

SOLANGE MARIA PINTO RIBEIRO

**APLICAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA PROBABILÍSTICO NO
PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

SOLANGE MARIA PINTO RIBEIRO

**APLICAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA PROBABILÍSTICO
NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

TESE APRESENTADA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA PUC/RJ COMO PARTE
DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ORIENTADOR: ARMANDO MARTINS LEITE DA SILVA

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO**

JANEIRO DE 1990

" ... dia a dia tem
trajeito novo,
tem trabalho
este trem chamado
SONHO..."

Antônio Palma Filho

Aos meus pais,
que souberam semear.

As minhas avós, pelo
exemplo de vida.

A Gilberto.

AGRADECIMENTOS

- a Armando Martins Leite da Silva, orientador desta tese de mestrado por todas as horas que batalhamos juntos, pelas inúmeras considerações realizadas, por sua dedicação e excelente orientação. Enfim, pelo tanto que foi solidário e amigo ao longo desta trajetória.
- ao amigo Vinícius Leal Arienti pela disponibilidade em todos os momentos que recorri para discutir este trabalho. Por todas as críticas e sugestões durante o desenvolvimento desta pesquisa. Pela força e incentivo nas horas mais difíceis.
- aos amigos José Jair Barbosa de Moura, chefe da Divisão de Planejamento de Transmissão da CHESF, e Roberto José Ribeiro Gomes, chefe do Departamento de Estudos do Sistema de Transmissão da CHESF, por terem acreditado neste trabalho, pelo incentivo e compreensão que foram imprescindíveis para realização do mesmo.
- à CHESF, de onde sou funcionária, particularmente a algumas pessoas que facilitaram a minha liberação para cursar o mestrado da PUC/RJ: José Carlos Alelula, Roberto Manoel Guedes Alcoforado, Luiz de Moraes Guerra, Ricardo Cavalcanti Furtado e Ronaldo Honório de Albuquerque.
- ao CNPq pela bolsa de estudo recebida durante o período de agosto a dezembro de 1986.

- a alguns colegas e amigos que colaboraram com este trabalho fornecendo informações, com críticas e sugestões em particular a Hamilton de Oliveira Vasques, da Eletrobrás, Sérgio Marinho Soares, da PUC/RJ e Jorge Coelho, da UFSC-PUC/RJ, à Dione Andrade, Rui Ribeiro e José Araújo, do Departamento de Mercado da CHESF, a Olala Vasconcelos e José Alberto, do Departamento de Informática da CHESF, a Márcio Freire, Ary P. Ribeiro e Belmirando da Divisão de Planejamento da Geração da CHESF, aos meus colegas da Divisão de Planejamento do Sistema de Transmissão da CHESF, em particular à Vilma S. Andrade, João Ricardo Paes de Barros e Valdsom Simões.

- A ELETROBRÁS, nas pessoas que atuam no Departamento de Coordenação de Sistemas em especial a Alexandre Massaud, Humberto Prado, Antônio Cesar Martins e Luis Fernandes Flarys pelo apoio durante o início deste trabalho. A Xisto Vieira pelo incentivo a esta linha de pesquisa.

- aos colegas do curso de Pós - Graduação da PUC/RJ : Alfredo , Pessanha, Luis Antônio, Georgeson, Alzira, George, Albert e Luiza por tudo que partilhamos ao longo do curso.

- aos professores do grupo de Potência da PUC/RJ, particularmente a Milton Brown, Ricardo Pra e Marcus Schilling, pelo incentivo.

- a todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC/RJ.

- a Lourdes, Reinaldo e Rosalina pelo auxílio na edição deste trabalho. A Iracema, pela assistência enquanto estive no Rio.

- a meus Pais , irmãos, cunhadas e sobrinhas pelo amor atento e apoio incondicional ao longo deste trabalho e pelo tanto que representam em minha vida.

- a Cacau, Sandra, Adriana, Edson e Lenise pelo apoio, carinho e solidariedade durante nossa estada no Rio.

- aos amigos que me incentivaram para que eu me aventurasse a cursar o mestrado da PUC/RJ, particularmente a Fernando França, Pedro Jatobá, Methódio Godoy e Antônio Godoy.

- a outras tantas pessoas : amigos, colegas, professores que de uma forma ou de outra deram sua colaboração para este trabalho, em especial à Vitória e Dival.

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma aplicação das técnicas de Fluxo de Potência Probabilístico (FPP) no planejamento da expansão de sistemas de potência. Um breve resumo da formulação e solução do problema de FPP é incluído para identificar as diferenças entre esta técnica e outras ferramentas disponíveis tais como os algoritmos de avaliação da confiabilidade composta - geração e transmissão. O potencial das técnicas de FPP será demonstrado através de um estudo utilizando o sistema Norte/Nordeste brasileiro. O planejamento da expansão da rede elétrica de uma área deste sistema, obtido através de um algoritmo convencional de fluxo de potência, é comparado com aquele obtido por um programa de FPP que modela as indisponibilidades de capacidade de geração, bem como as incertezas existentes nos picos de cargas. As diferenças significativas demonstram os benefícios das técnicas de FPP. Uma ênfase especial é dada à modelagem de curto e longo prazos das incertezas das cargas.

ABSTRACT

This dissertation presents an application of Probabilistic Load Flow (PLF) techniques to the expansion planning of power systems. A brief review of the PLF formulation and solution is included to identify differences between this technique and other available tools such as composite generation and transmission reliability evaluation algorithms. The potential of the PLF technique is demonstrated by a case study using the Brazilian North/Northeastern system. The network expansion planning of an area of this system is studied using a conventional load flow program and the results compared with those obtained from a PLF program that models generation capacity unavailabilities and peak load uncertainties. The significant differences demonstrate the benefits of the PLF technique. Special emphasis is given to short and long term modeling using analyses of real system load data.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Gerais	1
1.2. Desenvolvimento Histórico	4
1.3. Roteiro de trabalho	8
CAPÍTULO 2. O ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA PROBABILÍSTICO	
2.1. Introdução	11
2.2. Formulação do Problema	12
2.3. Correlações entre Potências Nodais	14
2.4. Balanço de Potência em Sistemas Multi-Áreas	16
2.5. O Algoritmo de FPP	17
2.5.1. Determinação do Ponto de Linearização	17
2.5.2. Cálculo das Grandezas	18
2.5.3. Fluxograma Simplificado	19
2.6. Conclusões	22
CAPÍTULO 3. MODELAGEM ESTATÍSTICA DAS CARGAS	
3.1. Introdução	24
3.2. Tipos de Incertezas	24
3.3. Avaliação das Incertezas de Curto Prazo	25
3.3.1. Coleta de Dados	26
3.3.2. Processamento dos Dados	26

3.3.3. Determinação do Tipo de Função Densidade de Probabilidade	33
3.3.4. Correlação entre Cargas	36
3.4. Avaliação das Incertezas de Longo Prazo	45
3.4.1. Correlação entre as Tendências de Crescimento das Cargas	48
3.4.2. Análise de Regressão Linear	51
3.5. Modelagem Estatística das Cargas no algoritmo de FPP	56
3.6. Conclusões	57
 CAPÍTULO 4. APLICAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA PROBABILÍSTICO NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO	
4.1. Introdução	59
4.2. Sistema Teste - Dados Utilizados	59
4.2.1. Dados Probabilísticos de Mercado	60
4.2.2. Dados Probabilísticos de Geração	63
4.3. Planejamento da Expansão - Análise Determinística	
4.3.1. Metodologia	67
4.3.2. Resultados do Planejamento Convencional Realizado	68
4.4. Planejamento da Expansão - Análise Probabilística	
4.4.1. Índices de Adequação	84
4.4.2. Fluxo de Potência Probabilístico X Confiabilidade Global de Sistemas	85
4.4.3. Metodologia Utilizada	89
4.4.4. Resultados da Análise realizada	92
4.5. Conclusões	116
 CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS	118
 APÊNDICE 1. DADOS DIÁRIOS COLETADOS	128

APÊNDICE 2. TESTES DE ADERÊNCIA	165
APÊNDICE 3. ERRO NA PREVISÃO - DADOS COLETADOS	171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	189

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1 - Fluxograma simplificado do algoritmo de FPP	21
3.1 - Carga máxima diária ativa / reativa - Angelim 69 kV	31
3.2 - Carga máxima diária ativa - Açú 69 kV	32
3.3 - Carga máxima diária ativa - Mossoró 69 kV	32
3.4 - Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa - Angelim 69 kV	34
3.5 - Histograma da variação da carga máxima diária ativa - Açú 69 kV	34
3.6 - Histograma da variação da carga máxima diária ativa Mossoró 69 kV	34
3.7 - Transferência de carga entre Mossoró e Açú	44
3.8 - Carga máxima anual - área Leste x SE Pirapama (x 10)	51
3.9 - Análise de regressão - Carga total da área Leste com intervalos de confiança associados	55
4.1 - Diagrama eletrogeográfico: Alternativa 1 Configuração horizonte 1997	71
4.2 - Diagrama eletrogeográfico: Alternativa 1 - Configuração horizonte 2005	83
4.3 - Fluxograma simplificado do algoritmo para a avaliação do desempenho de sistemas	86
4.4 - Funções distribuição de probabilidade acumulada para a potência reativa gerada pelo CE de C. Grande na emergência Banabuló-	

4.5 - Funções densidade de probabilidade para a potência reativa gerada pelo CE de C. Grande na emergência Banabuiú-Russas	96
4.6 - Funções distribuição de probabilidade acumulada para o fluxo de potência em MVA na LT Recife-Goiânia na emergência Recife-Monjope (c1)	97
4.7 - Funções densidade de probabilidade para o fluxo de potência em MVA na LT Recife-Goiânia na emergência Recife-Monjope (c1)	97
4.8 - Funções distribuição de probabilidade acumulada para o fluxo em MVA na LT Tacaimbó-C. Grande na emergência da LT Angelim-Tacaimbó-C. Grande	99
4.9 - Funções densidade de probabilidade para o fluxo em MVA na LT Tacaimbó-C. Grande na emergência da LT Angelim-Tacaimbó-C. Grande	99
4.10- Funções distribuição de probabilidade acumulada para a potência reativa gerada pelo CE de C. Grande na emergência Banabuiú-Russas	101
4.11- Funções densidade de probabilidade para a potência reativa gerada pelo CE de C. Grande na emergência Banabuiú-Russas	101
4.12- Funções distribuição de probabilidade acumulada para o fluxo em MVA no circuito remanescente da LT Goiânia-Mussurê na emergência Goiânia-Mussurê	102
4.13- Funções densidade de probabilidade para o	

fluxo em MVA no circuito remanescente da LT Golaninha-Mussuré na emergência Golaninha- Mussuré	102
4.14- Funções distribuição de probabilidade acumulada para o fluxo em MVA nos circuitos c1 e c2 da LT Angelim-Rio Largo na emergência Xingó-Rio Largo	104
4.15- Funções densidade de probabilidade para o fluxo em MVA nos circuitos c1 e c2 da LT Angelim-Rio Largo na emergência Xingó-Rio Largo	104
4.16- Funções distribuição de probabilidade acumulada para o fluxo em MVA do autotransformador de Angelim na emergência Xingó-Rio Largo	105
4.17- Funções densidade de probabilidade para o fluxo em MVA do autotransformador de Angelim na emergência Xingó-Rio Largo	105
4.18- Funções distribuição de probabilidade acumulada para a potência reativa gerada pelo CE de C. Grande na emergência Mossoró- Açú	106
4.19- Funções densidade de probabilidade para a potência reativa gerada pelo CE de C. Grande na emergência Mossoró-Açú	106
4.20- Funções distribuição de probabilidade acumulada para o fluxo em MVA na LT Banabuiú-Russas na emergência Banabuiú- Mossoró	108
4.21- Funções densidade de probabilidade para o	

fluxo em MVA na LT Banabulú-Russas na emergência Banabulú-Mossoró	108
4.22- Funções distribuição de probabilidade acumulada para o fluxo em MVA na LT Tacaímbó-C. Grande na emergência da LT Angelim-Tacaímbó-C. Grande	109
4.23- Funções densidade de probabilidade para o fluxo em MVA na LT Tacaímbó-C. Grande na emergência da LT Angelim-Tacaímbó-C. Grande	109
4.24- Funções distribuição de probabilidade acumulada para o fluxo em MVA na LT Mossoró- Açú na emergência C. Grande-Natal	111
4.25- Funções densidade de probabilidade para o fluxo em MVA na o fluxo em MVA na LT Mossoró-Açú na emergência C. Grande-Natal	111
4.26- Funções distribuição de probabilidade acumulada para a tensão na barra de Angelim 500 kV nas emergências Angelim -Recife e Xingó-Rio Largo	112
4.27- Funções densidade de probabilidade para a tensão na barra de Angelim 500 kV nas emergências Angelim-Recife e Xingó-Rio Largo	112
4.28- Funções distribuição de probabilidade acumulada para a tensão na barra de Recife 500 kV nas emergências Angelim -Recife e Xingó-Rio Largo	113
4.29- Funções densidade de probabilidade para a tensão na barra de Recife 500 kV nas emergências Angelim-Recife e Xingó-Rio Largo	113

A1.1 - Carga máxima diária ativa / reativa Açonorte 230 kV	140
A1.2 - Carga máxima diária ativa / reativa Banabuiú 69 kV	141
A1.3 - Carga máxima diária reativa Açú 69 kV	141
A1.4 - Carga máxima diária ativa / reativa Bongí 13.8 kV	142
A1.5 - Carga máxima diária ativa / reativa Bongí 69 kV	143
A1.6 - Carga máxima diária ativa / reativa Campina Grande 69 kV	144
A1.7 - Carga máxima diária ativa / reativa Currais novos 69 kV	145
A1.8 - Carga máxima diária ativa / reativa Goianinha 69 kV	146
A1.9 - Carga máxima diária ativa / reativa Mussurê 69 kV	147
A1.10- Carga máxima diária ativa / reativa Mirueira 69 kV	148
A1.11- Carga máxima diária ativa / reativa Natal 69 kV	149
A1.12- Carga máxima diária ativa / reativa Pirapama 69 kV	150
A1.13- Carga máxima diária ativa / reativa Russas 69 kV	151
A1.14- Carga máxima diária ativa / reativa Tacaimbó 69 kV	152
A1.15- Carga máxima diária ativa / reativa Santana dos Matos 69 kV	153
A1.16- Carga máxima diária ativa / reativa Santa	

Cruz 69 kV	154
A1.17- Carga máxima diária ativa / reativa Goberbo 230 kV	155
A1.18- Carga máxima diária ativa / reativa Rio Largo 69 kV	156
A1.19- Carga máxima diária ativa / reativa Salgema 230 kV	157
A1.20- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Açonorte 230 kV	158
A1.21- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Banabuiú 69 kV	158
A1.22- Histograma da variação da carga máxima diária reativa Açú 69 kV	158
A1.23- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Bongí 13.8 kV	159
A1.24- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Bongí 69 kV	159
A1.25- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Campina Grande 69 kV	159
A1.26- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Currais Novos 69 kV	160
A1.27- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Golaninha 69 kV	160
A1.28- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Mussurê 69 kV	160
A1.29- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Mirueira 69 kV	161
A1.30- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Natal 69 kV	161

A1.31- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Pirapama 69 kV	161
A1.32- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Russas 69 kV	162
A1.33- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Tacaimbó 69 kV	162
A1.34- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa S. dos Matos 69 kV	162
A1.35- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Santa Cruz 69 kV	163
A1.36- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Coberbo 230 kV	163
A1.37- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Rio Largo 69 kV	163
A1.38- Histograma da variação da carga máxima diária ativa e reativa Salgema 69 kV	164
A2.1 - Região de rejeição de um teste de hipótese	166
A3.1 - Erro na previsão - médias ponderadas por barra Área Leste	192
A3.2 - Erro na previsão (mercado global) Área Leste	194
A3.3 - Erro na previsão (mercado global) Região Nordeste [15]	196
A3.4 - Erro na previsão - resumo das análises realizadas	198

LISTA DE TABELAS

3.1 - Média e desvio padrão para carga ativa e reativa	30
3.2 - Testes de aderência com a normal	35
3.3 - Coeficientes de correlação : potência ativa x ativa com tendência (dados de 1986)	39
3.4 - Coeficientes de correlação : potência ativa x ativa sem tendência (dados de 1986)	39
3.5 - Coeficientes de correlação : potência reativa x reativa com tendência (dados de 1986)	40
3.6 - Coeficientes de correlação : potência reativa x reativa sem tendência (dados de 1986)	40
3.7 - Coeficientes de correlação : potência ativa x ativa com tendência (dados de 1987)	41
3.8 - Coeficientes de correlação : potência ativa x ativa sem tendência (dados de 1987)	41
3.9 - Coeficientes de correlação : potência reativa x reativa com tendência (dados de 1987)	41
3.10- Coeficientes de correlação : potência reativa x reativa sem tendência (dados de 1987)	41
3.11- Coeficientes de correlação : potência ativa x reativa com e sem tendência	42

3.12- Mercado Realizado anual (MW máximo coincidente)	50
3.13- Coeficientes de correlação : tendência de crescimento das cargas (1974 a 1987)	50
3.14- Análise de regressão - previsão : 1986 a 1996	54
3.15- Intervalo de confiança da previsão	55
4.1 - Desvio padrão para as cargas modeladas como normais	62
4.2 - Representação discreta para as cargas de Mossoró e Açu - ano de 1992	63
4.3 - Usinas Dependentes - Despacho 1995	65
4.4 - Usinas Independentes - Despacho 1995	66
4.5 - Estudo determinístico : cronograma de obras das alternativas A1 e A2 (horizonte 1997)	70
4.6 - Estudo determinístico : Contingências que determinaram obras - 1992/Alternativas 1 e 2	72
4.7 - Estudo determinístico : Contingências que determinaram obras - 1993/Alternativas 1 e 2	73
4.8 - Estudo determinístico : Contingências que determinaram obras - 1994/Alternativas 1 e 2	74
4.9 - Estudo determinístico : Contingências que determinaram obras - 1994/Alternativa 1	75
4.10- Estudo determinístico : Contingências que determinaram obras - 1994/Alternativa 2	76
4.11- Estudo determinístico : Contingências que determinaram obras - 1995/Alternativas 1	77
4.12- Estudo determinístico : Contingências que determinaram obras - 1995/Alternativa 2	78
4.13- Estudo determinístico : Contingências que	

determinaram obras - 1996/Alternativa 1	79
4.14- Estudo determinístico : Contingências que determinaram obras - 1995/Alternativa 2	80
4.15- Estudo determinístico : cronograma de obras das alternativas A1 (horizonte 2005)	82
4.16- Resumo dos resultados obtidos da análise probabilística	93
4.17- Estudo probabilístico : cronograma de obras da alternativa A1 (horizonte 1997)	115
A1.1- Dados diários coletados - Açú e Açonorte	128
A1.2- Dados diários coletados - Angelim e Banabuiú	129
A1.3- Dados diários coletados - Bongi 13.8 e 69kV	130
A1.4- Dados diários coletados - Campina Grande e Currais Novos	131
A1.5- Dados diários coletados - Golianinha	132
A1.6- Dados diários coletados - Mussurê e Mirueira	133
A1.7- Dados diários coletados - Mossoró e Natal	134
A1.8- Dados diários coletados - Pirapama e Russas	135
A1.9- Dados diários coletados - Tacaimbó	136
A1.10- Dados diários coletados - Santana Matos e Santa Cruz	137
A1.11- Dados diários coletados - Coperbo	138
A1.12- Dados diários coletados - Rio Largo e Saigema	139
A3.1 - Mercado previsto x realizado (MW máx. coincidente) - SE Açú	172
A3.2 - Mercado previsto x realizado (MW máx.	

	coincidente) - SE Angelim	173
A3.3 - Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Banabulú	174
A3.4 - Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Bongi	175
A3.5 - Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Campina Grande	176
A3.6 - Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Currais Novos	177
A3.7 - Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Goianinha	178
A3.8 - Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Mussurú	179
A3.9 - Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Mirueira	180
A3.10- Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Mossoró	181
A3.11- Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Natal	182
A3.12- Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Pirapama	183
A3.13- Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Russas	184
A3.14- Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Santana dos matos	185
A3.15- Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Santa Cruz	186
A3.16- Mercado previsto	x realizado (MW máx.	
	coincidente) - SE Rio Largo	187

A3.17- Mercado previsto x realizado (MW máx. coincidente) - Salgema	188
A3.18- Média ponderada para a área Leste a partir dos valores de erros absolutos para as barras	190
A3.19- Média ponderada para a área Leste a partir dos valores de erros relativos para as barras	191
A3.20- Mercado previsto x realizado (MW máx. coincidente) - Área Leste	193
A3.21- Resumo dos erros na previsão - área Leste (mercado global)	194
A3.22- Mercado previsto x realizado (MW máx. coincidente) Região nordeste [15]	195
A3.23- Resumo dos erros na previsão - Nordeste (mercado global)	196
A3.24- Erro na previsão - Resumo das análises anteriores	197

LISTA DE ABREVIATURAS

FPP - Fluxo de Potência Probabilístico
FPC - Fluxo de Potência Convencional
CGS - Confiabilidade Global de Sistemas
SMC - Simulação Monte Carlo
ARS - Avaliação da Resposta do Sistema
SPS - Solução dos Problemas do Sistema
SE - Subestação
MW - Mega-Watt
Mvar- Mega Volt Ampere Reativo
kV - Kilo Volt
LT - Linha de Transmissão
BC - Banco de Capacitor
CE - Compensador Estático
CS - Compensador Síncrono
PU - Por Unidade
CPU - Cental Processing Unit
FOR - Forced Outage Rate
KS - Kolmogorov- Smirnov
 χ^2 - Quiquadrado