses.

Tabela 5.13 – "Risco *vs* ΔR/ΔPV" (Caso 2)

Subsistema de Proteção	Intervalo entre manutenções		Probab. proteção no estado FALHA	PV Progr.	ΔR	ΔR/ΔPV	TMS
	[mês]	[ano]		[%]	[%]	[%]	
Linhas	1	0	1,56897e-4	32,08	637359	1,767e 4	0,0198
Linhas	2	0	1,58469e-4	16,04	631037	3,498e4	0,0297
Linhas	3	0	1,60056e-4	10,69	624778	5,195e4	0,0397
Linhas	12	1	1,75283e-4	2,67	571157	1,900e5	0,1289
Linhas	24	2	1,97345e-4	1,34	506725	3,371e5	0,2481
Linhas	36	3	2,22450e-4	0,89	449537	4,485e5	0,3674
Linhas	48	4	2,50763e-4	0,67	398782	5,305e5	0,4868
Linhas	60	5	2,82694e-4	0,53	353739	5,883e5	0,6063
Linhas	72	6	3,18707e-4	0,49	313767	6,261e5	0,7259
Linhas	84	7	3,59325e-4	0,48	278298	6,479e5	0,8456
Linhas	90		3,81543e-4	0,35	262092	6e538e5	0,9055
Linhas	96	8	4,05140e-4	0,33	246827	6,567e5	0,9655
Linhas	99		4,17482e-4	0,324	239530	6,572e5	0,9953
Linhas	100		4,21679e-4	0,320	237146	5,573e5	1,0053
Linhas	101		4,25919e-4	0,317	234785	6,572e5	1,0153
Linhas		∞	1,00	1	0,00	Indef.	∞

Por este motivo, o ponto onde a derivada muda de sinal na curva do Nível de Risco x ΔR/ΔPV, ilustrada na Figura 5.16 e Tabela 5.13, corresponde à probabilidade de 4,21679e-4, que equivale a um intervalo de manutenção programada a cada 100 meses.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

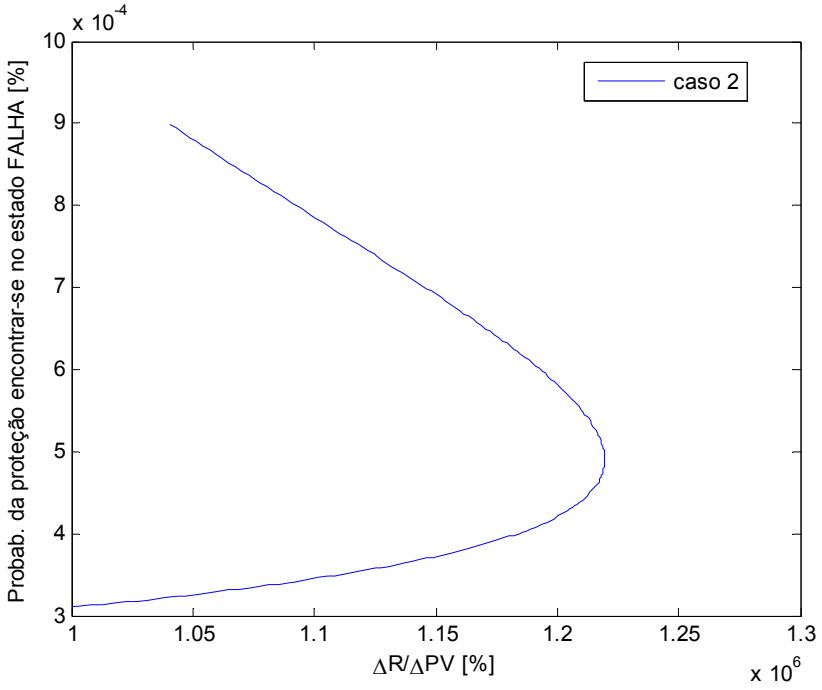

Figura 5.16 – Variação da Probabilidade da Proteção Encontrar-se no Estado FALHA *vs* ΔR/ΔPV (Caso 2)

O Caso 2, corresponde a situação onde a extensão da diferença entre a estratégia em que a relação ΔR/ΔPV é a mais favorável e a estratégia onde o risco é mínimo, abrange um grande intervalo de tempo, ou seja a Fronteira de Eficiência de Risco é muito grande uma vez que a variação das probabilidades do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA é pequena.

Os resultados da decisão segundo o critério de Hurwicz é apresentado na Tabela 5.14

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Tabela 5.14 – Intervalos entre Manutenções em Função dos Critérios (Caso 2)

Critério	Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão		Intervalo entre Manutenções
	Prob. FALHA	Parcela Variável	mês
Minimax Risco (α=0)	1,60056e-4	10,69 %	3
Hurwicz (α=0,2)	2,12238e-4	1,175%	32
Hurwicz (α=0,4)	2,6470e-4	0,95%	38
Hurwicz (α=0,6)	3,17003e-4	0,51%	71
Hurwicz (α=0,8)	3,69354e-4	0,42%	87
Minimin Risco (α=1)	4,21679e-4	0,36	100

Com relação ao Caso 3, observou-se na Seção 5.3 que a freqüência de falha aumenta consideravelmente a medida que a freqüência de manutenções programadas diminui. Desta forma, a variação das probabilidades do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA cresce consideravelmente, conforme apresentado na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Desconto da RAP do Sistema de Proteção de Linhas de Transmissão por Indisponibilidade Programada e a Variação da *TMS* (Caso 3)

Subsistema de Proteção	Intervalo entre manutenções		Probab. proteção no estado FALHA	PV Progr.	ΔR	ΔR/ΔPV	TMS
	[mês]	[ano]		[%]	[%]	[%]	
Linhas	1		0,73834e-5	32,08	12291761	3,407e5	0,138
Linhas	2		0,81355e-5	16,04	11155205	9,275e5	0,369
Linhas	3		0,89644e-5	10,69	10123541	1,122e6	0,462
Linhas	8		1,456571e-5	4,01	6229909	1,554e6	0,926
Linhas	9		1,60516e-5	3,56	5653109	1,567e6	1,018
Linhas	10		1,76894e-5	3,21	5129619	1,564e6	1,112
Linhas	11		1,94946e-5	2,92	4654523	1,548e6	1,204
Linhas	12	1	2,14844e-5	2,67	4223355	1,522e6	1,297
Linhas	24	2	6,90575e-5	1,34	1316372	9,102e5	2,413
Linhas	36	3	22,2450e-5	0,89	407749	4,181e5	3,533

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Observa-se na Figura 5.17, que o ponto onde ocorre a mudança da inclinação da tangente à curva corresponde ao nível de risco de 1,60516e-5, conseqüentemente, o intervalo fixo de manutenção programada relacionado a este ponto é a cada 9 meses, conforme os resultados apresentados na Tabela 5.15.

Os limites de decisão sobre o intervalo de manutenção programada encontram-se entre 3 e 9 meses. Apesar das probabilidades do sistema de proteção encontrar-se no estado FALHA serem muito pequenas nesta faixa, caso ocorra uma falha, o pagamento por indisponibilidade não programada será muito elevado.

Caso uma falha ocorra antes da realização de uma manutenção programada, o desconto da RAP devido a realização da manutenção não programada será muito maior do que o desconto devido ao adiamento da manutenção programada no período considerado.
Nada impede que a concessionária opte em fazer a manutenção programada em intervalos superiores aos determinados pela Fronteira de Eficiência de Risco, porém a partir do ponto onde a TMS passa a ser superior a 1, a variação do risco por pagamento de penalidades devido a manutenção não programada passará a ser maior do que a variação do pagamento por manutenção programada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

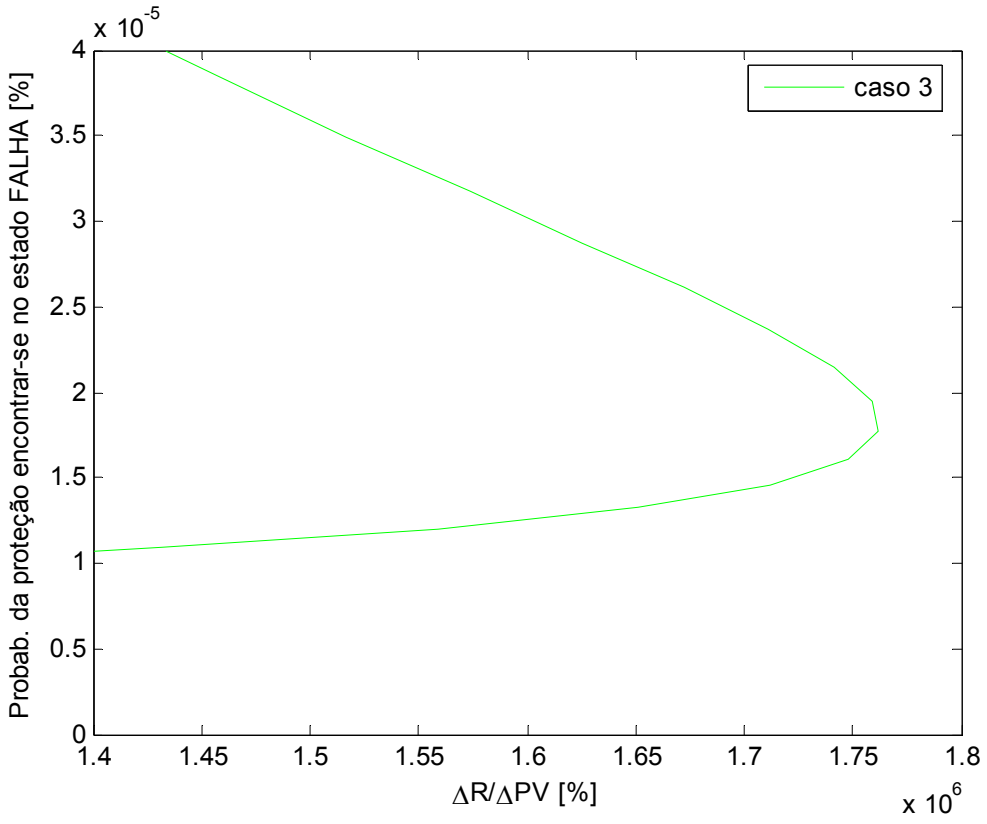

Figura 5.17 – Variação da Probabilidade da Proteção Encontrar-se no Estado FALHA *vs* ΔR/ΔPV (Caso 3)

5.7
Conclusão do Capítulo

Foram apresentados dois métodos que estabelecem uma relação quantitativa entre a confiabilidade de um sistema de potência e os respectivos custos de indisponibilidades programadas e não programadas.

Estes métodos são utilizados para obtenção da Fronteira de Eficiência de Risco, relacionando-se os dados de confiabilidade disponíveis dos estados dos sistemas de proteção, tais como suas taxas de falha e probabilidades em regime permanente, com as penalidades incorridas devido às indisponibilidades programadas e não programadas dos equipamentos.

Foram estudados 3 casos que mostram como os métodos podem ser úteis para a determinação de estratégias de manutenção programada, levando-se em conta os riscos incorridos por falhas nos sistemas de potência.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA

Foi verificado que o intervalo ótimo de manutenção programada, ignorando-se o pagamento por indisponibilidades de equipamentos, difere consideravelmente quando as restrições financeiras são inseridas ao problema. Observou-se também que não existe mais um único intervalo ótimo de manutenção programada, uma vez que os responsáveis pela tomada da decisão têm que escolher o intervalo de manutenção de acordo com as possibilidades econômicas da empresa em correr riscos de pagamento por indisponibilidades não programadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321235/CA