



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
Setor de Tecnologia
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Modelagem Estática de Carga Através de Medição Direta e Utilização de Técnicas de Otimização

Marcelo Batista do Amaral

Juiz de Fora, MG – Brasil

Dezembro de 2012

Tese submetida ao Corpo Docente da Coordenação do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.

Aprovada Por:

Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, D. Sc.

José Luiz Resende Pereira, Ph. D

Walmir de Freitas Filho, D. Sc.

Luiz Antônio da Fonseca Manso, D. Sc.

Edimar José de Oliveira, D. Sc.

Juiz de Fora, MG – Brasil

Dezembro de 2012.

Amaral, Marcelo Batista

Modelagem Estática de Carga Através de Medição Direta e Utilização de Técnicas de Otimização / Marcelo Batista do Amaral – Juiz de Fora: UFJF, 2012.

XII, 93 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Paulo Augusto Nepomuceno Garcia

José Luiz Rezende Pereira

Tese (doutorado) – UFJF/ Programa de Engenharia Elétrica, 2012.

Referencias Bibliográficas: p. 68 - 73.

1. Modelagem de Carga. 2. Medição Direta. 3. Polinômio Ampliado. 4. Níveis de Tensão. 5. Otimização.
I. Garcia, Paulo Augusto Nepomuceno et al. II. Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

A minha esposa Débora e aos meus filhos Caroline e Lucca pela compreensão e paciência durante este período de estudos e privações.

Agradecimentos.

Aos professores Paulo Augusto Nepomuceno Garcia e José Luiz Resende Pereira pela orientação, dedicação e, sobretudo, demonstração de interesse e amizade.

Aos colegas da Companhia Energética de Minas Gerais-CEMIG, Flávio Gonçalves Ferreira, Gustavo Ribeiro de Resende e Orestes Gonçalves Junior, pelo apoio dado durante a realização dos procedimentos de medição, análise e edição do trabalho.

Ao corpo docente do curso de Doutorado em Engenharia Elétrica da UFJF, pelos conhecimentos obtidos durante a realização do curso.

Aos demais colegas do curso de Doutorado, pela amizade, pelas críticas sinceras e apoio durante a elaboração deste trabalho.

Resumo da tese apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Modelagem Estática de Carga Através de Medição Direta e Utilização de Técnicas de Otimização

Marcelo Batista do Amaral

Dezembro/2012

Orientador: Paulo Augusto Nepomuceno Garcia.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Palavras-chave: Modelagem de carga, medição direta, polinômio ampliado, níveis de tensão, otimização.

Número de Páginas: 93.

Este Trabalho propõe uma nova metodologia para modelagem estática de cargas utilizando dados obtidos através de medição direta em conjunto com a aplicação de técnicas de otimização. Com esse objetivo, foi desenvolvido um novo procedimento de ensaios de campo, baseado na escursão dos TAPs dos ULTCs ou reguladores de tensão, onde os efeitos indesejáveis das variações naturais da carga são mitigados. A partir dos dados de medição adotou-se técnicas de otimização utilizadas em problemas de estimação de estados para determinação dos modelos de carga, sejam exponenciais ou polinomiais. Cabe ressaltar que foi proposto também a utilização de polinômios de ordem superior ao ZIP convencional, onde os efeitos da tensão sobre a carga ficaram melhor representados. Os modelos estimados são comparados às medições reais, mostrando ótima aderência e plena indicação de uso. Ao final, os naturais impactos e benefícios de uma correta modelagem de carga são discutidos e alguns procedimentos de aplicação sugeridos, ressaltando a importância da fiel representação da carga nos estudos de fluxo de potência, sejam aplicados à operação ou aos estudos de expansão da Transmissão e Distribuição.

Abstract of the thesis presented to UFJF as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science in Electric Engineering.

Static Load Modeling Using Direct Field Measurement Approach and Optimization Techniques

Marcelo Batista do Amaral

December/2012

Supervisor: Paulo Augusto Nepomuceno Garcia, D.Sc.

Concentration: Electric Power Systems.

Key Words: Load modeling, Direct Field Measurements, Extended Polynomials, Voltage Levels, Optimization.

Number of Pages: 93.

This work presents a new methodology for static load modeling using direct field measurement procedures and optimization techniques. For this purpose, a new field measurement procedure was developed based on a specific voltage variation schedule obtained from ULTC forced operations, in order to mitigate load natural disturbances (fluctuations). Following in, optimization techniques are applied on the measurement data set using estimation problems theory to extract both polynomials and exponential static load models. In addition, a new polynomial load model, named *Extended Model*, which is basically a n th-degree polynomial, was presented to better depict voltage variation load dependency. Thus, estimated and measured data curves were plotted together for comparison, showing full adherence and therefore suitability for practical use. Finally, this work discusses the critical impacts and main benefits for load flow studies and suggests some application procedures, mainly addressed to power Transmission and Distribution Planning and Operation issues.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XII
CAPÍTULO 1	1
Considerações iniciais.	1
1. Motivação.	1
2. Revisão bibliográfica.	2
3. Contribuições do trabalho.	9
4. Estrutura do trabalho.	10
5. Publicações e Submissões Decorrentes da Pesquisa.	11
CAPÍTULO 2	12
Aspectos conceituais: metodologias e formulação proposta.	12
1. Metodologias de Modelagem.	12
1.1. Conceituação.	12
1.2. Modelagem pelo Método da Composição de Cargas.	13
1.3. Modelagem pelo Método de Medição Direta.	14
1.4. Medição Direta x Composição de Cargas.	15
2. Formulação Matemática.	16
3. Modelo Polinomial Ampliado.	19
4. Aplicação da Otimização.	20
5. Impactos gerais da modelagem de cargas sobre a tensão.	23
6. Sumário do capítulo.	26
CAPÍTULO 3	27
Método de medição e ensaios.	27
1. Considerações iniciais.	27
2. Metodologia de Medição Proposta.	28
3. Sumário do capítulo.	34

CAPÍTULO 4	35
Aplicações e resultados.	35
1. Considerações iniciais.	35
2. Validação da metodologia de modelagem de carga.	35
3. Resultados de medições - Tabelas de Parâmetros.	44
4. Análises dos resultados.	50
5. Avaliação dos impactos da modelagem de carga - estudo de caso-CEMIG.	57
6. Sumário do capítulo.	65
CAPÍTULO 5	66
Conclusões e recomendações de aprimoramento.	66
1. Conclusões gerais.	66
2. Proposições de trabalhos futuros.	67
BIBLIOGRAFIA	68
APÊNDICE A	74
Gráficos dos ensaios para levantamento dos parâmetros α_p e α_q .	74
APÊNDICE B	93
Níveis de tensão - ANEEL.	93

Índice de Figuras

FIGURA 1 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM SISTEMA ELÉTRICO QUALQUER.	23
FIGURA 2 - CURVAS DE MODELOS DE CARGA PARA ANÁLISE DA CORRELAÇÃO P-V.	24
FIGURA 3 - CURVAS P-V ASSOCIADAS A CARGAS COM MODELO PREDOMINANTE.	25
FIGURA 4 - VARIAÇÕES NATURAIS E ALEATÓRIAS DA CARGA (4H4-JFAD-13:00).	28
FIGURA 5 - VARIAÇÕES IMPOSTAS DE TENSÃO E POTÊNCIA ATIVA (4H4-SE JFAD-01:00).	30
FIGURA 6 - VARIAÇÕES IMPOSTAS DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA (4H4-JFAD-01:00).	30
FIGURA 7 - FLUXOGRAMA DE UM PLANO OPERACIONAL (P.O.) PARA MODELAGEM DE CARGA.	33
FIGURA 8 – VARIAÇÕES DE TENSÃO E POTÊNCIA ATIVA.	37
FIGURA 9 - VARIAÇÕES DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA.	37
FIGURA 10 – POTÊNCIA ATIVA – ESTIMAÇÃO POLINOMIAL.	40
FIGURA 11 – POTÊNCIA ATIVA – ESTIMAÇÃO EXPONENCIAL.	41
FIGURA 12– POTÊNCIA REATIVA – ESTIMAÇÃO POLINOMIAL.	41
FIGURA 13 – POTÊNCIA REATIVA – ESTIMAÇÃO EXPONENCIAL.	42
FIGURA 14- DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA SUBESTAÇÃO JUIZ DE FORA 2.	44
FIGURA 15 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DO PONTO DE REDE-CHAVE 22154.	45
FIGURA 16 - MEDIÇÃO COMPROMETIDA PELAS FLUTUAÇÕES NATURAIS DE CARGA.	45
FIGURA 17 - VARIAÇÃO DIÁRIA DOS PARÂMETROS MÉDIOS α_p E α_q DE UMA CARGA TÍPICAMENTE RESIDENCIAL.: (A) DIA DE SEMANA, (B) SÁBADO E (C) DOMINGO.	55
FIGURA 18 - VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS α_p E α_q DA CARGA RESIDENCIAL NAS TRÊS MEDIÇÕES: (A) DIA DE SEMANA, (B) SÁBADO E (C) DOMINGO.	56
FIGURA 19 - ALIMENTADOR SOB ANÁLISE - 312F4 - SE BARROSO 3.	58
FIGURA 20 - ANÁLISE DE PLANEJAMENTO - METODOLOGIA ATUAL.	59
FIGURA 21 - PERFIS DE TENSÃO - SITUAÇÃO SEM OBRAS.	60
FIGURA 22 - PERFIS DE TENSÃO - SITUAÇÃO COM OBRAS.	60
FIGURA 23 - ANÁLISE DE PLANEJAMENTO - MODELO IMPEDÂNCIA CONSTANTE.	61
FIGURA 24 - PERFIS DE TENSÃO - SITUAÇÃO SEM OBRAS.	62
FIGURA 25-PERFIS DE TENSÃO - SITUAÇÃO COM OBRAS.	62
FIGURA 26 - ANÁLISE DE PLANEJAMENTO - MODELO POTÊNCIA CONSTANTE.	63
FIGURA 27- PERFIS DE TENSÃO - SEM OBRAS.	63

FIGURA 28- PERFIS DE TENSÃO - COM OBRAS.	64
FIGURA 29- FINAL DE SEMANA - SEXTA.....	75
FIGURA 30 - FINAL DE SEMANA- SEXTA.....	76
FIGURA 31 - FINAL DE SEMANA-SÁBADO.....	77
FIGURA 32 - FINAL DE SEMANA-SÁBADO.....	78
FIGURA 33 - FINAL DE SEMANA-DOMINGO.....	79
FIGURA 34 - FINAL DE SEMANA - DOMINGO.	80
FIGURA 35 - MÉDIA DOS PARÂMETROS ÀS SEXTAS-FEIRAS.	81
FIGURA 36 - MÉDIA DOS PARÂMETROS ÀS SEXTAS-FEIRAS	82
FIGURA 37- MÉDIA DOS PARÂMETROS AOS SÁBADOS.....	83
FIGURA 38 - MÉDIA DOS PARÂMETROS AOS SÁBADOS.	84
FIGURA 39 - MÉDIA DOS PARÂMETROS AOS DOMINGOS.....	85
FIGURA 40 - MÉDIA DOS PARÂMETROS AOS DOMINGOS.....	86
FIGURA 41 - COMPARATIVO DOS PARÂMETROS α_p E α_Q OBTIDOS NAS SEXTAS.....	87
FIGURA 42 - COMPARATIVO DOS PARÂMETROS α_p E α_Q OBTIDOS NAS SEXTAS.....	88
FIGURA 43 - COMPARATIVO DOS PARÂMETROS α_p E α_Q OBTIDOS NOS SÁBADOS.....	89
FIGURA 44- COMPARATIVO DOS PARÂMETROS α_p E α_Q OBTIDOS NOS SÁBADOS.	90
FIGURA 45- COMPARATIVO DOS PARÂMETROS α_p E α_Q OBTIDOS NOS DOMINGOS.	91
FIGURA 46- COMPARATIVO DOS PARÂMETROS α_p E α_Q OBTIDOS NOS DOMINGOS.	92

Índice de Tabelas

TABELA 1 - VALORES TÍPICOS - PARÂMETROS DE COMPONENTES DE CARGA-MODELO EXPONENCIAL. .	18
TABELA 2 – MODELO ZIP - POTÊNCIA ATIVA	38
TABELA 3 – MODELO EXPONENCIAL DE POTÊNCIA ATIVA	38
TABELA 4 - MODELO ZIP CONVENCIONAL – POT. REATIVA	39
TABELA 5 – MODELO ZIP AMPLIADO - POTÊNCIA REATIVA.....	39
TABELA 6 – MODELO EXPONENCIAL DE POTÊNCIA REATIVA.....	39
TABELA 7 – DESVIO MÉDIO - MODELO ZIP CONVENCIONAL.....	43
TABELA 8 – DESVIO MÉDIO - MODELO POLINOMIAL AMPLIADO	43
TABELA 9 – DESVIO MÉDIO - MODELO EXPONENCIAL	43
TABELA 10 - PARÂMETROS MÉDIOS OBTIDOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO (SEXTA-FEIRA).	47
TABELA 11 - PARÂMETROS MÉDIOS OBTIDOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO (SÁBADO).....	47
TABELA 12 - PARÂMETROS MÉDIOS OBTIDOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO (DOMINGO).....	48
TABELA 13 - PARÂMETROS MÉDIOS PARA A CARGA REATIVA OBTIDOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO, USANDO MODELO POLINOMIAL AMPLIADO (SEXTA).	48
TABELA 14 - PARÂMETROS MÉDIOS PARA A CARGA REATIVA OBTIDOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO, USANDO MODELO POLINOMIAL AMPLIADO (SÁBADO).....	49
TABELA 15 - PARÂMETROS MÉDIOS PARA A CARGA REATIVA OBTIDOS ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE CAMPO, USANDO MODELO POLINOMIAL AMPLIADO (DOMINGO).	49
TABELA 16-RESULTADOS FINANCEIROS PARA AS DIFERENTES MODELAGENS UTILIZADAS NO CASO EXEMPLO.	64
TABELA 17- PONTOS DE ENTREGA - TENSÃO NOMINAL IGUAL OU INFERIOR A 1 KV. TENSÕES PADRONIZADAS.	93
TABELA 18- PONTOS DE ENTREGA - TENSÃO NOMINAL IGUAL OU INFERIOR A 1 KV. TENSÕES NÃO PADRONIZADAS.	93

Capítulo 1

Considerações iniciais.

1. Motivação.

As atuais imposições legais e mercadológicas levam os agentes do sistema e mercado de energia elétrica a praticarem uma gestão cada vez mais austera, claramente focada em projetos de efficientização que buscam mais qualidade com menores (mais adequados) custos. É dentro desse contexto de efficientização e otimização de processos que se insere esta busca de aprimoramento nos processos de representação da carga.

Para planejar e operar os sistemas elétricos de potência de maneira econômica, eficiente e segura é de fundamental importância definir um modelo adequado para cada elemento do sistema. A correta modelagem ou representação dos componentes do sistema possibilita o desenvolvimento de estudos e análises de Planejamento e Operação com menores margens de erro, melhor representação das condições e restrições do sistema e, portanto, uma melhor exploração de seus recursos.

As tarefas de análise de operação e planejamento, como análises de contingência, reconfigurações operativas de redes, análise de eventos e tantos outros estudos, dependem da avaliação do estado e tendências da rede. Portanto, são claramente afetados pela modelagem de suas cargas. Basicamente uma modelagem de carga mais realista traz resultados mais fiéis e permite análises mais coerentes, sobretudo mais seguras e confiáveis. Sendo assim, a busca de novas metodologias para modelagem estática de cargas vem ao encontro desta necessidade de bem representar a carga.

Neste Trabalho propõe-se uma metodologia para modelagem de carga, onde, a partir de medições diretas, utiliza-se técnicas de otimização para determinação de um modelo de carga mais aderente ao seu comportamento diante da variação da tensão. Com este objetivo, adotou-se técnicas utilizadas em problemas de estimação de estados, onde o erro entre a modelagem proposta e a medição é minimizado. Cabe ressaltar que, no caso de modelagem polinomial foi proposta a utilização de polinômios de ordem superior ao “ZIP” convencional para melhor representação das cargas.

2. Revisão bibliográfica.

Ao longo do tempo, vários estudos e pesquisas foram realizados com o propósito de aprimorar os modelos dos componentes do sistema (linhas de transmissão e distribuição, transformadores, geradores etc.), porém, desde o início, a carga apresentou-se como o componente de mais difícil representação [1]. Para ampliar e atualizar os conhecimentos sobre o assunto, foram consultadas e avaliadas várias referências pertinentes, cujos principais aspectos de interesse passam a ser discutidos.

As referências [2], [17], [22]-[30] destacam que as tarefas de análise pré e pós-operacionais tais como estudos de planejamento, análises de contingência, reconfigurações operativas de rede, estudos da influência das potências ativa e reativa na oscilação de máquinas são claramente afetados pela modelo da carga.

Em [20] observa-se com clareza a influência do modelo de carga na determinação (projeto) de sistemas de controle automáticos da operação voltados para reconfiguração ótima de redes focando controle de tensão e perdas.

A utilização do método de composição de cargas é abordada nas referências [19], [21], [32]-[35]. Nesta metodologia, a partir de componentes individuais de carga, é estabelecido um modelo equivalente para carga em uma determinada barra do sistema. Contudo, principalmente devido à complexidade e aos níveis de incerteza envolvidos, o método apresenta-se pouco atrativo para efetiva implementação.

Os trabalhos apresentados em [37]-[47] abordam várias opções de modelagem através de medição de campo, destacando sua maior adequação e oportunidade de implementação. Em [26], [30] e [38], o processo de medição direta em campo é feito baseado em variações naturais de tensão e carga. Como estas variações são aleatórias e acontecem com frequência e níveis irregulares ao longo do dia, o processo torna-se impreciso, dificultando a correta extração dos modelos.

Tendo em vista a importância do tema, uma força tarefa do IEEE [3] preparou uma extensa lista de trabalhos publicados. Discutiu-se também, os principais modelos matemáticos, seus respectivos parâmetros, intervalos de validade, restrições, etc. Foram abordados neste trabalho tanto modelos estáticos quanto dinâmicos.

Em [4] realizou-se medições em laboratório buscando parâmetros dos modelos polinomiais e exponenciais para vários componentes de carga (aparelhos em geral).

Os modelos apresentados podem ser utilizados em processos de modelagem baseados em composição de cargas e são interessantes para consultas.

Entre as referências pesquisadas destaca-se o trabalho [5] realizado através de uma força-tarefa que reuniu as principais abordagens e conclusões sobre a questão de modelagem de cargas existentes até 1993. Por se tratar de uma referência mais completa, considerou-se oportuno seu detalhamento mais extenso e criterioso. Neste trabalho [5] destacam-se os importantes impactos da modelagem de carga sobre estudos estáticos e dinâmicos considerando que seu aprimoramento conduz a resultados mais realistas e seguros do ponto de vista operativo e econômico. O trabalho cita os dois métodos de modelagem tradicionais e suas dificuldades comuns: Grande número de diferentes componentes de carga; dificuldade de acesso às instalações do cliente para levantamentos e pesquisas; mudança da composição de carga ao longo do dia, das estações e do clima; falta de dados precisos desta composição de cargas e incertezas do comportamento de diversos componentes de carga diante de grandes variações na tensão e frequência.

O trabalho prossegue discutindo as características específicas de certas cargas típicas como motores, lâmpadas incandescentes e fluorescentes (de descarga), cargas controladas por termostatos, cargas com controle manual, aparelhos eletrônicos, motores de velocidade ajustável e OLTC, destacando o comportamento típico e diferenciado destas perante as variações de tensão.

Outra abordagem de destaque refere-se ao comparativo entre as técnicas de modelagem por composição e a por medição direta. Basicamente esta referência relata que o método de composição requer um conhecimento das características de consumo dos diversos componentes de carga (aquecimento, refrigeração, iluminação, etc), das diversas classes e sua composição nos diversos pontos de interesse tais como alimentadores, barras e sistemas. Sua vantagem básica é que este método dispensa levantamentos de campo e pode ser adaptado aos diferentes sistemas e condições. Sua desvantagem colocada é que este requer um criterioso e muitas vezes tedioso levantamento de dados de composição de cargas desde o usuário final até as barras de carga do sistema.

Para a abordagem por medição direta é destacada por esta referência a vantagem de permitir a obtenção dos parâmetros de comportamento estático das cargas diretamente do sistema real. O trabalho cita como desvantagens que os dados particulares de determinado sistema somente servirão para sistemas semelhantes e no geral cada sistema, barra ou alimentador requer seu levantamento particular. Outra

desvantagem seria a impossibilidade de levantar dados para uma larga faixa de valores de tensões e freqüências.

Neste trabalho [5] apresentam-se ainda parâmetros para potência ativa e reativa, considerando modelos exponenciais dependentes da tensão e da freqüência para as classes residencial, comercial e industrial para regiões da América do Norte. Ao final cita que na ausência de dados levantados pode-se utilizar o modelo de corrente constante para potência ativa P e o modelo de impedância constante para potência reativa Q .

Concluindo, a força tarefa recomenda aos analistas de sistemas de potência: Familiarização com a literatura recente sobre o assunto; seleção de modelos mais realistas disponíveis para uso em análises de curto prazo; investigação de fontes de dados disponíveis sobre cargas, dados de faturamento, dados de pesquisas sobre consumo, etc. Recomenda também o desenvolvimento de um plano para aquisição de dados através de medições e/ou composição de cargas.

A referência [6] apresenta um estudo de modelagem estática aplicado a uma rede básica “Eskon’s main transmission system”, incluindo barras de cargas específicas (Witkop, Foskor e Merensky) e classes de consumo específicas (residencial, industrial e comercial). A modelagem apresentada nesta referência é a do tipo exponencial. O trabalho adota a abordagem da composição de cargas partindo das características dos componentes, agrupando os consumidores em subclasses, classes e em seguida obtendo-se a composição de carga das barras representativas do sistema, chegando ao final aos modelos de cargas gerais do sistema em estudo.

Como resultados e conclusões de maior destaque, o trabalho referenciado em [6] cita que o sistema principal (Rede Básica) ESKON pode ser aproximado por modelo de corrente constante para potência ativa e impedância constante para potência reativa. Outra conclusão é que existe uma larga variação de modelos para os diferentes tipos de consumidores, sendo um modelo para mineração o mais impactante no desempenho do sistema devido à larga utilização de grandes motores de indução. A carga menos impactante é a carga residencial que tende a ser impedância constante para P e principalmente para Q .

Em [7] mostra-se que o modelo de potência constante é normalmente utilizado nos estudos de otimização, conduzindo muitas vezes a resultados e análises incorretas. O autor analisa os impactos do uso dos modelos de potência constante e impedância constante sobre os estudos de otimização aplicados a um sistema real de 251 barras da região de Taiwan. Os modelos são incorporados à técnica de programação de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) considerando-se somente o modelo

de potência constante a partir do qual se deriva a aplicação para modelo de carga de impedância constante. Outra questão relatada nesta referência [7] é que para situações de carga pesada e/ou contingências, os diferentes modelos de carga conduzem a resultados opostos, ou seja, para uma mesma situação, um modelo não indica solução viável quando o outro indica um resultado viável, dificultando ações e considerações decisórias sobre a operação do sistema.

O trabalho [8] apresenta as considerações e resultados de um projeto de pesquisa sobre obtenção de parâmetros de modelagem de carga através de medição direta. Sugere-se, além da opção de variação de tensão por comutação de tapes, uma alternativa de produzir variações através do desligamento de um transformador em situações de operação deste em paralelo com outro, com tapes distintos. O objetivo desta segunda opção é provocar variações abruptas na tensão sem a necessidade de aguardar os tempos de comutação presentes na forma tradicional, considerando possíveis influências na determinação dos parâmetros. Os autores analisam a questão da obtenção de resultados mediante a aplicação de diferentes variações de tensão e conclui que os parâmetros são pouco afetados nestas condições, e sugere a realização dos testes entre 14:00h e 16:00h considerando uma maior estabilidade da carga neste período. Para obtenção do modelo final, recomenda a média entre os valores obtidos nos diversos ensaios realizados. Como conclusões de destaque, os autores consideram válido o método de obtenção de parâmetros estáticos e características de comportamento dinâmico das cargas por meio de medição direta decorrente de variações de tensão pelos métodos citados. O trabalho também aborda a questão de testes sobre cargas com variado grau de regulação na rede, sendo necessário aguardar um tempo para estabilização, tanto maior quanto maior for a presença de regulação distribuída. Concluindo, reforça a necessidade de realização de testes de campo em diferentes estações do ano.

Uma crítica importante a ser registrada para este trabalho [8] é com relação à opção de variação de tensão através da abertura de paralelismo de transformadores. Neste caso deve-se considerar os riscos e restrições relacionados às possibilidades de uma recirculação indesejável e por vezes perigosa de correntes entre os transformadores, além de eventuais transtornos junto aos consumidores com cargas mais sensíveis às variações abruptas de tensão, decorrentes da manobra de desligamento de um dos transformadores. Outra questão de interesse a ser colocada sobre o trabalho [8] é que a escolha de um período de carga mais estável realmente permite a obtenção de resultados mais confiáveis devido à baixa interferência das flutuações da carga, porém sua validade fica limitada àquele intervalo, já que a composição de cargas em qualquer ponto varia ao longo do dia. O que deve ser feito

nesta questão é uma análise prévia de medição para escolha dos períodos de maior estabilidade para realização de um levantamento de parâmetros mais amplo e representativo de todo o período diário.

Em [9] discute-se a determinação de modelos estáticos através de variações de tensão provocadas por variações de tapes de transformadores de subestação sobre um alimentador com carga predominantemente residencial contendo três bancos de capacitores automáticos. Como resultado o trabalho registra a facilidade de se obter o modelo de carga com os bancos desligados e as dificuldades e interferências advindas do chaveamento destes. O modelo polinomial foi utilizado e seus parâmetros foram obtidos por ajustamento aos dados de ensaios realizados por variação de tapes com e sem os bancos ligados, cujos resultados diferem da ordem de $\pm 10\%$, sendo considerados aceitáveis. Nesta referência verificou-se ainda que os dados obtidos através do chaveamento forçado dos bancos de capacitores, não foram suficientes para provocar alterações de tensão e potência que pudessem ser distinguidas das variações naturais da carga, inviabilizando a modelagem por esta opção.

O trabalho [10] propõe uma abordagem usando regressão “fuzzy” para estimar com maior exatidão modelos dinâmicos e estáticos representativos da carga. A razão exposta é que o trabalho considera preocupante e de baixa confiança as modelagens tradicionais por ajustamento de dados experimentais, notadamente para situações de forte variação de tensão. Foram conduzidos testes de campo através de comutação de tapes e utilizados modelos polinomiais como referência. Concluindo, nesta referência considera-se que a disponibilidade atual de instrumentação digital torna os testes e simulações relativamente baratas. Reitera a questão da validade dos resultados de testes para modelagem por ajustamento considerando as incertezas impostas pela variação aleatória da carga e propõe um aprofundamento na alternativa de abordagem combinada de testes de campo e regressão “fuzzy”.

Em [11] estão descritos testes de campo aplicando variações de tensão por meio de comutação de tapes de transformadores sobre cargas comerciais e residenciais. A partir dos dados coletados foram propostas modelagens dinâmicas e estáticas. No caso específico da modelagem estática foram sugeridos modelos lineares de representação. Neste aspecto, acredita-se que a representação linear seja apenas válida para as pequenas perturbações, levando-se à necessidade de adoção de modelos mais elaborados como o exponencial e polinomial para representar as relações entre carga e tensão numa faixa mais ampla. O trabalho também analisa a questão das incertezas impostas pela flutuação da carga e recomenda a realização de

alguns ensaios para obtenção de uma massa maior de dados para tratamento e busca de parâmetros mais confiáveis.

O trabalho descrito em [12] enfatiza que, apesar de se conhecer como cada elemento da carga se comporta individualmente, não se tem uma ideia precisa da sua composição final. Isto ocorre devido à grande diversidade de equipamentos que compõem a carga, sua forma aleatória de agregação e a constante variação com o tempo.

Em [13] propõe-se a utilização de lógica nebulosa para tratamento e conformação dos dados de medição, visando minimizar os efeitos das flutuações naturais da carga sobre a determinação dos parâmetros de modelagem. Com a aplicação da técnica foi possível obter resultados para os modelos exponencial e polinomial ZIP, com erros médios inferiores aos obtidos com os dados de medição brutos.

A referência [48] apresenta um modelo de carga misto, composto por uma parcela “motor de indução” e outra estática, representada por uma impedância variável. O método estabelece uma técnica de estimação dos parâmetros de forma sequenciada e através de simulações apresenta resultados aceitáveis para representação da potência ativa, mas falha na representação da potência reativa, requerendo maior investigação e aprofundamento.

A partir da análise dos dados das curvas carga (diária), o trabalho [49] apresenta um modelo intitulado de “Síntese Dinâmica” que agrupa modelos estáticos e dinâmicos. A proposição do modelo é superar as dificuldades do método de composição, que exige pesquisas frequentes de consumo e também as restrições de ordem prática do método de medição. Para isso, o modelo estabelece parcelas de curvas de carga típicas existentes na curva da carga total e cria um algoritmo de síntese dinâmica. Seus resultados não apresentam os parâmetros de carga propriamente ditos, pois na verdade as formulações partem deles, de composições feitas a partir de comportamentos típicos de cargas individuais, utilizando-se o modelo exponencial convencional. A validade da metodologia é testada através de simulações de falta no sistema, comparando-se com dados obtidos de registradores de perturbação. Dessa forma, observa-se que o trabalho diverge da abordagem de modelagem comumente pesquisada e entende-se que demanda maior discussão e reavaliação.

O trabalho [50] destaca a importância do conhecimento dos modelos estáticos da carga nos estudos relacionados à determinação dos índices de estabilidade de tensão, com a desejada acurácia. Basicamente o algoritmo proposto baseia-se em reconfiguração de rede pelo método de redução de perdas. Neste caso foi utilizada a

modelagem do tipo exponencial, mostrando-se particularmente eficaz para melhoria do processo.

A referência [51] aborda de forma geral a questão da modelagem de carga, destacando-se a presença forte dos motores de indução (60-70%) e propondo então um modelo misto, composto de uma parcela do modelo ZIP tradicional e um motor e indução equivalente, em paralelo, representado por um modelo de terceira ordem. O procedimento de extração dos parâmetros baseou-se em medições realizadas numa barra de 60kV e aplicação do método de mínimos quadrados, conduzindo a resultados específicos aceitáveis sem contudo permitirem abrangência e generalização.

As referências [52] e [53] reforçam a utilização do procedimento de medição direta, destacando-o como o método mais propício e eficiente para extração dos modelos estáticos ou transitórios. Nestes trabalhos o processo de variação da tensão utilizado é aquele que ocorre automaticamente ao longo do dia. Segundo os autores, isso não é uma dificuldade, pois, normalmente os ULTC (Under Load Tap Changers) operam várias vezes ao longo do dia, oferecendo naturalmente uma amostra farta de ensaios. Assim sendo, a partir das variações dos taps, o sistema de medição captura os dados de variação de tensão e da carga para extração dos modelos. Esta metodologia introduz um conceito de “recuperação de carga” a partir de uma variação qualquer da tensão e utilizando critérios estatísticos pode validar ou não o referido ensaio decorrente da atuação de um ULTC. Neste ponto chave a questão requer maior atenção, pois, mesmo considerando que a captura de dados é suficientemente precisa (de baixo “Threshold”), e um algoritmo de validação ou descarte do ensaio seja eficiente, as variações naturais da carga e da própria tensão poderão interferir negativamente no processo, principalmente considerando a baixa variação de tensão imposta à carga quando da variação do Tap (normalmente 0,625%Vn).

Diante desta revisão bibliográfica pode-se concluir que:

- O método por composição a partir dos modelos dos elementos de carga envolve um processo extenso, trabalhoso e contínuo de avaliação dos hábitos e comportamentos do usuário final;
- As medições diretas estão se tornando cada vez mais viáveis economicamente, considerando principalmente as tecnologias de medição disponíveis. Assim é possível a obtenção experimental de modelos de cargas em pontos de interesse quaisquer do sistema (alimentadores, barras, etc);

- A modelagem estática de carga é um processo muito pesquisado e investigado, mas ainda carente de abordagens mais práticas e definitivas.

Assim sendo o desenvolvimento de novas metodologias para determinação dos modelos de carga é de extrema relevância para o setor elétrico mundial, impactando tanto em procedimentos de operação quanto nas análises relativas ao planejamento dos sistemas elétricos de potência.

3. Contribuições do trabalho.

A principal contribuição do presente trabalho é a apresentação de um modelo de carga mais aprimorado, intitulado “modelo polinomial ampliado”, baseado nos dados obtidos dos ensaios de campo, cujos procedimentos baseiam-se em excursões mais amplas de tensão, seguindo uma metodologia de ensaios sistematizada, que reduz as incertezas devidas às variações aleatórias da carga durante o processo de medição. Para tanto o processo de obtenção dos parâmetros dos modelos é realizado através da aplicação de programas de otimização, similares aos procedimentos utilizados no problema de estimação de estados (método dos mínimos quadrados).

O modelo polinomial ampliado resolve o problema da limitação da representação polinomial clássica para certas cargas, principalmente para a potência reativa, que apresenta elevados expoentes na representação exponencial.

Outra contribuição importante e objetiva do trabalho são as tabelas de parâmetros de modelagem com as três opções de modelagem abordadas (polinomial clássico, polinomial ampliado e exponencial), para os grandes grupos de carga predominantes (residencial, comercial e industrial), e nos vários horários representativos da carga ao longo do dia, para dias de semana, sábado e domingo.

Resumindo, as principais contribuições deste trabalho são a divulgação de uma metodologia de modelagem através de uma técnica sistematizada de ensaio de campo e a obtenção dos respectivos modelos por meio de programas de otimização, resultando na minimização de incertezas e, conferindo maior realismo e segurança aos diversos estudos relacionados aos SEP.

4. Estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma discussão sobre os aspectos conceituais relacionados à modelagem de carga, abordando as metodologias e formulações matemáticas que envolvem o assunto. Sobre as metodologias de modelagem é feita uma análise detalhada comparando suas características (vantagens e desvantagens) mais importantes. Na sequência são apresentadas as formulações matemáticas relacionadas ao processo de modelagem, os conceitos utilizados e a aplicação de otimização na determinação dos parâmetros.

No Capítulo 2 apresenta-se detalhadamente a metodologia para realização dos ensaios de campo. A intenção é oferecer um procedimento de teste, mais confiável e sistematizado que facilite sua aplicação e obtenção dos dados para posterior estimação dos parâmetros de modelagem da carga. Adicionalmente coloca-se uma opção de realização automática dos testes através de rotinas programadas em sistemas supervisórios de telecontrole.

No Capítulo 4 são apresentados testes e resultados para validação da metodologia e um caso exemplo da Cemig para avaliar os impactos físicos e financeiros decorrentes da modelagem de carga. Os estudos, tanto para validação, quanto para avaliação dos impactos, foram baseados em medições realizadas em instalações da Cemig. O objetivo do estudo de validação é comparar as curvas estimadas com as reais nos intervalos de ensaio, avaliando os erros máximos ocorridos e validando a metodologia de modelagem proposta. Como exemplo de aplicação e consolidação da metodologia proposta são apresentados e analisados os resultados das medições conduzidas em pontos elétricos de interesse na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais. Os pontos envolvidos são alimentadores residenciais, comerciais e industriais de distribuição ligados às barras das subestações Juiz de fora 1 e Juiz de Fora 2. O objetivo é gerar uma base de dados (tabelas de parâmetros) preliminar para estes grandes grupos de cargas típicas. Para o estudo dos impactos da modelagem foram utilizados dados reais de um planejamento para atendimento a uma solicitação de aumento de demanda de um cliente (indústria) ligado numa rede da subestação de Barroso 3, da Cemig.

No Capítulo 5 são feitas as considerações finais sobre o trabalho e algumas indicações importantes para futuras e relevantes investigações de interesse na área.

5. Publicações e Submissões Decorrentes da Pesquisa.

- 1- Gaspar, W.; Garcia, P.; Amaral, M. *et al*, *Modelagem Estática de Carga com Ajuste de Dados Através de Lógica Nebulosa*, XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, XII SEPOPE, Maio de 2012, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- 2- Gaspar, W.; Oliveira, E. J.; Garcia, P.; Amaral, M., *Static Load Model Adjustment using Fuzzy Logic and Differential Evolution*, Induscon 2012, Induscon 12 - A1D: Real Power Systems, v. 1. p. 1-7, Fortaleza, Brasil, November 2012.

Capítulo 2

Aspectos conceituais: metodologias e formulação proposta

1. Metodologias de Modelagem.

A tarefa de modelagem de cargas em um Sistema elétrico de potência (SEP), não é algo simples ou trivial e há muito tempo tem recebido a atenção de especialistas de todo o mundo. Todo esse interesse e dedicação à questão decorrem do fato de que diversos estudos de análise de sistemas de potência podem ser afetados de forma significativa pela modelagem de carga adotada.

Apesar de toda atenção recebida até o momento, a questão da modelagem de cargas ainda carece de aprimoramentos e de resultados passíveis de aplicação sistematizada e confiável.

A seguir serão descritos os conceitos e nomenclaturas inerentes aos processos de modelagem de carga, seguidos de descrições das duas metodologias mais comumente utilizadas para determinação dos modelos de carga, assim como a nova metodologia proposta neste trabalho.

1.1. Conceituação.

Cabe inicialmente discutir o conceito de carga. Em [1] discute-se os diversos conceitos para o termo carga empregado nos estudos dos sistemas elétricos. Neste trabalho considera-se como carga total de determinado ponto elétrico, a soma de todas as cargas individuais dos diversos equipamentos conectados direta ou indiretamente aos sistemas de transmissão de Alta Tensão (AT), Distribuição de Média Tensão (MT) e Baixa Tensão (BT), incluindo-se as parcelas referentes aos diversos elementos de transporte e controle do sistema, tais como cabos, transformadores, reatores, bancos de capacitores, etc.

Outro conceito muito utilizado considera como elementos de carga apenas os aparelhos e equipamentos conectados aos diversos consumidores do sistema, servindo principalmente à modelagem por composição, que será discutido adiante. Em ambos os modelos, a carga será expressa pela potência ativa P e potência reativa Q .

Outros conceitos importantes são os de cargas estáticas e dinâmicas e as respectivas representações. As cargas consideradas estáticas são aquelas que não possuem partes girantes (campos girantes) tais como alimentadores, transformadores, reatores etc e demais cargas dessa natureza como resistências, iluminação, etc. As

cargas dinâmicas basicamente são representativas de máquinas e alguns tipos de aparelhos e controladores eletrônicos.

A modelagem estática consiste em representar adequadamente as cargas estáticas nos estudos em regime permanente, onde são considerados somente perturbações sustentadas de tensão e frequência do sistema. Estes modelos servem também a representações aproximadas para análises dinâmicas.

A modelagem dinâmica representa as cargas em situações de perturbações transitórias do sistema e servem aos diversos estudos dessa natureza. Nestes casos a representação se faz através de equações algébricas e também equações diferenciais representativas do comportamento das potências ativas e reativas em função da tensão e frequência do sistema e suas variações.

1.2. Modelagem pelo Método da Composição de Cargas.

O método de composição parte de dados sobre o comportamento dos diversos elementos de carga ligados à fonte da concessionária, chamados doravante de componentes de carga, cujos dados remontam de pesquisas laboratoriais e devem ser continuamente atualizados para as novas versões de aparelhos e equipamentos elétricos disponíveis no mercado. Para melhor compreensão, um componente de carga reúne cargas de características e respostas semelhantes diante de variações de tensão e frequência. Por exemplo, cargas de aquecimento, refrigeração, um determinado ramo industrial típico que usa largamente grandes motores de indução, sistemas de iluminação, um determinado tipo de aparelho ou equipamento relevante, etc, representam componentes de carga. Assim para cada componente de carga é levantado seu comportamento estático retratado por uma expressão matemática do tipo exponencial ou polinomial, cuja apresentação e detalhes serão discutidos posteriormente.

Conhecidas suas características parte-se para um primeiro nível de agregação deste modelo. Esta primeira composição se dá a partir da definição de outro conceito caracterizado por classes de cargas que se resumem em classes de comportamento de consumo similares. Assim, podem ser relacionadas diversas classes ou sub-classes. Por exemplo, a classe residencial, a classe industrial, e a classe comercial constituem os grandes grupos de cargas normalmente considerados nos estudos de modelagem. Neste ponto, para cada classe e período de carga (Leve/Média/Pesada), são obtidos os parâmetros típicos a partir da composição ou contribuição dos vários componentes de carga. Seguindo este procedimento surge um novo conceito a considerar que é a composição de carga em determinado ponto elétrico de interesse.

Como o próprio nome sugere a composição de carga retrata os percentuais das diversas classes de carga que resultam na carga total daquele ponto. Normalmente os pontos comuns de interesse são o alimentador (ou partes deste), as barras de um sistema, ou o próprio sistema como um todo, resumido ou considerado equivalente a partir de um ponto.

A base para obtenção das composições de carga são os dados comumente tratados pelas áreas de faturamento que pré-classifica os consumidores por classes de consumo, normalmente residencial, comercial e industrial, já comentadas. Muitas vezes é necessário subdividir estas grandes classes em subclasses e nem sempre os dados disponíveis são agregados da forma que se deseja, resultando numa real dificuldade que poderá demandar reformulações e levantamentos adicionais nos processos de classificação junto aos setores de faturamento.

Vencidas estas dificuldades, têm-se então disponíveis os percentuais de classes de cargas concentrados no ponto de interesse. A partir daí os elementos de sistema (redes e equipamentos) devem ser agregados à carga, para finalmente calcular os parâmetros estáticos dos modelos para alimentadores, barras ou sistemas inteiros.

Pode-se observar então que o método por composição de cargas envolve um processo extenso que demanda contínua avaliação dos hábitos e comportamentos do usuário final, trabalhos estatísticos e diversas agregações, o que fragiliza a adoção desta metodologia.

1.3. Modelagem pelo Método de Medição Direta.

A segunda metodologia, foco deste trabalho, utiliza procedimentos de medição e análise de resultados de campo, obtidos diretamente do sistema real. Este método, bastante atrativo em princípio, resume-se na medição direta das características da carga nos pontos de interesse.

O método requer normalmente medições de potência ativa P e potência reativa Q , mediante variações graduadas e limitadas de tensão impostas ao sistema sob análise. Estas variações normalmente são obtidas por meio de comutações em dispositivos reguladores de tensão ou chaveamento de bancos de capacitores ligados em derivação.

A partir dos testes, um conjunto de dados de medição é registrado apropriadamente em aparelhos instalados e programados adequadamente ao processo. Posteriormente, procede-se uma análise de resultados para obtenção dos parâmetros do modelo e sua caracterização final.

1.4. Medição Direta x Composição de Cargas.

Uma comparação entre os dois principais métodos de modelagem aqui descritos, além de considerar as vantagens e desvantagens de cada um, enseja uma investigação da integração e complementaridade entre eles.

Basicamente pode-se citar que o método da composição tem a vantagem de poder ser aplicado a outros sistemas dos quais se conhece a composição de cargas. Tem como grande desvantagem a necessidade de se fazer e/ou manter todo um conjunto de dados de faturamento/consumo classificados adequadamente para este processo de agregação sucessiva de dados. Além disso, requer uma atualização de características de novos componentes de carga e as consequentes influências dentro das diversas classes existentes ou mesmo a redefinição de novas classes de interesse/necessidade.

Neste método observa-se um conjunto de passos onde em cada um deles existe um certo grau de incerteza. No modelo final certamente haverá um razoável grau de incerteza, resultando em desconfiança sobre sua real validade.

O método de medição direta tem a vantagem aparente da simplicidade de obtenção dos parâmetros desejados através da variação Intencional da tensão e obtenção das correspondentes variações de potência ativa e reativa. Contudo, normalmente o processo é afetado negativamente pelas flutuações naturais da carga, acarretando imprecisões nos resultados. Além disso, o processo requer a instalação de medidores e seus acessórios (TP e TC) em pontos de interesse onde não haja medição previamente instalada, requerendo tempo e investimentos necessários à aquisição e despesas operacionais decorrentes dessa instalação.

De forma semelhante ao outro método, o processo de medição direta requer também atualização de parâmetros por períodos pré-definidos ou sempre que ocorrerem mudanças drásticas de topologia e composição de cargas no sistema ou em seus subsistemas, barras, redes, etc. No futuro próximo, com a implementação de "Smart Grids", certamente aumentará a observabilidade e o monitoramento do sistema, facilitando a implementação de rotinas (programas) de modelagem de carga diretamente nos dispositivos remotos, instalados ao longo das redes.

2. Formulação Matemática.

Segundo o IEEE [13], um modelo de carga é uma representação matemática da relação entre a tensão (magnitude e frequência) e a potência (ativa e reativa) associada à determinada barra de carga de um sistema.

Em [13] discute-se os modelos estáticos que representam as cargas em situações de regime diante de variações sustentadas de tensão e frequência e para certos casos servem como aproximação para análises dinâmicas. Eles são expressões algébricas em função da tensão e da frequência.

$$P = f(V, f) \quad (2-1)$$

$$Q = g(V, f) \quad (2-2)$$

Já os modelos dinâmicos são compostos de equação algébricas e diferenciais de tal forma que a dinâmica das partes girantes das máquinas sejam representadas.

$$\dot{P} = f(P, V, f) \quad (2-3)$$

$$\dot{Q} = g(Q, V, f) \quad (2-4)$$

Em estudos estáticos, as variações de frequência são mínimas, e os modelos resumem-se em funções dependentes da amplitude da tensão. Doravante, passa-se a discutir o modelo clássico polinomial e modelo clássico exponencial.

O modelo clássico polinomial é expresso por:

$$P = P_o(AV^0 + BV^1 + CV^2) \quad (2-5)$$

Onde P é a potência ativa, P_o é a potência ativa para tensão nominal V_o e A , B , C são coeficientes do modelo polinomial e constituem parcelas da carga total ($A+B+C=1$).

Na equação (2-5), o primeiro termo representa a parcela de carga que se comporta como potência constante, o segundo representa a parcela da carga que se comporta como corrente constante, e o terceiro representa a parcela da carga que se

comporta como impedância constante. O modelo polinomial é comumente tratado como modelo **ZIP** (Impedância, corrente e potência constante).

No modelo clássico exponencial se procura ajustar a carga a uma curva analítica da forma:

$$P = P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_p} \quad (2-6)$$

Onde P_o é a potência ativa na tensão nominal V_o e α_p é um expoente real a ser determinado.

Analogamente para potência reativa as equações polinomial e exponencial tomam, respectivamente, a seguinte forma:

$$Q = Q_o (A_1 V^0 + B_1 V^1 + C_1 V^2) \quad (2-7)$$

$$Q = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_q} \quad (2-8)$$

Onde Q é a potência reativa, Q_o é a potência reativa para tensão nominal V_o e A_1 , B_1 , C_1 são os coeficientes do modelo polinomial e α_q é o expoente do modelo exponencial. Da mesma forma, A_1 , B_1 , C_1 constituem parcelas da carga reativa total ($A_1 + B_1 + C_1 = 1$).

Para ilustração, a Tabela 1 mostra valores típicos de α_p e α_q para alguns aparelhos e equipamentos elétricos comumente utilizados.

Tabela 1-Valores típicos - parâmetros de componentes de carga-modelo exponencial.

Componente de carga	α_p (Potência ativa)	α_q (Potência reativa)
Resistência para aquecimento ambiente	2,00	0,00
Bomba do sistema de aquecimento	0,20	2,50
Bomba de ar condicionado	0,20	2,50
Ar condicionado central	0,20	2,20
Ar condicionado para quartos	0,20	2,50
Aquecedor de água	2,00	0,00
Refrigerador e freezer	0,80	2,50
Lava-louças	1,80	3,50
Máquina de lavar roupas	0,08	1,60
Máquina de secar roupas	2,00	3,30
Lâmpada incandescente	1,54	0,00
Lâmpada fluorescente convencional	2,07	3,21
Lâmpada fluorescente compacta	0,95-1,03	0,31-0,46
Pequenos motores industriais	0,10	0,60
Grandes motores industriais	0,06	0,50
Bomba d'água para irrigação	1,40	1,40

É importante destacar a dificuldade do modelo **ZIP** convencional para representar a potência reativa. As cargas reais frequentemente apresentam parcelas com expoentes acima de 2 e a representação polinomial convencional não é suficiente para representá-la adequadamente. Sendo assim é proposta neste trabalho a utilização de polinômios de ordem superior ao **ZIP** convencional, conforme mostrado no próximo item 3.

3. Modelo Polinomial Ampliado

Tendo em vista as limitações do modelo **ZIP** convencional na representação de algumas cargas, principalmente reativas, foi proposto neste trabalho o modelo polinomial ampliado. Assim, esse novo modelo apresenta-se como um polinômio em V (tensão), de grau compatível com a carga representada.

Para este modelo ampliado, a formulação matemática tem forma semelhante ao processo convencional, contudo envolvendo agora um polinômio de grau n , conforme mostrado na Equação (2-9):

$$P_i(x) = P_0 \sum_{j=0}^n a_j \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^j \quad (2-9)$$

Onde:

$i = 1 \rightarrow m$;

$P_i(x)$: Polinômio de estimação de grau n ;

P_0 : Potência ativa na tensão de referência V_0 ;

a_j : Parâmetros da carga;

m : número de medidas.

A formulação para potência reativa é análoga à Equação (2-9), bastando substituir **P** por **Q**.

A utilização da modelagem proposta apresenta resultados plenamente satisfatórios, resolvendo as atuais dificuldades e limitações do modelo ZIP convencional. Naturalmente as parcelas de expoente acima de 2 não têm significado físico definido que possa ser associado às parcelas Z(impedância constante), I(corrente constante) ou P(potência constante).

4. Aplicação da Otimização.

A partir dos dados obtidos nas medições, a metodologia propõe a formulação de um problema de estimação de estados através do método dos “mínimos quadrados” para avaliar de maneira ótima os parâmetros do modelo de carga. Pode-se obter, então, um conjunto de parâmetros que proporcione a soma mínima dos erros quadráticos entre os valores medidos e calculados pelo modelo.

Os problemas de otimização, para ZIP convencional, ZIP ampliado e exponencial são descritos a seguir:

- “Modelo Polinomial Convencional - ZIP”

$$\text{Min } J(x) = \sum_{i=1}^m (P_i^{\text{med}} - P_i(x))^2 \quad (2-10)$$

$$\text{s.a. } a_p + b_p + c_p = 1 \quad (2-11)$$

$$0 \leq a_p \leq 1 \quad (2-12)$$

$$0 \leq b_p \leq 1 \quad (2-13)$$

$$0 \leq c_p \leq 1 \quad (2-14)$$

Onde:

$$x = (a_p, b_p, c_p, P_0) \quad (2-15)$$

$$P_i(x) = P_0 \left(a_p + b_p \frac{V_i}{V_0} + c_p \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 \right) \quad (2-16)$$

$J(x)$: Função objetivo;

P_i^{med} : i-ésima medida de potência ativa;

m : número de medidas de potência ativa;

a_p, b_p, c_p : parâmetros do modelo ZIP;

P_0 : Potência ativa na tensão V_0 .

A expressão (2-15) representa o vetor de parâmetros a serem estimados e a equação (2-16) é utilizada para o cálculo da potência ativa da carga.

O problema proposto garante uma solução para os parâmetros a_p , b_p , c_p , respeitando os limites impostos pelas restrições (2-12), (2-13) e (2-14) respectivamente. Neste caso, a solução encontrada sempre está dentro das condições reais da carga, ou seja, não se encontra solução negativa para os parâmetros.

A restrição (2-11) representa a equação de adequação da carga. A inclusão desta restrição impõe uma solução realista para os parâmetros, ou seja, a solução obtida representa 100% da carga medida.

A solução do problema de otimização (2-10) é obtida utilizando-se programas de otimização criados no ambiente do software de otimização "LINGO". O resultado consiste em um conjunto de parâmetros que proporciona o menor desvio médio quadrático entre as medições reais e o modelo ZIP.

No caso da potência reativa as expressões matemáticas são similares, bastando trocar o índice P pelo índice Q nas variáveis, considerando-se o modelo ZIP convencional.

- "Modelo Polinomial Ampliado"

Como normalmente nas situações reais o modelo ZIP para a parcela reativa da carga precisa ser ampliado, o modelo adequado é um ZIP Ampliado, que é um polinômio de grau n , genérico, cujos parâmetros são igualmente definidos através de métodos e programas de otimização. Para determinação prática dos parâmetros através do programa de otimização, o grau do polinômio a adotar precisa ser determinado. A seleção se dá mediante a verificação do modelo exponencial que representa a carga. Para uma adequada representação, naturalmente o grau do polinômio pesquisado deve ser maior que o expoente encontrado no modelo exponencial. No geral, o grau 20 é suficiente para uma adequada representação e modelagem da carga.

Para o "Modelo Ampliado", a formulação do problema é semelhante ao processo convencional, contudo envolvendo agora um polinômio de grau n , e $n+1$ parâmetros a determinar:

$$\text{Min } J(x) = \sum_{i=1}^m (P_i^{\text{med}} - P_i(x))^2 \quad (2-17)$$

$$\text{s.a. } 0 \leq a_j \leq 1 \quad (2-18)$$

$$\sum_{j=0}^n a_j = 1 \quad (2-19)$$

Onde $P_i(x)$ é dado pela Equação (2-9).

A solução do problema de otimização (2-17) também é obtida utilizando-se os programas desenvolvidos na plataforma “LINGO”.

O resultado deste processo apresenta os parâmetros P_o e a_j de forma a proporcionar o mínimo desvio entre as medições reais e o modelo polinomial ampliado. Assim como no modelo ZIP, as expressões matemáticas da potência reativa são obtidas trocando o índice P pelo índice Q nas variáveis.

- “Modelo Exponencial”

O modelo exponencial também é resolvido utilizando-se processo similar de estimação de estados. Para a potência ativa, o problema é escrito como:

$$\text{Min } J(x) = \sum_{i=1}^m (P_i^{med} - P_i(x))^2 \quad (2.20)$$

$$\text{s.a. } \alpha_p \geq 0 \quad (2.21)$$

$P_i(x)$ é dado pela Equação (2-6). A solução do problema de otimização (2-20) também é obtida utilizando-se os programas desenvolvidos na plataforma “LINGO”. O resultado deste processo apresenta os parâmetros P_o e α_p de forma a proporcionar o mínimo desvio quadrático entre as medições reais e o modelo exponencial. Assim como nos modelos polinomiais, as expressões matemáticas da potência reativa são obtidas trocando o índice P pelo índice Q nas variáveis.

5. Impactos gerais da modelagem de cargas sobre a tensão.

Sabe-se que o comportamento real da carga tem uma estreita correlação com sua tensão terminal e indiretamente impactam as tensões e controles de um sistema qualquer de transmissão e/ou distribuição. Certamente diferentes tipos e modelos de carga impactam de forma diferenciada o sistema. Para análise dessas situações, utiliza-se o circuito apresentado na Figura 1. Trata-se do circuito equivalente de *Thevenin* de um sistema elétrico até uma barra de interesse possuindo tensão V e uma carga estática a ser estudada.

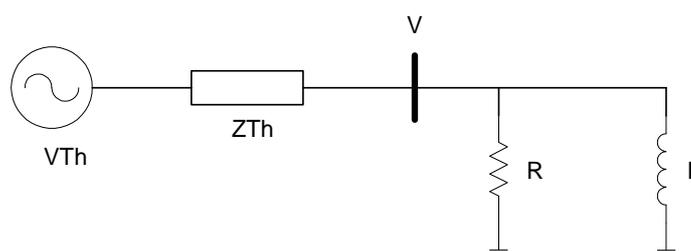


Figura 1 - Circuito equivalente de um sistema elétrico qualquer.

Para verificar os impactos de modelos de cargas diferenciados sobre o sistema perante variações de tensão, considera-se, por exemplo, uma variação de tensão (queda) no circuito.

Inicialmente supõe-se o modelo de carga do tipo impedância constante. Nesta situação, haverá normalmente uma diminuição simultânea da tensão e corrente da carga e conseqüentemente uma redução na carga ativa demandada:

$$P = RI^2 \quad (2-22)$$

$$Q = X_L I^2 \quad (2-23)$$

Ao reduzir a corrente, a queda de tensão na impedância equivalente de *Thevenin* diminui, contrariando o distúrbio na mesma. Assim será estabelecida uma tensão de convergência ou de estabilização atenuada pelo próprio comportamento da carga, que desta forma “ancora” a tensão.

Considerando agora a carga como sendo do tipo potência constante, deduz-se facilmente que quando ocorre uma queda de tensão sistêmica, a potência da carga concentrada ao final do circuito praticamente não varia, obrigando a corrente a aumentar e provocar quedas de tensão mais acentuadas.

Avaliando melhor esta situação, basta imaginar o circuito da Figura1 contendo ramificações ao longo da linha que interliga a fonte à carga. No caso do modelo de

impedância constante para a carga concentrada ao final do circuito, as tensões ao longo das supostas redes ramificadas ficam mais preservadas do que no caso do modelo potência constante. Uma situação intermediária seria a de cargas do tipo corrente constante, normalmente encontrada em muitos casos reais de barras e alimentadores.

Deve-se observar que as cargas ativas e reativas de um sistema são compostas de parcelas de impedância, corrente e potência constante. As parcelas ativas têm expoentes comuns entre 1 e 2 na representação exponencial, obtidos a partir de resultados experimentais. A carga reativa em geral, não considerando as correntes de magnetização dos transformadores e motores, é representada por:

$$Q \approx V^m \quad (2-24)$$

Onde m é próximo de 2. Já a carga reativa total integrada, agregando todos os componentes de sistema, poderá assumir modelos com expoentes bem maiores.

Para ilustrar estes comportamentos, analisa-se através da Figura 2, por exemplo, uma carga ativa P , modelada por:

$$P_1 + P_2 + P_3 \quad (2-25)$$

Onde P_1 , P_2 , e P_3 , são parcelas do tipo corrente, impedância e potência constantes. As curvas da Figura 2 mostram que para uma pequena queda de tensão ΔV , a parcela de carga do tipo P constante simplesmente não varia obrigando a um aumento de corrente e maior degradação das tensões ao longo das redes. Inversamente a parcela de carga do tipo carga do tipo Z (impedância constante) altera com o quadrado da variação de tensão suposta, reduzindo a corrente demandada e preservando melhor os níveis de tensão ao longo do circuito. O caso intermediário que é a parcela do tipo I (corrente constante) não acarreta problema nas tensões ao longo da rede à medida que a tensão do sistema sofre variações.

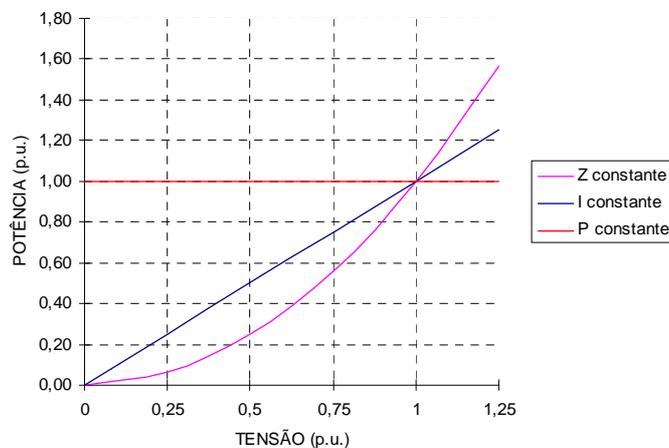


Figura 2 - Curvas de modelos de carga para análise da correlação P-V.

Outro ponto relevante são os impactos da adoção de diferentes modelos de carga sobre os resultados dos estudos de estabilidade de tensão. A Figura 3 ilustra bem estas situações através das curvas P - V de uma determinada barra. Nesta figura fica evidenciado que cargas adotadas com predominância de Z constante ampliam estes limites que ficam bastante restritos nos casos de carga com modelo predominante do tipo P constante. A curva A está associada a uma carga com predominância de carga do tipo P constante e as curvas B e C retratam cargas predominantes do tipo I e Z constante respectivamente.

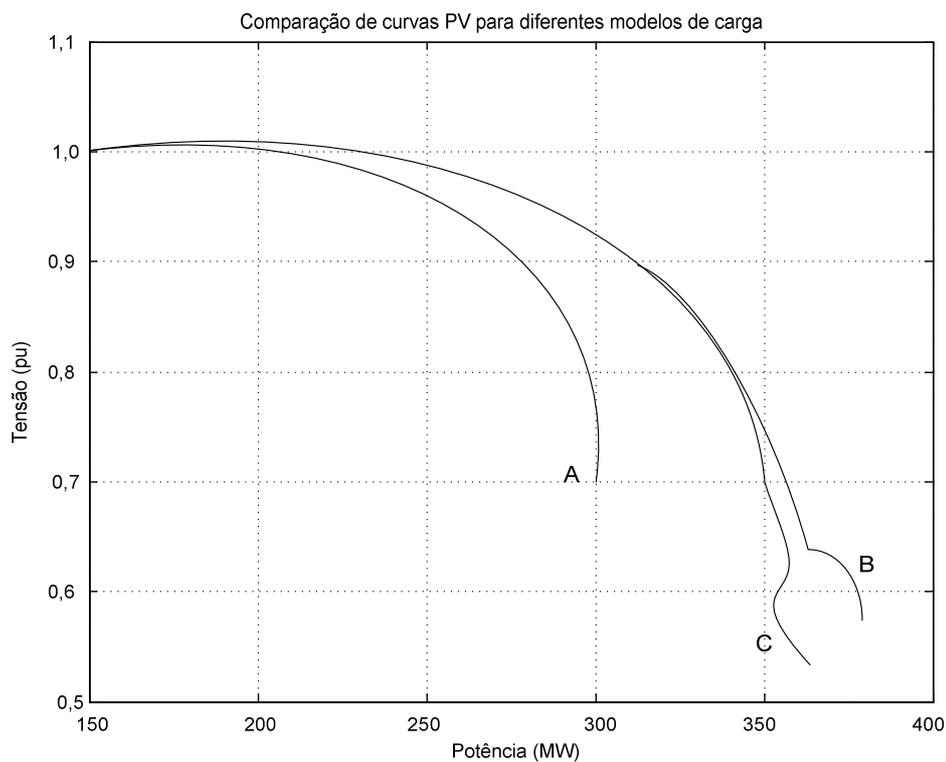


Figura 3 - Curvas P-V associadas a cargas com modelo predominante.

6. Sumário do capítulo.

Neste capítulo foram discutidos as metodologias de modelagem de carga fazendo-se uma comparação entre os métodos de composição e medição direta, destacando-se a praticidade e vantagens desse último, principalmente considerando o advento das “*Smart Grids*” que facilitará e aumentará o nível de monitoramento e possibilidades de aquisição de dados das redes.

Na sequência, são detalhados os modelos matemáticos do tipo exponencial e polinomial de representação da carga que são os modelos clássicos utilizados nos estudos em regime permanente. Além desses, apresenta-se um novo modelo, denominado “polinomial ampliado”, que permite à representação polinomial de cargas em qualquer situação, especialmente para cargas com elevado expoente no modelo exponencial. Nestas situações o modelo polinomial clássico é insuficiente para representar ou modelar a carga.

Na sequência, apresenta-se o processo de otimização, baseado em técnicas de estimação de estados, que determina os parâmetros dos modelos de carga, sejam eles polinomial, polinomial ampliado ou exponencial.

Capítulo 3

Método de medição e ensaios

1. Considerações iniciais.

A obtenção de modelos estáticos de carga compreende basicamente a obtenção dos parâmetros de sensibilidade das potências ativa e reativa da carga em resposta às variações estáticas de tensão, em determinado momento e ponto de interesse.

Uma modelagem de campo completa de determinada carga (sistema, barra, ponto da rede, etc) consiste inicialmente na apuração de dados ou levantamento de campo através de ensaios cuidadosamente elaborados envolvendo variações forçadas de tensão.

Posteriormente, os dados são analisados e trabalhados para obtenção dos modelos estáticos de carga comumente conhecidos. Com a massa de dados de tensão e potências ativa e reativa, adotou-se no presente trabalho, a utilização de técnicas de otimização para obtenção dos modelos exponenciais e polinomiais correspondentes. Alternativamente, a partir de um determinado modelo, facilmente obtém-se o outro por programas de conversão.

Obviamente a carga varia ao longo do dia. Um perfil tipicamente utilizado considera os valores das potências ativa e reativa integralizadas a cada intervalo de tempo (por exemplo 5 minutos, 15 minutos, 1 hora, etc). Certamente a composição de carga, ou seja, os percentuais de cada classe típica de carga que compõe a carga total em determinado momento podem variar durante o dia, entre dias de semana e fins de semana ou mesmo entre as diversas estações do ano.

No decorrer do dia é comum verificar que a carga varia desde um patamar conhecido por Carga Leve, notadamente de menor valor e que ocorre normalmente no período de 00h:00m às 07h:00m, passando pelos intervalos de Carga Média, de 07h:00m às 17h:00m e de 22h:00m às 24h:00m, até o pequeno período da Carga Pesada, que compreende o intervalo de 17h:00m às 22h:00m, quando a carga assume seu maior valor ou atinge sua ponta como é comumente conhecida.

Os levantamentos de campo, para que conduzam a uma massa de dados representativa da carga devem considerar estas variações e sazonalidades acima descritas. Assim um conjunto de horários representativos deve ser escolhido e, em cada horário, devem ser realizados os devidos ensaios para a subsequente apuração do modelo vigente naquele momento. Nesta linha de análise observa-se que a carga

média representa o maior período diário e coloca a natural questão da existência de modelos muito diferentes dentro deste grande intervalo. Realmente, como será mostrado a seguir, este fato ocorre obrigando o processo a incluir novos horários típicos dentro do grande período da carga média. Assim, neste trabalho selecionou-se mais de um horário para representar o modelo da carga média: 10h:00m, 12h:30m, 15h:00m e 22h:00m. Para os períodos de carga leve ou pesada selecionou-se apenas um horário representativo: 01h:00m e 18h:15m, respectivamente. Estes procedimentos foram adotados baseados na prática de medições ao longo de anos de muitas experiências de campo e visam a tornar o método preciso e ao mesmo tempo sem excesso de massa de dados.

Os testes utilizados neste trabalho envolvem a aplicação programada de variações de tensão através de comutadores de tensão (OLTC), gerando regiões de estabilização correspondentes de potência ativa e reativa, de tal forma e amplitude que as flutuações naturais de carga e seus conseqüentes impactos negativos nos parâmetros sejam satisfatoriamente mitigados, resultando em modelos mais precisos onde os impactos das variações naturais das cargas são substancialmente reduzidos.

2. Metodologia de Medição Proposta.

Inicialmente cabe considerar as variações naturais da carga e discutir as incertezas impostas por esta condição. A Figura 4 mostra as variações aleatórias de potência ativa, em períodos com tensão aparentemente estável.

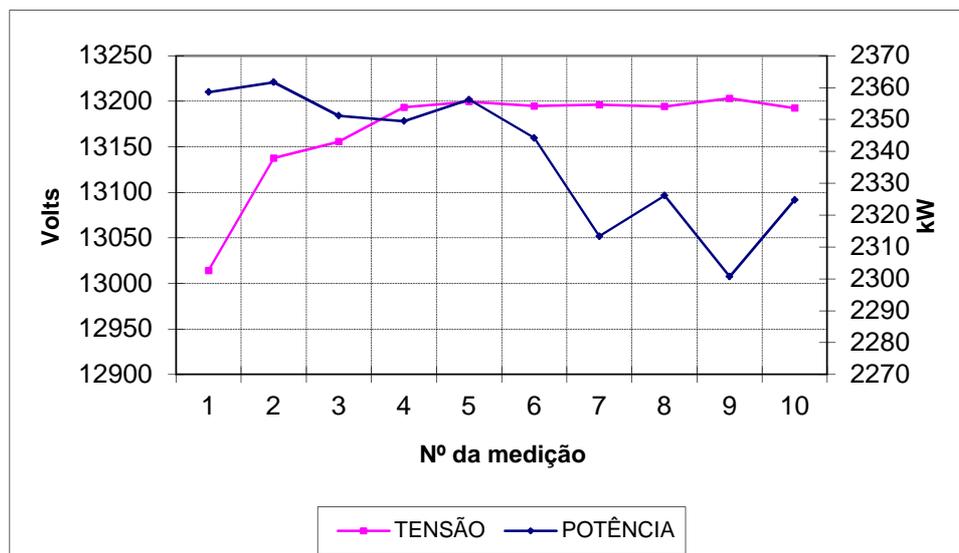


Figura 4 - Variações naturais e aleatórias da carga (4H4-JFAD-13:00).

Mesmo em horários com carga e tensão relativamente estáveis, os pequenos montantes de carga que se agregam e desagregam a cada instante podem atingir percentuais de até 1,5% do valor presente da carga, podendo “mascarar” a obtenção dos parâmetros correspondentes durante um ensaio. As citadas flutuações de carga se estabelecem de forma completamente aleatória tanto em nível quanto em composição e se somam ou se subtraem às parcelas adicionais de carga impostas pelas variações forçadas (e controladas) da tensão durante os procedimentos de teste.

Na Figura 4, as tensões e potências ativas estão registradas de 10 em 10 segundos a partir das 13:00, num circuito tipicamente residencial (Alimentador 4H4 da SE Juiz de Fora 2). A escala horizontal está numerada com os registros seqüenciais ocorridos a cada 10s. A escala vertical da esquerda exibe os valores da tensão e a da direita, mostra os valores de potência ativa. Este registro obviamente não inclui variações forçadas de tensão, mas apenas aquelas de natureza sistêmica. Pode-se observar que mesmo para momentos em que a tensão assume valores praticamente constantes, como por exemplo, entre os registros 6 e 7, os valores de potência variaram em 1,42%.

Claramente observa-se que estas variações naturais são bastante inconvenientes no processo de obtenção dos parâmetros estáticos de sensibilidade de P e Q quando são impostas variações de tensão ao circuito. Basta considerar que, se para uma variação forçada de tensão da ordem de 3%, a potência estiver variando em torno de 4% por exemplo, e neste momento haja uma “contaminação” de até 1,5%, os erros chegariam a 37,5% $((1,5/4) \times 100)$. Tal situação nos conduz a resultados provavelmente enganosos e/ou incertos.

Com o objetivo de minimizar estes erros, propõe-se uma variação de tensão substancialmente maior, da ordem de 6 a 10% em geral. Assim variações naturais de potência de 1,5% conduzem a erros máximos da ordem de 25%, considerando uma resposta de potência de igual magnitude à da tensão. Em geral, como as variações naturais ficam normalmente abaixo de 1% a exatidão do processo se eleva e seguramente pode-se dizer que o erro fica predominantemente abaixo de 15%. A Figura 5 ilustra estas considerações. Observa-se o aparecimento de quatro regiões de estabilização de tensão e potência. O cálculo mais seguro e confiável é feito através das regiões centrais que, neste caso, apresentam uma variação média de 6,5% e 7,7% na tensão e potência respectivamente, resultando num $\alpha_p = 1,17$ para o modelo exponencial.

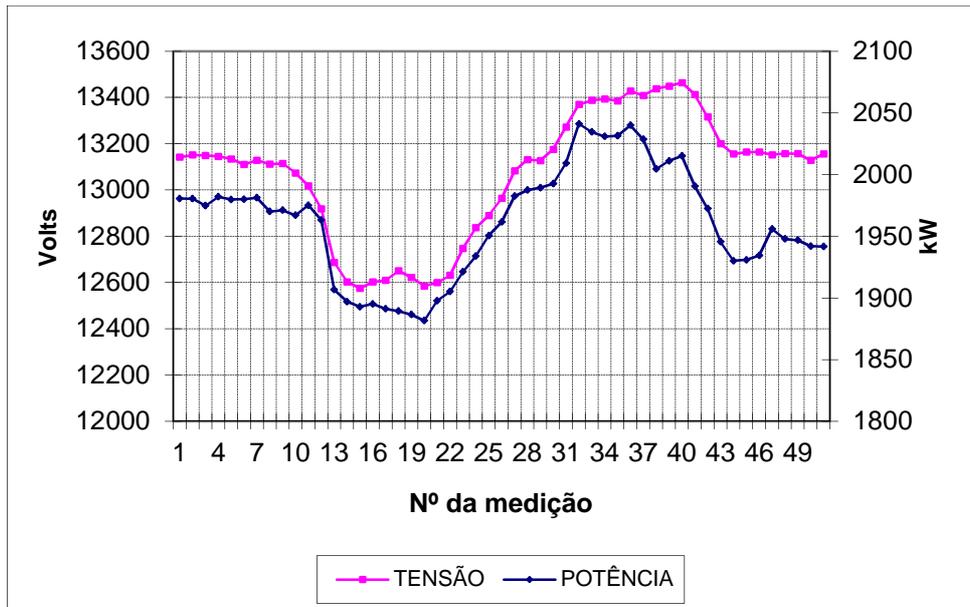


Figura 5 - Variações impostas de tensão e potência ativa (4H4-SE JFAD-01:00).

Em geral, existem duas outras regiões de estabilização menores no início e no final do processo. Neste caso a região de estabilização inicial conduz a um $\alpha_p = 1,15$. A região de estabilização final, que envolve uma variação menor da tensão, resulta num $\alpha_p = 2,22$, quase o dobro, evidenciando a interferência da flutuação natural da carga diante de uma pequena variação forçada de tensão. Da mesma forma ocorre para a potência reativa, Figura 6.

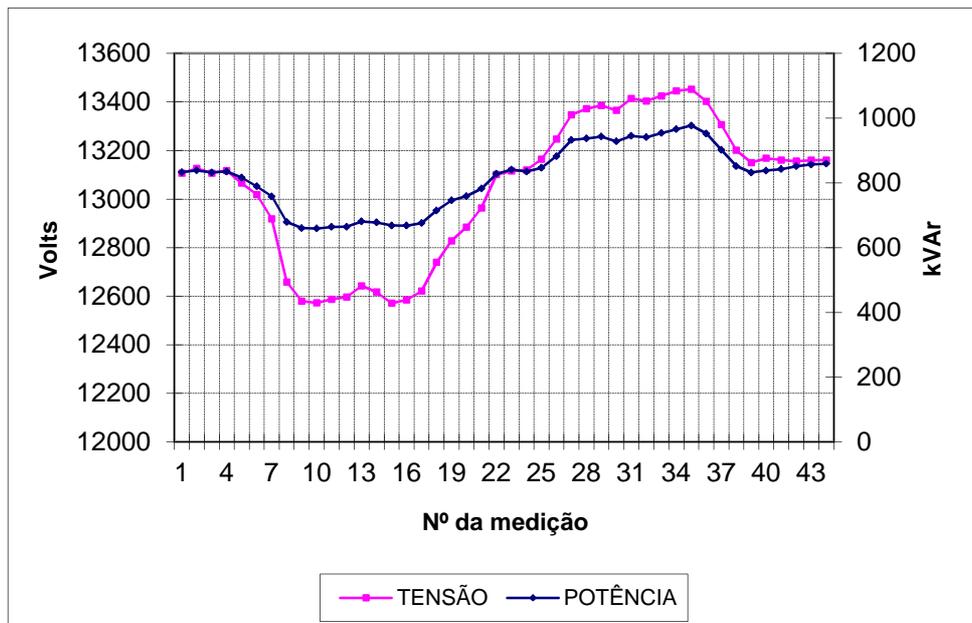


Figura 6 - Variações impostas de tensão e potência reativa (4H4-JFAD-01:00).

Considerando o exposto acima, o algoritmo proposto para obtenção das medições, minimizando-se os impactos das variações naturais de carga, consiste em:

1. *Escolha do ponto de interesse;*
2. *Definição da programação dos testes: Dias e horários;*
3. *Identificação do dispositivo de regulação de tensão à montante mais próximo;*
4. *Instalação do conjunto de medição;*
5. *Execução manual ou automática se possível (agendada via lógica) dos testes conforme:*
 - a. *Realizar 8 comandos para abaixar tensão;*
 - b. *Aguardar de 1 a 2 minutos para estabilização (patamares);*
 - c. *Realizar 15 comandos para elevar tensão;*
 - d. *Aguardar de 1 a 2 minutos;*
 - e. *Realizar 7 comandos para abaixar tensão;*
 - f. *Aguardar de 1 a 2 minutos;*
 - g. *Liberar regulação para operação automática.*

Para cada horário de teste obtém-se dois gráficos semelhantes ao da Figura 5 e da Figura 6, um para potência ativa e outro para a potência reativa respectivamente. A partir dos valores das grandezas obtém-se, mediante técnicas de otimização, os modelos estáticos do tipo exponencial, polinomial e polinomial ampliado, conforme Capítulo 2. Para uma compreensão detalhada dos procedimentos passa-se a discutir os “passo a passo” a seguir.

O ponto de interesse e horários deve ser adequadamente escolhido, conforme definições e caracterizações postas no Capítulo 2. Quanto às questões de sazonalidade sugere-se escolher um dia de semana, sábado e domingo como representativos. Além disso, sugere-se realizar os procedimentos de levantamento de dados para o período do inverno e verão. Caso haja disponibilidade ou determinado projeto requeira maior fidelidade de dados pode-se também incluir levantamentos nas estações climáticas intermediárias.

O sistema de medição compreende transformadores de potencial e corrente (TP e TC) adequadamente selecionados, além de aparelhos digitais de medição capazes de armazenar grandes volumes de dados, que hoje estão amplamente disponíveis no mercado a um custo aceitável. Para referência, são indicados aparelhos de “Power Quality” tais como o RM-950 fornecido pelo fabricante Instrumentos Elétricos LTDA – ENGRO ou mesmo os antigos medidores-registradores

RE-1000 da EMBRASUL. Normalmente esta aparelhagem é a mesma utilizada nos programas obrigatórios de medições periódicas impostos pela ANEEL. Assim, o uso adicional do sistema de medição para modelagem de carga, constitui uma ação de otimização e melhor exploração do ativo existente. Além dessa opção, a medição poderá ser realizada através dos próprios recursos de medição da subestação e do Sistema de Supervisão e Controle (SSC) dos centros de operação. A classe de exatidão do conjunto é normalmente inferior a 1%, não trazendo comprometimento importante ao processo.

Os subitens de “a” até “g” do item 5 do algoritmo, constituem a seqüência de execução dos testes de campo. As comutações para abaixar/elevar tensão podem ser feitas através do sistema supervísório de telecontrole para os casos de levantamentos em barras de subestações e/ou alimentadores que partem desta ou mesmo para pontos específicos da rede sob influência da regulação da subestação que o alimenta. Assim, os transformadores reguladores ou reguladores de tensão são manualmente operados por técnicos de operação do sistema (normalmente despachantes), que assumem seu controle nos horários especificados. Alternativamente, o processo pode ser realizado de forma automática via Plano Operacional (P.O.) que se resume num automatismo implementado junto ao sistema supervísório de telecontrole do Centro de Operação da Distribuição (COD), cujo detalhamento é mostrado ao final deste capítulo.

Excepcionalmente variações diretas em reguladores de tensão (RT's) de rede são requeridas para obtenção de modelos mais precisos, apurados para barras de cargas a partir deste.

Os intervalos de “estabilização” sugeridos são importantes para o aparecimento das citadas “regiões de estabilização” das grandezas, constituindo assim uma amostra mais farta de valores medidos quando a tensão atinge seus limites (mínimos e máximos) de variação. Contudo, neste trabalho, com a utilização dos programas de otimização (“LINGO”) e o uso dos dados capturados nas “rampas” de subida e descida da tensão, já há dados suficientes para o processo de estimação. Sendo assim, os intervalos de estabilização poderão ser reduzidos como uma opção para reduzir tempo total do ensaio caso seja necessário ou desejado. A redução do tempo de ensaio é importante para os momentos em que a carga apresenta forte variação, como no horário (intervalo de 17h às 22h) de ponta, para o qual indicamos a supressão total do intervalo de estabilização.

Como a variação dos tapes em transformadores reguladores normalmente ocorre a cada 6s aproximadamente, a captura e registro de dados a cada 10s mostrou-se suficiente ao processo de modelagem, sendo então recomendado para

padronização. A adoção de intervalos de caputra menores naturalmente trará mais dados, contudo, muitos deles serão redundantes, já que o tape ainda não terá variado no momento da sua captura/registro.

É importante ressaltar que a idéia de variar oito tapes para abaixar tensão é a de criar um afundamento ou razoável subtensão sustentada para posteriormente, ao comutar 15 tapes para elevar, gerar uma variação total expressiva na tensão e garantir que o efeito na variação das potências decorre predominantemente desta grande variação de tensão, mitigando o impacto das flutuações naturais da carga. Cabe ressaltar que este procedimento além de simples e preciso, pode ser realizado de maneira automática. Resumindo a questão, uma amostra farta e qualificada de dados, é essencial para conferir maior robustez estatística ao processo.

A Figura 7 detalha, através de um fluxograma de um Plano Operacional (PO), o processo de medição agendado em sistemas supervisórios de telecontrole.

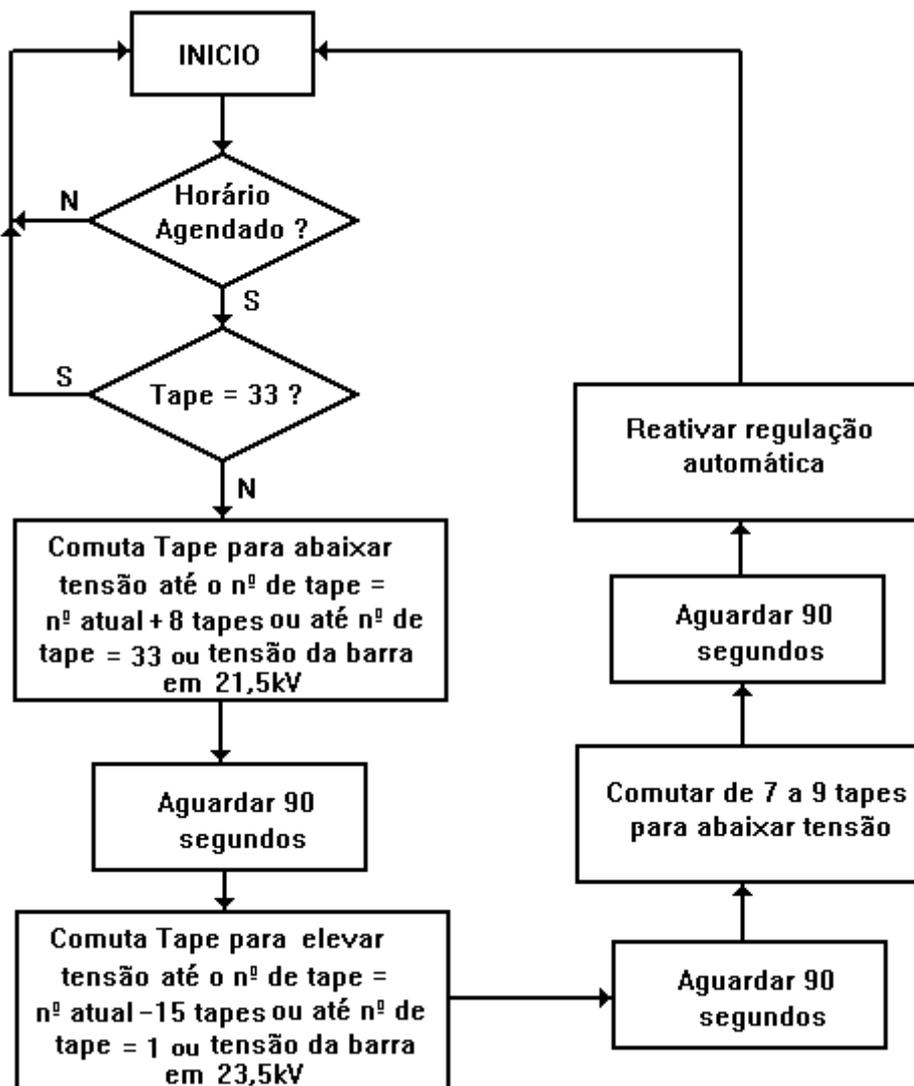


Figura 7 - Fluxograma de um Plano Operacional (P.O.) para modelagem de carga.

3. Sumário do capítulo.

Este capítulo apresenta uma metodologia para medição direta, sistematizada, a ser realizada em pontos estratégicos do sistema de distribuição. Esta metodologia visa a obtenção de dados de tensão, potência ativa e potência reativa de uma forma muito mais adequada para contornar as questões e restrições mais relevantes sobre métodos de medição direta.

O ponto mais crítico é o problema das variações naturais da carga, presente de forma aleatória e incontrolável a todo instante e que, durante a execução dos ensaios, tende a comprometer os resultados almejados.

A metodologia consiste em variações mais intensas de tensão de uma forma sistematizada através de um procedimento seguro para a concessionária e para o consumidor, de simples implementação e inclusive passível de automatização, conforme indicado na Figura 7, e já implementado durante esse trabalho.

Capítulo 4

Aplicações e resultados.

1. Considerações iniciais.

Visando a validação das metodologias propostas para os procedimentos de medição direta e a metodologia de determinação dos parâmetros dos modelos de carga, são apresentados neste capítulo, testes, comparações e resultados utilizando-se sistemas reais.

Inicialmente apresenta-se um estudo de caso, baseado em medições realizadas em instalações da Cemig onde são comparadas e analisadas as curvas estimadas e reais. Nestes testes são analisados os modelos exponencial, ZIP convencional e ZIP ampliado.

Para mostrar a aplicabilidade e importância da modelagem de carga são obtidos também outros resultados de medição, onde tabelas de parâmetros de carga relacionadas às diferentes classes de consumidores são apresentadas.

Ao final do capítulo é feita uma análise detalhada dos procedimentos e resultados, verificando sua conformidade, coerência e possíveis impactos quantitativos e qualitativos sobre estudos relacionados aos SEP. Faz-se também uma discussão envolvendo as referências [52] e [53], ressaltando a necessidade da imposição de variações de tensão mais intensas e consistentes para a extração dos modelos de carga de forma mais segura e confiável. Apresenta-se também um caso prático da Cia Energética de Minas Gerais-CEMIG, abordando um estudo de planejamento de expansão (aumento de demanda), a partir da subestação de Barroso 3, visando melhor ilustrar os impactos técnicos e econômicos da modelagem de carga.

2. Validação da metodologia de modelagem de carga.

Para a validação da metodologia proposta foram realizados ensaios em uma barra da subestação de distribuição Juiz de Fora 2 (pertencente à Cia Energética de Minas Gerais, CEMIG) que atende a região central da cidade de Juiz de Fora – MG. A barra estudada foi a do secundário do transformador T2 (23,1 kV). As medições foram realizadas num sábado, das 14h:55m às 15h:15m, faixa normalmente usada para obtenção dos modelos de carga típicos das 15h, modelo da tarde. Neste caso, para efeito ilustrativo foi realizado um ensaio de modelagem diferenciado, onde foram gerados mais pontos referenciais (valores forçados de tensão) e portanto mais regiões de estabilização (intervalo de dados entre os pontos referenciais) do que o usual.

As Figuras 8 e 9 mostram as medições realizadas na Barra 2 para a potência ativa e reativa, respectivamente. Neste período de medição, a tensão foi forçada a variar de 22,0 kV a 24,2kV. Pode-se identificar seis regiões (entre os pontos referenciais) em que a tensão se estabiliza entre os valores limite de 22,0kV e 24,2kV. A primeira região ou intervalo de dados, é o de “entrada”, onde a tensão e potências estão normais, ainda isentas das variações impostas à tensão, mas variando aleatoriamente. Nesta região as tensões variam por imposição do sistema e as potências pela agregação e desagregação de elementos de carga a todo instante. No caso as tensões mantiveram-se mais confinadas e variaram até 1,6% neste intervalo de observação de 240s. Já as potências oscilaram mais neste mesmo intervalo, atingindo paratames de até 5% (potência ativa) e 10% (potência reativa). Os pontos referenciais 3 e 4 são os principais pois, entre eles observa-se uma variação forçada de tensão mais abrupta (10%), visando mitigar a contaminação dos resultados devido às citadas flutuações naturais da carga. Portanto, a partir desta região (intervalo) principal é que serão obtidos os modelos de carga correspondentes. Os pontos referenciais 2 e 5 são extras e foram gerados para permitir análises comparativas e validação dos resultados e procedimentos. A sexta e última região é a de “saída” ou de retorno às condições normais do sistema.

Com o objetivo de testar a aderência e eficácia da metodologia proposta a partir dos pontos referenciais e regiões destacadas, realizou-se três processos de estimação dos parâmetros dos modelos da carga. Para tanto, as regiões adjacentes utilizadas foram: 2-3, 3-4, 4-5. A região 2-3 apresenta uma variação forçada de tensão de 6,5% e apresentou resultados próximos dos obtidos da principal (3-4), mostrando-se também aceitável para esta estimação. Já a região 4-5 apresenta uma variação de tensão de apenas 2,8%, gerando resultados relativamente distantes e portanto descartáveis para estimação. A intenção de estimar também através da região 4-5 foi exatamente a de demonstrar a necessidade de impor variações de tensão mais intensas (preferencialmente acima de 5%) para que se possa efetivamente modelar cargas por esta metodologia de medição direta (medição em campo). Por fim, foram avaliados os desvios relativos entre as medidas estimadas e reais, como método de aferição de todo este processo de modelagem. Nesta ação de aferição, as medidas foram calculadas (estimadas) a partir do modelo derivado da região principal, que é o probabilisticamente mais correto, pois envolve menor erro devido à variação mais intensa da tensão e conseqüente maior mitigação das variações naturais da carga. Sendo assim, o resultado obtido através da região central é o indicado para utilização.

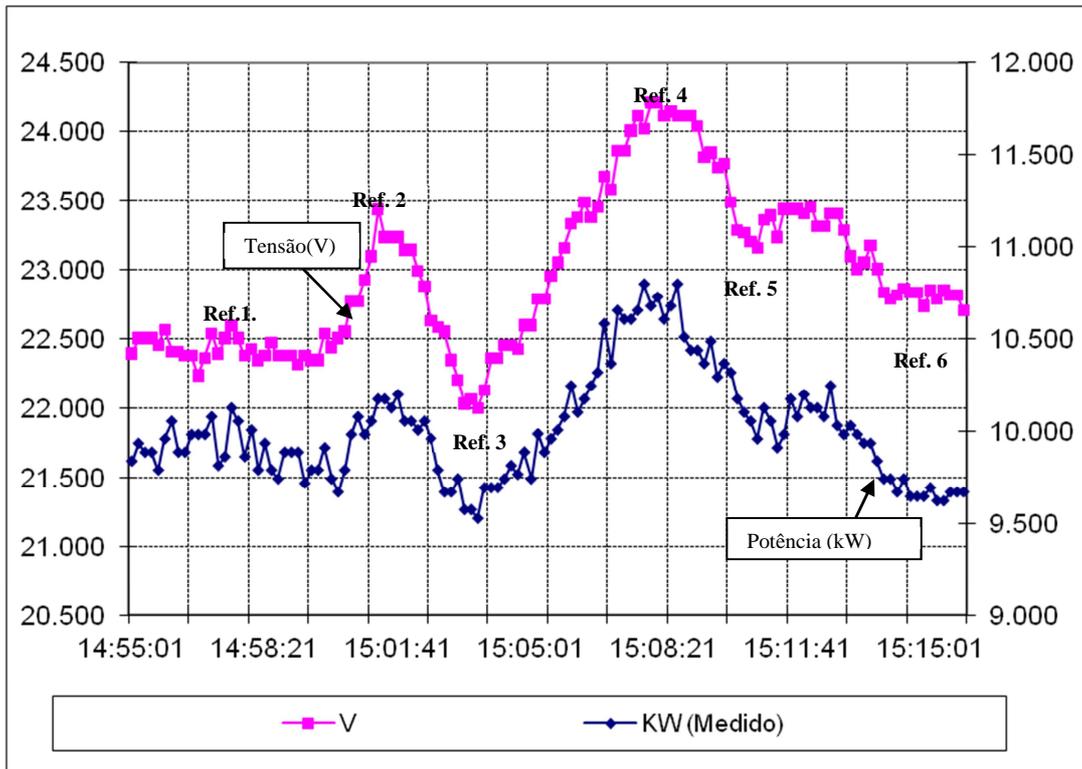


Figura 8 – Variações de tensão e potência ativa.

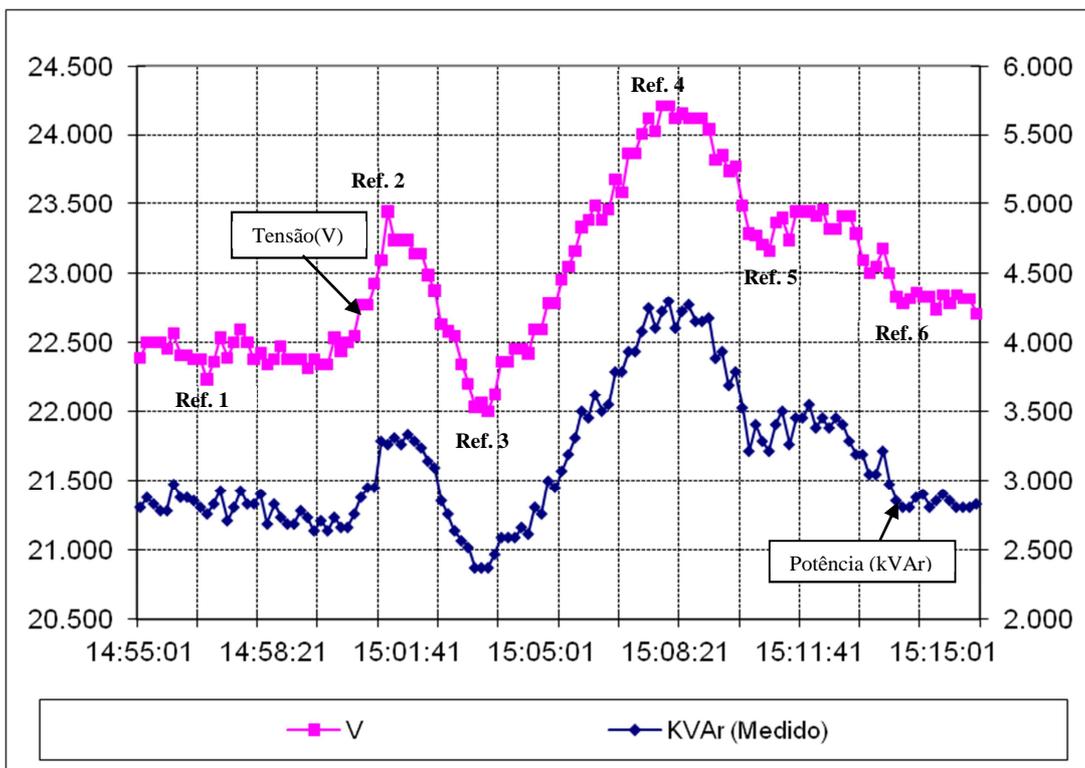


Figura 9 - Variações de tensão e potência reativa.

A Tabela 2 mostra os parâmetros calculados para o modelo ZIP de potência ativa, considerando cada região selecionada da Figura 8. Pode-se observar que a variação dos parâmetros para os modelos obtidos entre as regiões 3-4(principal) e a 2-3(secundária) é pequena, mostrando que a alteração da carga forçada pela tensão foi suficiente para suplantar a flutuação natural da carga, conduzindo a modelos bastantes semelhantes, derivados dessas regiões. Por outro lado, a região 4-5 apresentou resultados diferentes e distantes das outras duas, devido à questão da variação de tensão insuficiente, demonstrando aderência do modelo proposto.

Tabela 2 – Modelo ZIP - Potência Ativa

Regiões Utilizadas		Parâmetros da Carga Ativa		
		a_p (%)	b_p (%)	c_p (%)
2	3	42	0	58
3	4	40	0	60
4	5	20	0	80

De forma similar, a Tabela 3 mostra os parâmetros calculados para o modelo Exponencial de potência ativa, considerando cada região apresentada na Figura 8. Os resultados obtidos também mostram uma aderência do modelo proposto durante o período de ensaio, pelas mesmas razões evocadas.

Tabela 3 – Modelo Exponencial de potência ativa

Regiões Utilizadas		Parâmetros da Carga Ativa
		α_p
2	3	1,19
3	4	1,28
4	5	1,77

Os mesmos procedimentos da modelagem da potência ativa foram realizados para a obtenção dos parâmetros dos modelos da potência reativa. As Tabelas 4 e 5 mostram, respectivamente, os resultados para os modelos ZIP convencional e ampliado. Tal como ocorreu com a potência ativa, os modelos mantiveram a aderência quanto à variação da carga com a tensão. No entanto, na tabela 4 observa-se que os

parâmetros do modelo ZIP convencional concentraram a carga completamente como impedância constante (100%). Este aspecto será analisado mais adiante.

A tabela 5 mostra os resultados apurados para o modelo intitulado ZIP ampliado, ou simplesmente polinomial completo. Os resultados para as regiões 2-3 e 3-4, são próximos, como esperado, mas o resultado da região 4-5 diverge e não deve ser considerado ou utilizado para efeito desta modelagem. Observa-se valores de parcela de carga associados aos expoentes 2 e 20 para esta região “inválida” 4-5, e parcelas de expoente 6 e 7 para ambas as regiões “válidas”, 2-3 e 3-4.

Tabela 4 - Modelo ZIP CONVENCIONAL – Pot. Reativa

Regiões Utilizadas		Parâmetros da Carga Reativa		
		a_Q (%)	b_Q (%)	c_Q (%)
2	3	0	0	100
3	4	0	0	100
4	5	0	0	100

Tabela 5 – Modelo ZIP AMPLIADO - Potência Reativa

Regiões Utilizadas		Parâmetros da Carga Reativa(%)	
		2	3
3	4	$a_6=84$	$a_7=16$
4	5	$a_2=92$	$a_{20}=8$

A tabela 6 exibe os resultados dos parâmetros exponencias para a potência reativa com valores mais aproximados entre as regiões 2-3 e 3-4. O resultado para a região apresentou valor mais distante e também deve ser desconsiderado para uso.

Tabela 6 – Modelo Exponencial de potência reativa

Regiões Utilizadas		Parâmetros da Carga Reativa
2	3	6,22
3	4	6,41
4	5	6,79

As Figuras 10, 11, 12 e 13 mostram as curvas de carga ativa e reativa medidas e estimadas utilizando-se os modelos ZIP ampliado e Exponencial. A curva estimada é construída plotando-se os valores de potência estimados pelos programas de otimização desenvolvidos na plataforma “LINGO”, referentes a cada valor de tensão medida. Para a potência ativa, Figuras 10 e 11, verifica-se que ambos os modelos apresentam resultados satisfatórios, sendo que a estimação polinomial apresentou melhor ajuste neste exemplo, onde os modelos ZIP e ampliado geram os mesmos valores.

De forma similar para potência reativa, Figuras 12 e 13, o ajustamento da curva de estimação polinomial ampliada (polinômio de ordem 7) ficou também mais adequada, ligeiramente melhor em relação ao ajustamento exponencial. Este fato é curioso e interessante, pois demonstra a força de representação deste novo modelo ZIP ampliado, já que até então a representação aceitável para a potência reativa era unicamente obtida através do modelo exponencial. No geral todas as curvas de estimação plotadas apresentam-se adequadas e plenamente aceitáveis para representação da carga em estudo.

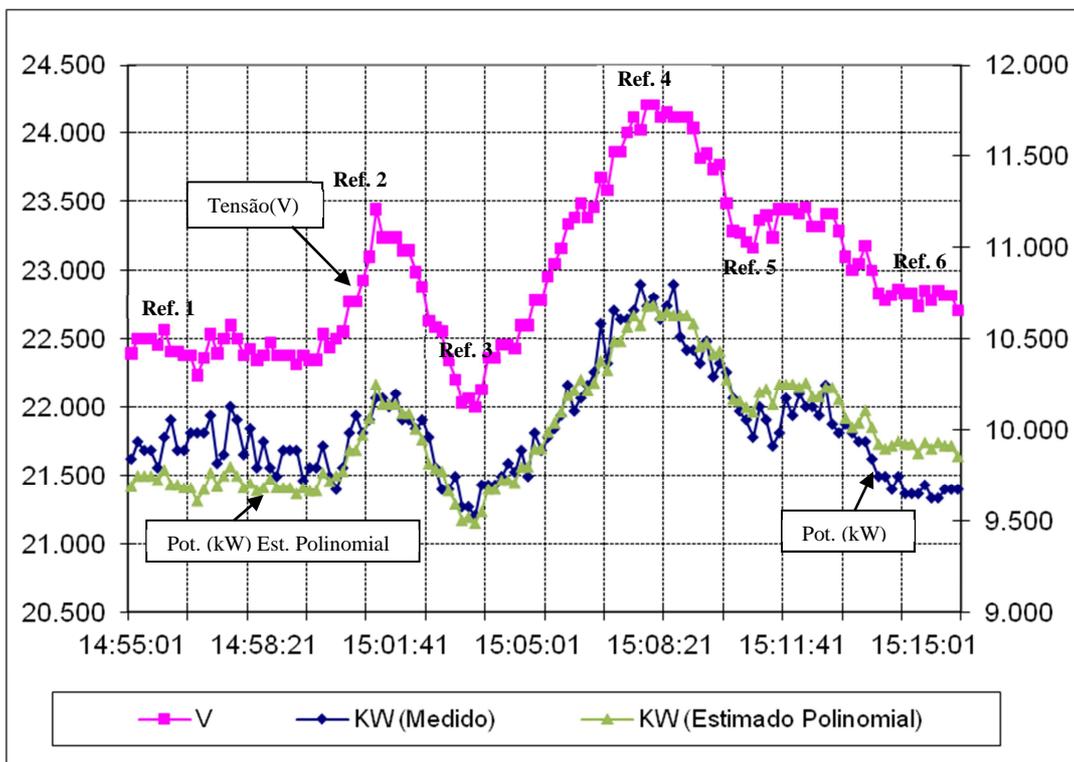


Figura 10 – Potência ativa – Estimação polinomial.

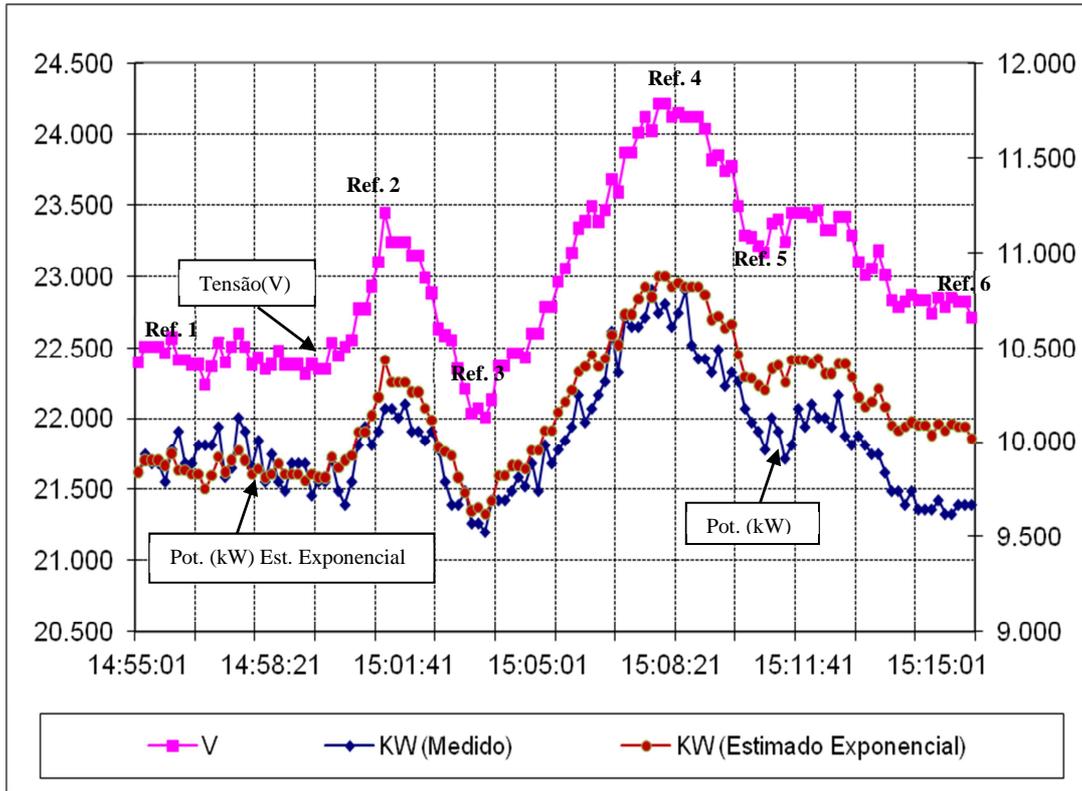


Figura 11 – Potência ativa – Estimação exponencial

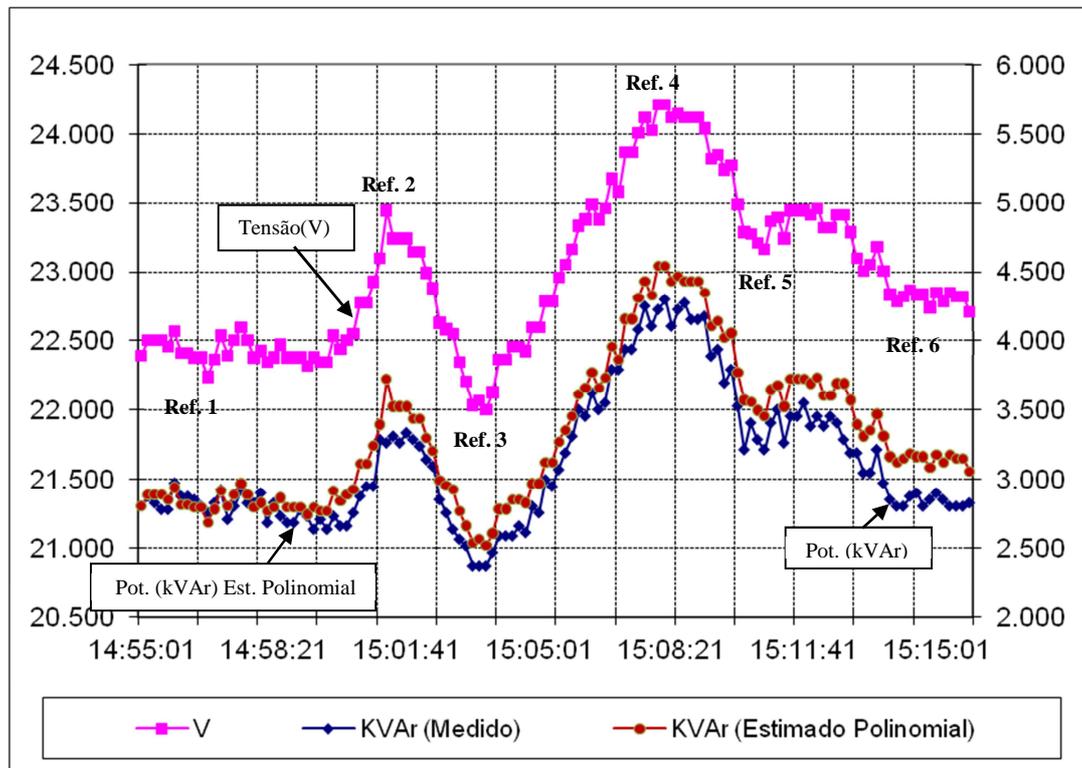


Figura 12– Potência reativa – Estimação polinomial.

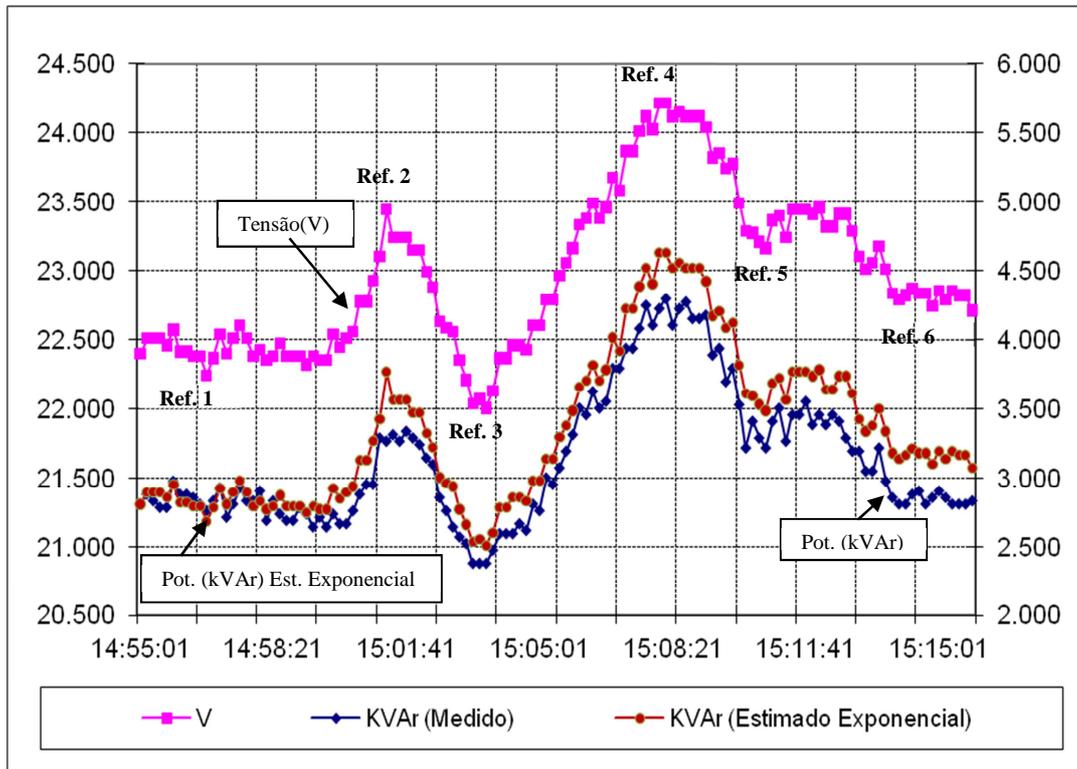


Figura 13 – Potência reativa – Estimação exponencial.

Os desvios médios relativos entre os valores estimados e medidos ficaram na faixa de 0 a 8,14% ao longo de todo conjunto de medições, exceto para a potência reativa estimada pelo modelo ZIP convencional, que apresentou valores mais elevados e comprometedores do processo de estimação. As tabelas 7, 8 e 9 mostram os resultados desses desvios médios por região. A região 1-6 abrange todo o conjunto de medição. As regiões 1-2 e 5-6 apresentam variações muito reduzidas da tensão e naturalmente não são indicadas ao processo. Sendo assim, elas não foram utilizadas para apuração dos modelos e não aparecem nas tabelas de desvios.

A tabela 7 apresenta os desvios médios para a estimação através do modelo ZIP convencional. Nela observamos desvio médio de até 17,13%, confirmando a dificuldade de estimação da potência reativa por este modelo.

A tabela 8 mostra os excelentes resultados obtidos pela nova estimação polinomial ampliada, sanando a dificuldade de representação da carga reativa através de polinômios. O destaque na tabela 8 fica para a região 2-3, na representação da potência ativa estimada pelo modelo polinomial que exibiu a surpreendente marca de 0,60% de desvio médio relativo, considerando todas as medidas da região (15 medidas reais). De uma maneira geral, a estimação polinomial da potência ativa, seja convencional ou ampliada apresentou valores muito baixos, retratando a elevada qualidade deste processo de estimação.

A tabela 9 apresenta os desvios obtidos com a representação exponencial, que, para este estudo de caso, mostraram-se piores que a estimação polinomial, mas são também indicados para utilização nos estudos envolvendo os SEP. Os impactos decorrentes desses erros para as diversas aplicações, naturalmente dependerão de cada situação específica e, somente serão devidamente conhecidos e dimensionados, após a plena utilização dos modelos na prática, sejam pelas concessionárias ou organismos de planejamento e controle operativo dos SEP.

Tabela 7 – Desvio médio - Modelo ZIP Convencional

Regiões Utilizadas		Desvio da Potência ativa (%)	Desvio da Potência reativa (%)
2	3	0,60	8,34
3	4	0,71	14,04
4	5	0,72	17,13
1	6	1,25	7,81

Tabela 8 – Desvio médio - Modelo Polinomial ampliado

Regiões Utilizadas		Desvio da Potência ativa (%)	Desvio da Potência reativa (%)
2	3	0,60	7,02
3	4	0,71	5,66
4	5	0,72	6,49
1	6	1,25	6,11

Tabela 9 – Desvio médio - Modelo Exponencial

Regiões Utilizadas		Desvio da Potência ativa (%)	Desvio da Potência reativa (%)
2	3	1,38	7,48
3	4	1,27	6,45
4	5	2,13	8,14
1	6	1,84	6,78

3. Resultados de medições - Tabelas de Parâmetros.

Para uma melhor avaliação da metodologia e verificação de sua eficácia, foram conduzidos diversos testes envolvendo algumas redes e barras do sistema elétrico de subtransmissão e distribuição que atendem a região da cidade de Juiz de Fora - MG. As barras escolhidas foram as de 23kV instaladas na *subestação de Juiz de Fora 2* e que atendem a região central da cidade. Dessas barras partem alimentadores tipicamente residenciais, comerciais e mistos (envolvendo também pequenas cargas industriais). No geral as barras contêm cargas mistas, algumas com certa predominância de classe. As barras, que serão denominadas *barras 2, 3 e 4* são atendidas pelos transformadores *T2* (138kV+/-2x2,5 % - 23kV+/-10%, 30MVA-ONAF2), *T3* (138kV+/-2x2,5 % - 23kV+/-10%, 30MVA-ONAF2) e *T4* (138kV+/-2x2,5 % - 23kV+/-10%, 33,2MVA-ONAF2), respectivamente. As barras 2 e 3 são mistas com predominância residencial e a barra 4 tem predominância comercial.

Para as medições das cargas típicas, selecionou-se circuitos com forte predominância de determinada classe de carga que partem das *barras 2 e 3*, como os alimentadores *04H4* e *11H4*, que têm cargas predominantemente residenciais e comerciais respectivamente. Além desses, foi selecionado um circuito tipicamente industrial a partir da chave *22154* da rede do alimentador *109H4*, da *subestação Juiz de Fora 1*. A Figura 14 mostra o diagrama simplificado do sistema estudado, destacando-se na subestação Juiz de Fora 2 os alimentadores *4H4* (residencial) e *11H4* (comercial). A carga industrial é mostrada na Figura 15, a partir da chave *22154*, inserida no distrito industrial I de Juiz de Fora.

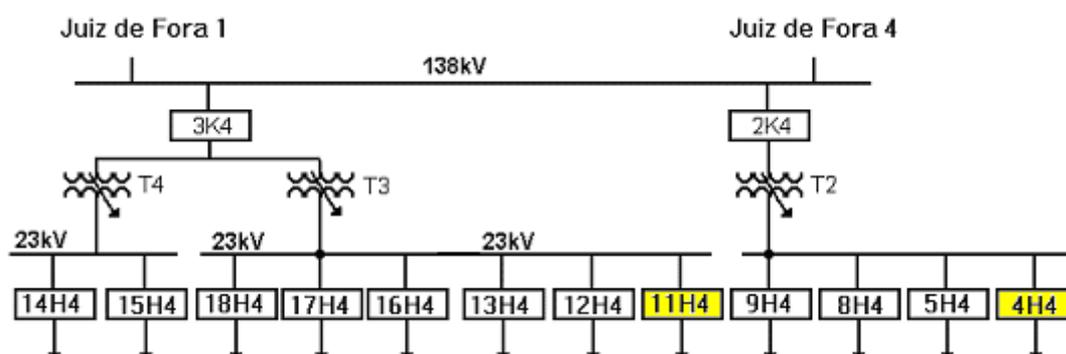


Figura 14- Diagrama simplificado da subestação Juiz de Fora 2.

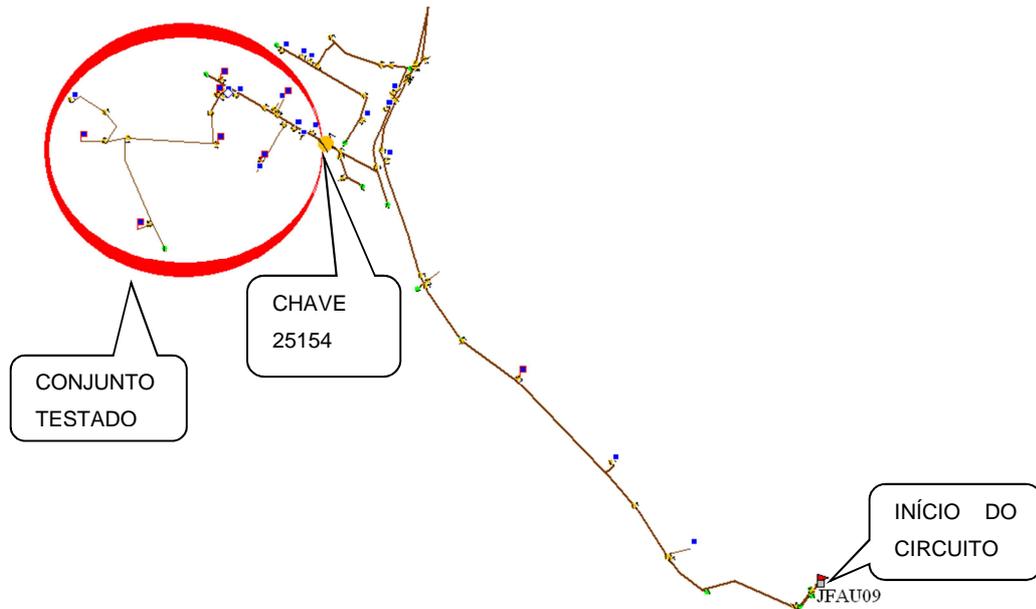


Figura 15 - Diagrama simplificado do ponto de rede-chave 22154.

Foram conduzidos, nestes locais escolhidos, alguns testes e medições na tentativa de obtenção de modelos dessas cargas adotando-se um procedimento em que a variação de tensão era de até 3%. Esta pequena variação conduziu a incertezas visto que as variações naturais da carga eram da mesma ordem que as variações de tensão provocadas. Assim, constatou-se que os resultados poderiam estar *mascarados* por flutuações totalmente aleatórias e conseqüentemente de difícil filtragem. A figura 16 ilustra bem esta situação.

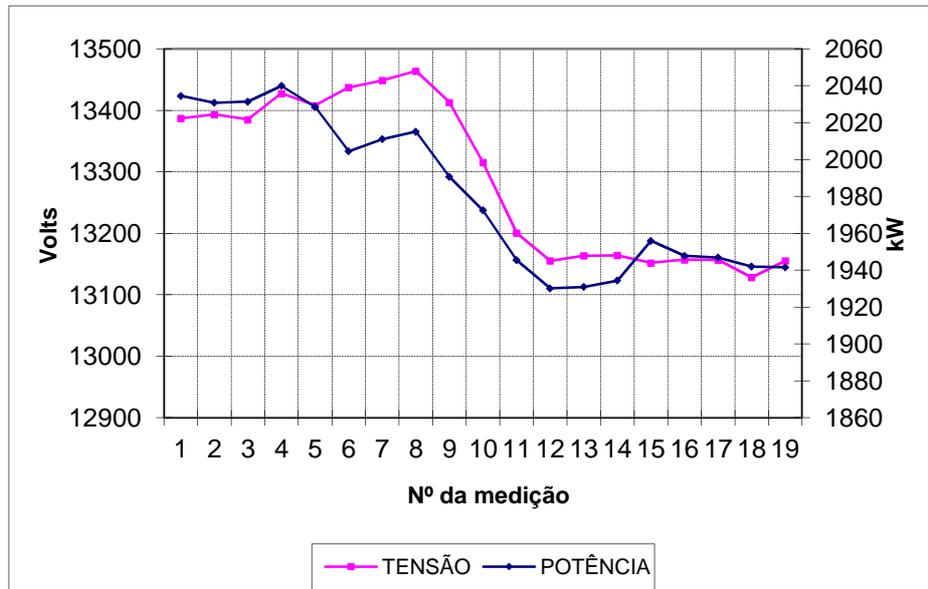


Figura 16 - Medição comprometida pelas flutuações naturais de carga.

Como pode ser observado, a tensão e potência variaram aproximadamente 1,5% e 3% apenas, considerando o patamar inicial. Como foi observada a possibilidade da potência em condições normais variar aleatoriamente até 1,5%, o nível de incerteza, neste caso remonta valores da ordem de 50%, ou seja, o sistema estabelecido torna-se pouco confiável, contra-indicando sua utilização.

Foram conduzidos novos ensaios adotando-se a nova metodologia exposta no Capítulo 3, com resultados mais confiáveis e aceitáveis. As Tabelas 10, 11 e 12 mostram os valores médios obtidos considerando a adoção do modelo ZIP convencional. Para calcular/estimar os valores das tabelas foi utilizada a plataforma “LINGO”, que mostrou-se eficiente ao processo de estimação por meio de programas de otimização para cada um desses casos.

Especificamente para obtenção dos parâmetros polinomiais parte-se dos resultados individuais de cada parâmetro exponencial e, através de um programa conversor também elaborado na plataforma “LINGO”, obtem-se os valores polinomiais correspondentes. Observa-se que para o modelo ZIP convencional, os valores polinomiais dos modelos de carga cujos valores exponenciais são superiores a 2, concentram toda a carga na parcela tipo Z constante, levando esta representação a erros inaceitáveis, demonstrando a limitação do modelo ZIP conhecido (convencional) para representar tais cargas.

Para trabalhar e contornar esta situação prospectou-se a adoção de um modelo ZIP ampliado que é basicamente um polinômio de grau n , qualquer. As tabelas 13, 14 e 15 apresentam os resultados para a parcela reativa da carga usando-se o modelo polinomial expandido (polinômio de grau n , qualquer), onde praticamente os parâmetros exponenciais são todos superiores a 2. É interessante observar que o otimizador do “LINGO” produziu modelos com a carga reativa distribuída em duas parcelas com ordem variadas, contudo próximas à ordem do resultado do modelo exponencial, perfeitamente dentro do esperado. Obviamente a situação limite é o caso de um modelo exponencial de parâmetro inteiro, quando os modelos se igualam (mesmos parâmetros).

Com relação aos dados de modelagem para horários intermediários, na impossibilidade de realização do ensaio e medição, sugere-se adotar como valor aproximado, a média ponderada entre os valores medidos imediatamente antes e depois, considerando como elemento de ponderação, os intervalos de tempo entre o horário da medição desejada e os horários de medição conhecida, adjacentes.

Tabela 10 - Parâmetros médios obtidos através do levantamento de campo (sexta-feira).

Horário	01:00h		10:00h		12:30h		15:00h		18:15h		22:00h		
Carga	Modelo Exponencial												
	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	
404H4 (Res.)	Mod. ZIP	1,283	6,755	1,765	4,9846	1,16	5,205	1,126	5,083	1,672	4,5463	1,243	5,713
	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B	0,714	0	0,233	0	0,838	0	0,873	0	0,325	0	0,755	0
	C	0,286	1	0,767	1	0,162	1	0,127	1	0,675	1	0,245	1
411H4 (Com.)	Modelo Exponencial												
	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	
	Mod. ZIP	1,313	9,801	1,22	7,0143	1,093	6,3	1,068	6,116	1,283	6,1653	1,481	16,42
	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B	0,684	0	0,778	0	0,908	0	0,931	0	0,714	0	0,516	0
C	0,316	1	0,222	1	0,092	1	0,069	1	0,286	1	0,484	1	
22154 (Ind.)	Modelo Exponencial												
	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	
	Mod. ZIP	0,279	3,572	1,653	3,2851	0,846	3,557	0,898	3,135	0,599	3,6865	0,348	4,353
	A	0,718	0	0	0	0,152	0	0,100	0	0,347	0	0,648	0
	B	0,282	0	0,344	0	0,848	0	0,900	0	0,603	0	0,352	0
C	0	1	0,656	1	0	1	0	1	0	1	0	1	

Tabela 11 - Parâmetros médios obtidos através do levantamento de campo (sábado).

Horário	01:00h		10:00h		12:30h		15:00h		18:15h		22:00h		
Carga	Modelo Exponencial												
	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	
404H4 (Res.)	Mod. ZIP	1,133	6,565	1,285	5,892	1,174	5,092	1,132	5,339	1,573	3,939	1,396	5,119
	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B	0,866	0	0,712	0	0,827	0	0,867	0	0,424	0	0,601	0
	C	0,134	1	0,288	1	0,173	1	0,133	1	0,576	1	0,399	1
411H4 (Com.)	Modelo Exponencial												
	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	
	Mod. ZIP	1,467	8,936	1,347	6,955	1,349	7,128	1,099	12,228	1,163	17,045	1,376	12,9
	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B	0,530	0	0,650	0	0,648	0	0,902	0	0,838	0	0,621	0
C	0,470	1	0,350	1	0,352	1	0,098	1	0,162	1	0,379	1	
22154 (Ind.)	Modelo Exponencial												
	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	
	Mod. ZIP	0,855	3,857	0,663	2,179	0,704	2,545	0,653	2,613	0,122	2,819	0,201	3,566
	A	0,143	0	0,333	0	0,293	0	0,343	0	0,876	0	0,796	0
	B	0,857	0	0,667	0	0,707	0	0,657	0	0,124	0	0,204	0
C	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	

Tabela 12 - Parâmetros médios obtidos através do levantamento de campo (domingo).

Horário	01:00h		10:00h		12:30h		15:00h		18:15h		22:00h		
Carga	Modelo Exponencial												
	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	
404H4 (Res.)	Mod. ZIP	0,926	6,374	1,217	5,322	1,438	5,728	1,147	5,115	1,201	4,169	1,039	5,926
	A	0,093	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B	0,827	0	0,710	0	0,559	0	0,854	0	0,799	0	0,961	0
	C	0	1	0,220	1	0,441	1	0,146	1	0,203	1	0,039	1
Carga	Modelo Exponencial												
	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	
411H4 (Com.)	Mod. ZIP	1,468	8,354	1,488	10,439	1,167	9,835	1,063	15,11	1,802	12,753	1,253	7,062
	A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B	0,529	0	0,509	0	0,831	0	0,936	0	0,196	0	0,745	0
	C	0,471	1	0,491	1	0,169	1	0,024	1	0,804	1	0,255	1
Carga	Modelo Exponencial												
	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	α_p	α_q	
22154 (Ind.)	Mod. ZIP	0,482	6,493	0,972	3,749	0,949	4,40	1,045	4,021	1,203	4,274	0,7	2,509
	A	0,514	0	0,028	0	0,050	0	0	0	0	0	0,297	0
	B	0,486	0	0,972	0	0,950	0	0,954	0	0,795	0	0,703	0
	C	0	1	0	1	0	1	0,046	1	0,205	1	0	1

Tabela 13 - Parâmetros médios para a carga reativa obtidos através do levantamento de campo, usando modelo polinomial ampliado (Sexta).

Horário	01:00h		10:00h		12:30h		15:00h		18:15h		22:00h	
Carga	Modelo Exponencial											
	$\alpha_q = 6,755$		$\alpha_q = 4,985$		$\alpha_q = 5,205$		$\alpha_q = 5,083$		$\alpha_q = 4,546$		$\alpha_q = 5,713$	
404H4 (Res.)	Modelo Polinomial											
	a_6	0,25	a_4	0,02	a_5	0,80	a_5	0,92	a_4	0,45	a_5	0,29
	a_7	0,75	a_5	0,98	a_6	0,20	a_6	0,08	a_5	0,55	a_6	0,71
411H4 (Com.)	Modelo Exponencial											
	$\alpha_q = 9,801$		$\alpha_q = 7,014$		$\alpha_q = 6,300$		$\alpha_q = 6,116$		$\alpha_q = 16,42$		$\alpha_q = 6,165$	
	Modelo Polinomial											
a_9	0,20	a_7	0,99	a_6	0,70	a_6	0,88	a_{16}	0,58	a_6	0,84	
a_{10}	0,80	a_8	0,01	a_7	0,30	a_7	0,12	a_{17}	0,42	a_7	0,16	
22154 (Ind.)	Modelo Exponencial											
	$\alpha_q = 3,572$		$\alpha_q = 3,285$		$\alpha_q = 3,557$		$\alpha_q = 3,135$		$\alpha_q = 3,686$		$\alpha_q = 4,356$	
	Modelo Polinomial											
a_3	0,43	a_3	0,71	a_3	0,44	a_3	0,86	a_3	0,31	a_4	0,64	
a_4	0,57	a_4	0,29	a_4	0,56	a_4	0,14	a_4	0,69	a_5	0,36	

Tabela 14 - Parâmetros médios para a carga reativa obtidos através do levantamento de campo, usando modelo polinomial ampliado (Sábado).

Horário	01:00h	10:00h	12:30h	15:00h	18:15h	22:00h						
Carga	Modelo Exponencial											
	$\alpha_q = 6,565$	$\alpha_q = 5,892$	$\alpha_q = 5,092$	$\alpha_q = 5,339$	$\alpha_q = 3,939$	$\alpha_q = 5,119$						
404H4 (Res.)	Modelo Polinomial											
	a_6	0,43	a_5	0,11	a_5	0,91	a_5	0,66	a_3	0,06	a_5	0,88
	a_7	0,57	a_6	0,89	a_6	0,09	a_6	0,34	a_4	0,94	a_6	0,12
411H4 (Com.)	Modelo Exponencial											
	$\alpha_q = 8,936$	$\alpha_q = 6,955$	$\alpha_q = 7,128$	$\alpha_q = 12,228$	$\alpha_q = 17,045$	$\alpha_q = 12,90$						
	Modelo Polinomial											
	a_8	0,06	a_6	0,05	a_7	0,87	a_{12}	0,77	a_{17}	0,96	a_{12}	0,10
	a_9	0,94	a_7	0,95	a_8	0,13	a_{13}	0,23	a_{18}	0,04	a_{13}	0,90
22154 (Ind.)	Modelo Exponencial											
	$\alpha_q = 3,857$	$\alpha_q = 2,179$	$\alpha_q = 2,545$	$\alpha_q = 2,613$	$\alpha_q = 2,819$	$\alpha_q = 3,566$						
	Modelo Polinomial											
	a_3	0,14	a_2	0,82	a_2	0,45	a_2	0,38	a_2	0,18	a_3	0,43
	a_4	0,86	a_3	0,18	a_3	0,55	a_3	0,62	a_3	0,82	a_4	0,57

Tabela 15 - Parâmetros médios para a carga reativa obtidos através do levantamento de campo, usando modelo polinomial ampliado (Domingo).

Horário	01:00h	10:00h	12:30h	15:00h	18:15h	22:00h						
Carga	Modelo Exponencial											
	$\alpha_q = 6,374$	$\alpha_q = 5,322$	$\alpha_q = 5,728$	$\alpha_q = 5,115$	$\alpha_q = 4,169$	$\alpha_q = 5,926$						
404H4 (Res.)	Modelo Polinomial											
	a_6	0,63	a_5	0,68	a_5	0,27	a_5	0,88	a_4	0,83	a_5	0,07
	a_7	0,37	a_6	0,32	a_6	0,73	a_6	0,12	a_5	0,17	a_6	0,93
411H4 (Com.)	Modelo Exponencial											
	$\alpha_q = 8,354$	$\alpha_q = 10,439$	$\alpha_q = 9,835$	$\alpha_q = 15,11$	$\alpha_q = 12,753$	$\alpha_q = 7,062$						
	Modelo Polinomial											
	a_8	0,65	a_{10}	0,56	a_9	0,17	a_{15}	0,89	a_{12}	0,25	a_7	0,98
	a_9	0,35	a_{11}	0,44	a_{10}	0,83	a_{16}	0,11	a_{13}	0,75	a_{10}	0,02
22154 (Ind.)	Modelo Exponencial											
	$\alpha_q = 6,493$	$\alpha_q = 3,749$	$\alpha_q = 4,40$	$\alpha_q = 4,021$	$\alpha_q = 4,274$	$\alpha_q = 2,509$						
	Modelo Polinomial											
	a_6	0,51	a_3	0,25	a_4	0,60	a_4	0,98	a_4	0,73	a_2	0,49
	a_7	0,49	a_4	0,75	a_5	0,40	a_5	0,02	a_5	0,27	a_3	0,51

4. Análises dos resultados.

Especificamente sobre os dados médios dos parâmetros α_p obtidos nos ensaios observa-se que estes são valores típicos para a classe residencial, comercial e industrial.

Para a classe residencial, o comportamento foi o esperado para sexta-feira e sábado, com valores na ponta de carga (18h:15m) tendendo ao comportamento do tipo impedância constante. No domingo, a carga residencial apresentou um comportamento mais aproximado do tipo corrente constante ao longo de todo o dia.

Para a classe comercial, o comportamento também foi o esperado exibindo tendência do tipo corrente constante na maioria dos horários, exceto no domingo quando apresentou valor médio próximo a 2 (impedância constante).

A carga industrial de média tensão também apresentou comportamento esperado, com tendência do tipo potência constante, exceto quando ocorreram desligamentos programados do maior cliente envolvido (fabricante de polpa de papel e embalagens), quando a tendência mudava de potência constante para impedância constante, já que o consumidor predominante passava a ser um fabricante de pão de larga escala, com grandes cargas de aquecimento (grandes fornos). Observa-se uma grande dispersão dos valores para a carga industrial, correspondente às variações de composição da carga decorrentes da presença ou não do maior cliente envolvido. Neste aspecto sugere-se que a medição da classe industrial seja repetida em mais distritos industriais e dentro do possível seja realizada de forma setorizada, obtendo-se parâmetros específicos para cada subclasse ou ramo industrial específico.

Todas estas considerações anteriores sobre o comportamento das cargas residencial, comercial e industrial estão bem ilustradas através dos gráficos constantes do Apêndice A, servindo para melhor compreensão e comprovação dos fatos registrados.

Sobre os parâmetros α_q que retratam o comportamento da potência reativa, observamos valores quase sempre acima de 2. A resposta mais crítica foi do transformador T3 (barra 3), que na madrugada registrou valores muito elevados, entre 10 e 15.

Um fato que pode estar associado ao fenômeno é a existência de uma pesada potência instalada de transformadores de distribuição que operam próximo da condição a vazio na madrugada, evidenciando-se suas correntes de excitação. Outro fato relacionado é a existência de compensação reativa na rede provida através de diversos bancos de capacitores fixos, ligados em derivação, conexão estrela isolada.

Neste caso específico do T3, as medições foram exaustivamente refeitas para confirmação, mantendo-se sempre estes valores altos. Para consolidar a investigação do fato, foram também refeitas as medições do transformador T2, e os valores encontrados na madrugada, mantiveram-se elevados, próximos a 10.

De uma forma geral, um fato notório que deve ser destacado é que as variações naturais da carga tendem a se diluir e serem percentualmente menores em relação ao seu valor atual à medida que ele aumenta. O que normalmente ocorre é um fenômeno de compensação entre as cargas que instantaneamente se agregam e aquelas que se desagregam à carga total do sistema sob análise. Evidentemente este processo se torna menos presente à medida que se toma valores de carga cada vez menores e, nesta situação, o impacto das variações naturais pode assumir valores mais expressivos, chegando à situação de comprometer o processo de modelagem via medição.

Para exemplificar, basta considerar dois montantes distintos de carga, como por exemplo, um alimentador pouco carregado partindo de uma determinada barra e a própria barra, supostamente ambos com cargas ativas, em determinado horário, de 1MW e 10MW, respectivamente. Nesta condição, uma variação instantânea líquida de carga (Agregação – desagregação) de 100KW, causaria um impacto de 10% sobre o alimentador e apenas 1% sobre a barra.

Se um procedimento de teste para modelagem de carga (segundo modelo exponencial) estiver sendo conduzido neste momento, envolvendo variações máximas de tensão e potência da ordem de 7% e 10% respectivamente, a obtenção do modelo de carga para o alimentador fica claramente comprometida, devido ao mascaramento imposto pelos 10% de variação natural líquida da carga. O nível de incerteza nesta situação seria total, pois o valor correto de α_p neste caso é 1,40 e estaria sendo estimado (calculado) por 2,69, valor grosseiro e inaceitável. Para a barra, ter-se-ia uma situação plenamente cômoda e aceitável, pois o impacto de 1% de variação natural líquida na potência conduz a um valor calculado de 1,54 para α_p , para o mesmo valor correto de 1,4, apresentando um erro de 10% neste índice.

Cabe aqui a questão: O que significa, na análise dos SEP, um erro de modelagem de 10% no índice α_p ? Para responder a questão com maior exatidão e clareza deve-se avaliar o impacto em cada estudo específico ou no mínimo por grupos de estudos de mesma natureza (Estabilidade de tensão, Otimização, Análise de contingências, Compensação reativa, etc). Contudo, sabe-se que o modelo de carga impacta diretamente o resultado dos programas de fluxo de potência que são executados nestes vários estudos. Mais especificamente, os resultados são afetados pela atualização das barras de carga (PQ), que por consequência alteram a matriz

jacobiana e os resultados das injeções de potência, os fluxos das Linhas de transmissão e as próprias tensões das barras.

Para se ter uma idéia simplificada deste impacto, basta lembrar que um erro de 10% para mais no índice, como no exemplo acima, significa dizer que para um α_p igual a 1,54, a potência ativa da barra do exemplo, em determinado momento do processo iterativo em que a tensão fosse 1,02 pu. estipularia o valor de *10,31MW* ao invés de *10,28MW*, ou seja uma diferença de 0,3%, acarretando certamente pequenos erros nos valores das demais variáveis de interesse, como tensões, correntes e carregamentos, porém, provavelmente de pouca relevância ou impacto para os resultados (diagnósticos, indicações e conclusões em geral) da maioria dos estudos. Outras simulações foram feitas e observou-se que inexatidões da ordem de até 20% nos valores dos parâmetros, normalmente têm pouco impacto sobre os resultados dos programas de fluxo de potência. Apesar dessa condição aparentemente favorável dos parâmetros, o método aqui proposto para levantamento e cálculo preza pela minimização dos erros naturalmente presentes.

Pelo exposto acima é preciso estar atento durante o processo de análise/observação dos resultados obtidos com um ensaio para modelagem de cargas via medição direta. Os testes durante os quais são observadas variações anormais ou abruptas de carga devem ser descartados e repetidos. Além disso, é fácil observar a dificuldade de modelagem envolvendo pequenos valores de carga.

Basta imaginar um ensaio de modelagem aplicado a uma unidade consumidora apenas (residencial, comercial ou mesmo industrial de pequeno porte). O desligamento ou religação de um simples aparelho ou equipamento (componente de carga), como uma lâmpada ou um aparelho qualquer, pode ter um valor percentual alto perante o valor presente da carga total daquela unidade, inviabilizando o processo nestas situações. Nestes casos deve-se levantar o modelo por grupos de consumidores semelhantes (classes) em cargas mais expressivas, adotando-se os procedimentos aqui propostos (Capítulo 3). Assim o fenômeno indesejável das variações fica mitigado e os resultados tornam-se aceitáveis.

Outro fato observado é que o modelo de carga pode apresentar variações, mesmo dentro de determinado período do ano. Assim, é possível observar variações nos dados obtidos para um mesmo horário e dia da semana. Isto é plenamente possível por duas razões:

A primeira é incontrolável e não há qualquer ação possível sobre a mesma, pois se trata das alterações e interações naturais e diferenciadas que podem ocorrer nas cargas componentes e, por conseqüência, na sua composição final. Este tipo de oscilação leva a valores desconhecidos, já que é impossível pré-determinar a

composição de uma carga em determinado horário e dia por mais dados que tenham sido obtidos no passado. A composição tem sempre uma parcela imprevisível, impactando de modo aleatório o modelo da carga em determinado momento.

A segunda razão, controlável até certo ponto, já foi amplamente discutida e é decorrente das flutuações naturais da carga e da tensão imposta durante a realização dos ensaios. O núcleo desse trabalho (Capítulo 3) indica os procedimentos que minimizam estes impactos. Assim, é possível se ter índices com níveis de certeza da ordem de 80% (índices variando entre $\pm 20\%$).

Em decorrência dessas possibilidades de variação, sugere-se a execução dos ensaios por duas ou três vezes consecutivas, como adotado neste trabalho, repetindo-se os procedimentos para períodos de inverno/verão e/ou estações climáticas intermediárias, atualizando-se a cada três anos, como sugestão inicial.

Neste trabalho foram realizados vários testes em dias de semana e finais de semana. Os testes realizados em dias de semana apresentaram resultados próximos, assim como os próprios resultados repetidos de um mesmo dia de semana. Dessa forma, adotou-se a sexta-feira, sábado e domingo como dias da semana para exibição dos resultados médios específicos de modelagem referentes aos grupos de carga representativos, residencial, comercial e industrial.

As referências [52] e [53] apontam a possibilidade de extração dos parâmetros de modelagem a partir das variações naturais de tensão provocadas por ULTC, e estabelecem critérios para seleção e expurgo de dados ruins mas, ainda assim, não garantem plena isenção das influências graves das flutuações naturais da carga.

Analisando mais cuidadosamente a questão, observa-se que as variações impostas pelo degrau de tensão correspondente a um único tape, como utilizado nos trabalhos em questão, representa apenas 0,625%, que é um valor muito reduzido perante às variações sistêmicas da própria tensão e da carga (flutuações), que podem atingir com frequência valores da ordem de 1,5%, muito superior a esta modesta variação de tensão de apenas um tape.

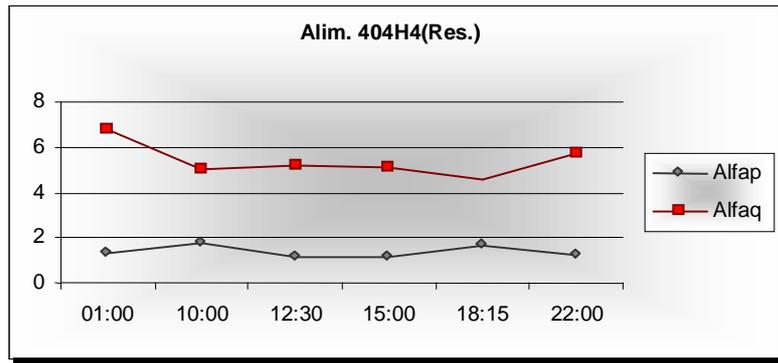
Entretanto, no período da madrugada, quando normalmente registra-se grande estabilidade de tensão e carga, a variação de um tape muitas vezes mostra-se suficiente aos procedimentos de modelagem e os resultados obtidos nas referências aproximam-se daqueles apresentados neste trabalho, ou seja, valores muito elevados (expoentes) para o modelo da carga reativa, comprovando sua elevada sensibilidade à tensão, notadamente durante a madrugada, quando a carga reduz-se e muitos transformadores operam próximos da condição a vazio.

A partir da obtenção dos valores, sugere-se, como procedimento básico, a adoção da média simples entre estes valores, ou a adoção do valor mais crítico para determinado estudo de aplicação.

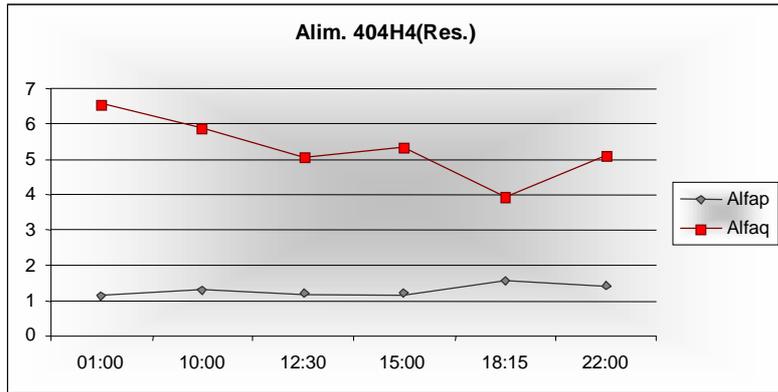
Em estudos de planejamento, onde são analisados condições de carregamento e perfis de tensão, o modelo que se aproxima de potência constante é o mais impactante eletricamente e portanto a adoção do índice que mais se aproxima desta condição estabelece um planejamento mais conservador, conduzindo a ações naturalmente mais onerosas. Por outro lado, havendo restrições financeiras importantes, cabe decidir por correr ou não o risco da adoção de modelos que aproximem de impedância constante e por conseqüência impliquem em ações de planejamento mais simples e baratas. Esta situação de risco é um desafio na engenharia, pois o que se apresenta como barato hoje poderá sem dúvidas ser ainda mais caro que o anteriormente previsto.

Para ilustrar os aspectos aqui discutidos, selecionou-se algumas figuras de destaque. A Figura 17 mostra a variação dos parâmetros (médios) ao longo do dia, durante um dia de semana e fins de semana, para a carga ensaiada do tipo residencial. Os gráficos das demais cargas medidas encontram-se no Apêndice A.

A Figura 18 ilustra variações dos parâmetros α_p e α_q para os três ensaios relativos à carga residencial. Os demais gráficos encontram-se no Apêndice A.



(a)



(b)

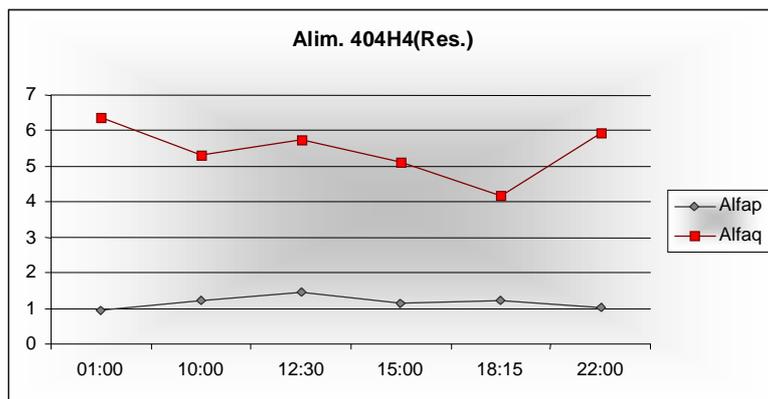
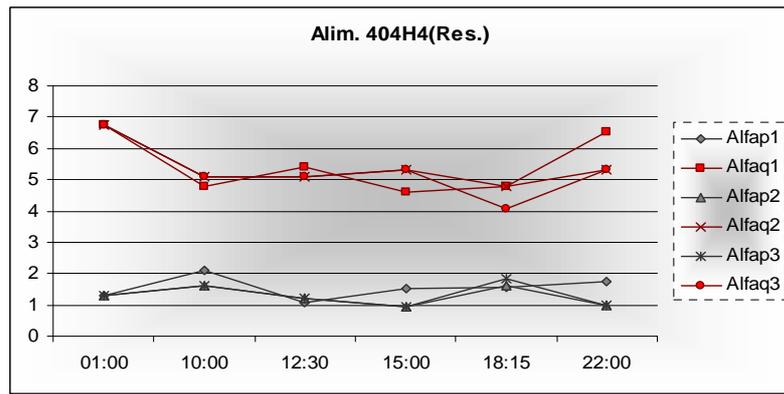
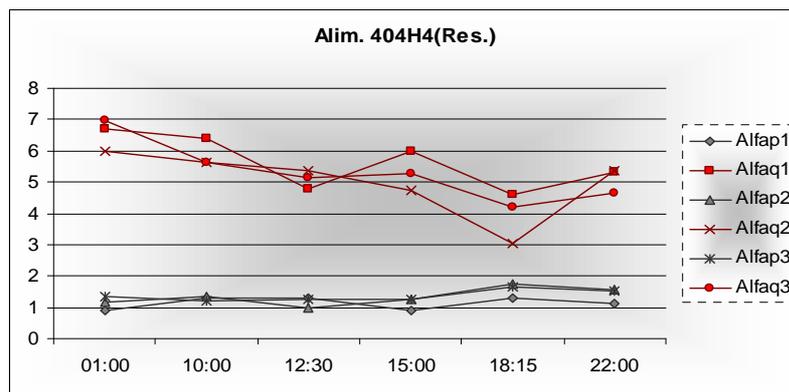


Figura 17 - Variação diária dos parâmetros médios α_p e α_q de uma carga tipicamente residencial.:
 (a) Dia de semana, (b) Sábado e (c) Domingo.



(a)



(b)

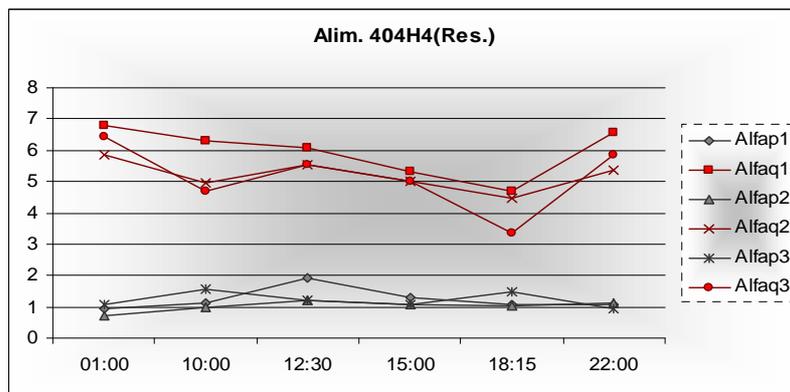


Figura 18 - Variações dos parâmetros α_p e α_q da carga residencial nas três medições: (a) Dia de semana, (b) Sábado e (c) Domingo.

5. Avaliação dos impactos da modelagem de carga - estudo de caso-CEMIG.

Este estudo de caso tem por objetivo avaliar e evidenciar os impactos (principalmente os financeiros) provocados por diferentes modelagens de carga assumidas no programa de fluxo de potência. Assim, considerando um aumento de demanda pretendido/solicitado por um determinado consumidor de média tensão ligado a uma rede de distribuição, analisou-se o comportamento das tensões e carregamentos, além das correspondentes proposições de obras necessárias, em três situações de modelagem de carga.

Na primeira situação considerou-se a forma de planejamento atual. Na segunda e terceira avaliações, considerou-se situação extrema de modelagem das cargas como impedância constante e potência constante, respectivamente, para todas as cargas do alimentador, definindo-se para cada caso as obras necessárias à garantia das condições aceitáveis de fornecimento. A modelagem por corrente constante não foi analisada, já que o objetivo é o de mostrar a situação atual e as situações extremas de contorno. Evidentemente, a situação ideal para estudo seria analisar o problema empregando-se a modelagem real das cargas advindas da aplicação da metodologia exposta no capítulo 3. Contudo, isto ainda não é possível devido à necessidade de adaptações no programa de fluxo de carga utilizados pelas empresas.

Como exemplo para análise, foi utilizado o estudo de caso referente a um aumento de carga pretendido por um consumidor primário ligado à rede de 13,8kV, da subestação Barroso 3. O alimentador envolvido é o 312F4 e o consumidor, cujo nome real será omitido por razões de preservação de seus dados comerciais, será denominado doravante de indústria "X". Neste exemplo, estuda-se a situação de acréscimo de demanda (1000 kW) pretendido pelo cliente, passando sua demanda contratada atual de 300kW para 1300kW, no período fora de ponta. Como se trata de um consumidor sob tarifa "verde", este não apresenta demanda contratada na ponta em dias de semana, contudo está livre para consumir até o valor de sua demanda contratada, em qualquer horário, aos sábados e domingos. Assim, as análises foram conduzidas de forma a considerar a pior condição que, neste caso coincide com o período de ponta de sábado, quando a carga residencial é significativa e, adicionada ao consumo livre dos clientes industriais poderá atingir seu maior valor. O estudo analisa basicamente as condições de violação de carregamento e tensão em toda a rede e estabelece as ações e obras anuais necessárias dentro de um horizonte de planejamento reduzido de 3 anos para absorver este acréscimo de demanda

pretendido. Como o objetivo deste trabalho está focado na questão da modelagem de carga e seus impactos, esta análise de planejamento ficará limitada aos resultados previstos para o primeiro ano-horizonte.

As cargas do sistema de distribuição podem ser analisadas a partir de qualquer ponto da rede. O programa de fluxo adotado pela Cemig(PSS-ADEPT) é então aplicado a partir do ponto de interesse selecionado, abrangendo todos os parâmetros elétricos de rede e as cargas existentes a jusante desse ponto ou barra considerada, analisados por cada fase.

A Figura 19, mostra uma vista geral do alimentador 312F4, onde está ligado o cliente especial indústria “X” e cujo aumento de demanda será analisado sob a ótica das diferentes modelagens para as cargas componentes do alimentador. Nas análises a seguir, os elementos de circuito tais como cabos capacitores e reguladores são considerados como cargas do tipo impedância constante.

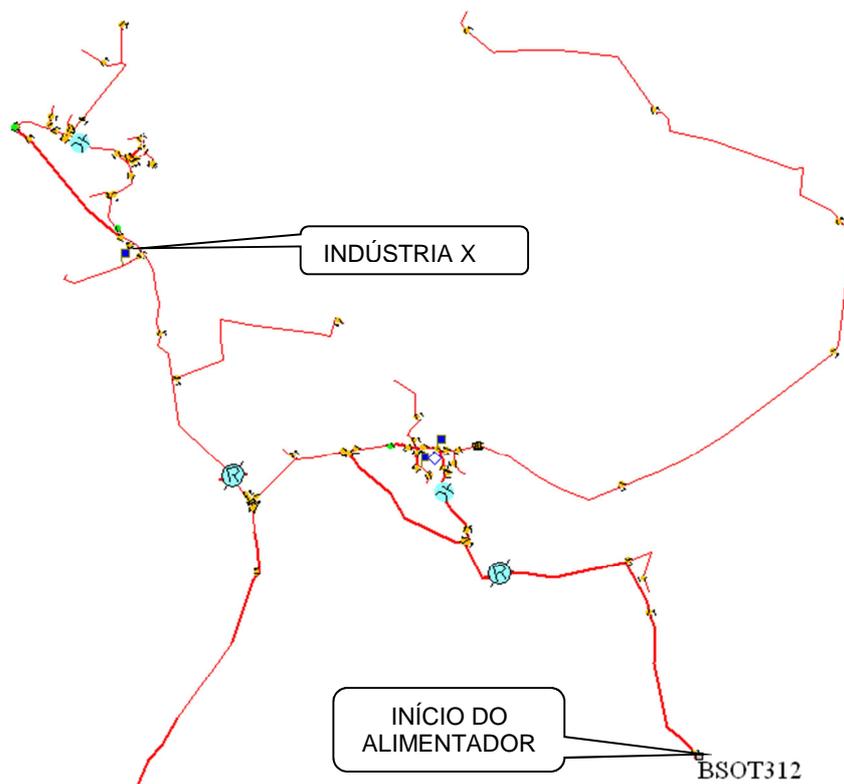


Figura 19 - Alimentador sob análise - 312F4 - SE Barroso 3.

O programa de fluxo de carga, PSS-ADEPT, permite a atribuição de modelos de carga diferenciados, porém assumindo modelos únicos de predominância, ou seja, no processo de análise, a carga de cada transformador é assumida como sendo predominantemente residencial, comercial ou industrial, com modelos de impedância,

corrente e potência constante, respectivamente.

As condições aceitáveis de carregamento são balizadas pelos limites de carregamento contínuo dos condutores e, para estes casos analisados, não sofreram violações dentro desse horizonte de curto prazo (um ano apenas).

A Figura 20 mostra a situação ao final do primeiro ano-horizonte, referente à primeira análise feita empregando-se a metodologia atual. Nesta situação atual a modelagem de carga considerada pelo programa de fluxo atribuiu valores padrões de Z, I ou P constantes, conforme a predominância (residencial, comercial ou industrial), apresentada por cada elemento de carga (cada transformador ou consumidor especial de MT), respectivamente. Dessa forma, toda a carga de um transformador é assumida como sendo de modelo único, de acordo com a predominância existente. As condições de tensão observadas foram balizadas pelos limites do órgão regulador, ANEEL, conforme mostrados no Apêndice B. No caso das análises realizadas foram observadas subtensões abaixo de 0.93p.u. em alguns pontos ou regiões, que estão registradas em vermelho, destacando-se das regiões desenhadas em verde que retratam condições de tensão adequadas.

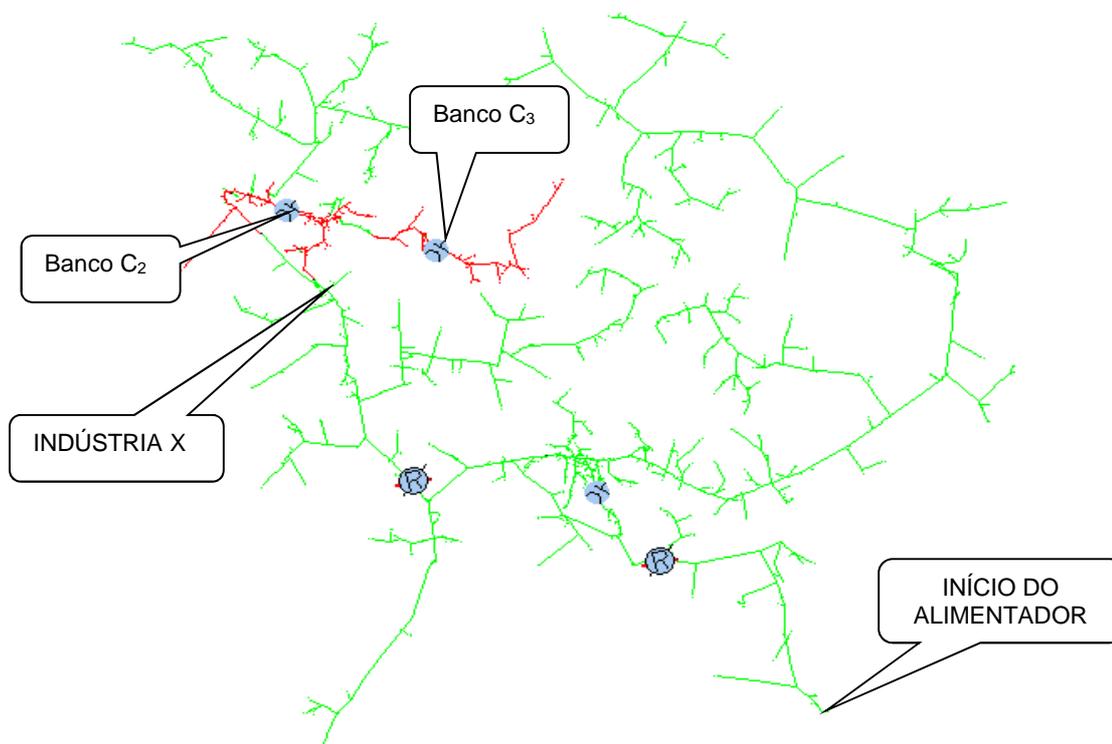


Figura 20 - Análise de planejamento - metodologia atual.

Para normalização da condição de subtensão é necessária a inserção de outro banco de capacitores de 300kVAr, ligação estrela isolada, indicado como o banco de capacitores C3 na Figura 20. O custo médio desta alteração é de R\$ 25.000.

A Figura 21 e a Figura 22, mostram os perfis de tensão para as três fases ao longo do circuito radial envolvendo os reguladores de tensão, antes e depois da inserção da obra planejada do banco de capacitores C3.

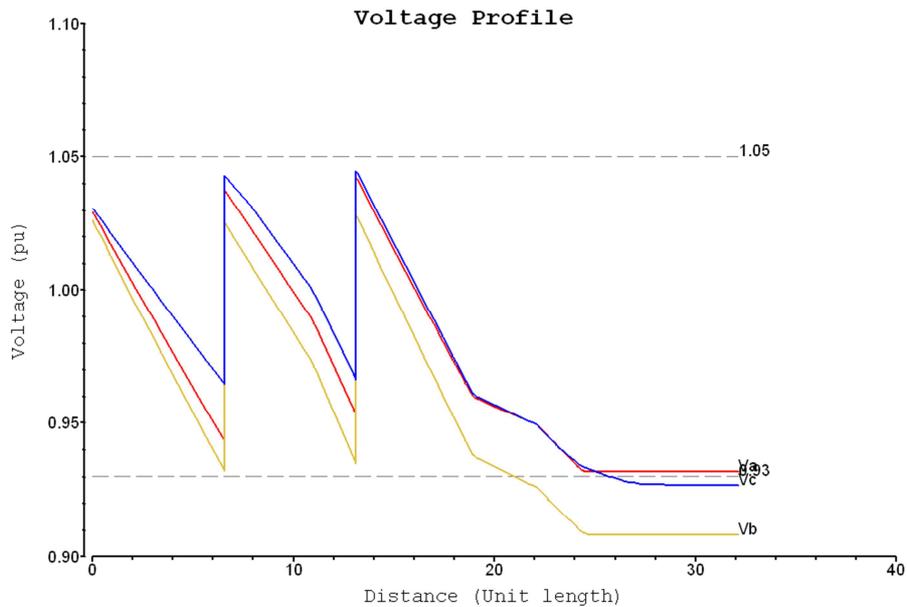


Figura 21 - Perfis de tensão - situação sem obras

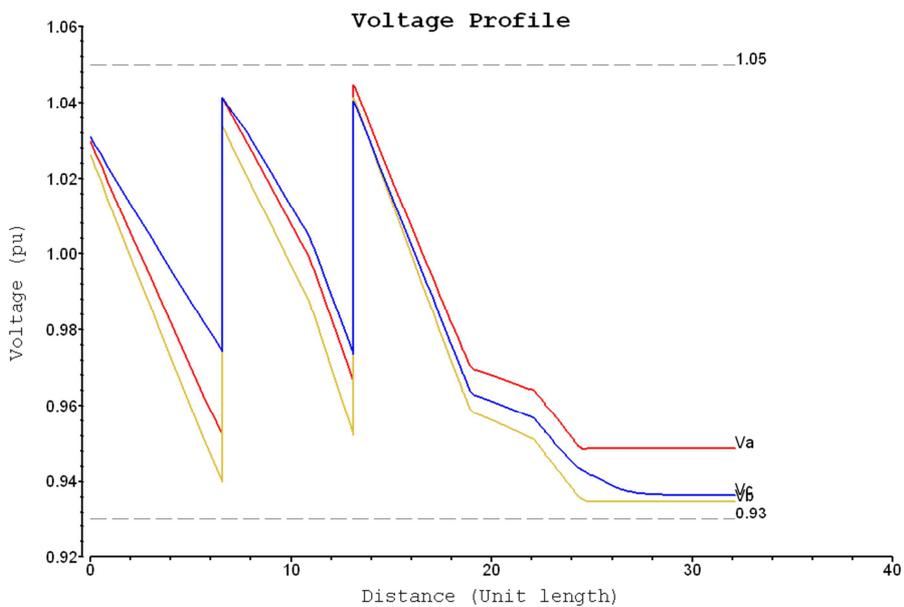


Figura 22 - Perfis de tensão - situação com obras.

Na Figura 21 observa-se que a regulação de tensão esgota-se após o segundo regulador, estabelecendo níveis de tensão inaceitáveis para os consumidores a jusante daquele ponto, localizados na região colorida em vermelho na Figura 20.

Já a Figura 22 mostra a inserção do banco de capacitores C3 e seu correspondente efeito nos perfis de tensão da região precária. Com esta obra os níveis de tensão ficam na faixa adequada.

A Figura 23 mostra o resultado para a situação economicamente mais favorável, resultante da modelagem das cargas unicamente como impedância constante, inclusive o cliente industrial "X". Nesta nova situação, a região de abrangência da subtensão sustentada fica reduzida, como se pode observar na ilustração.

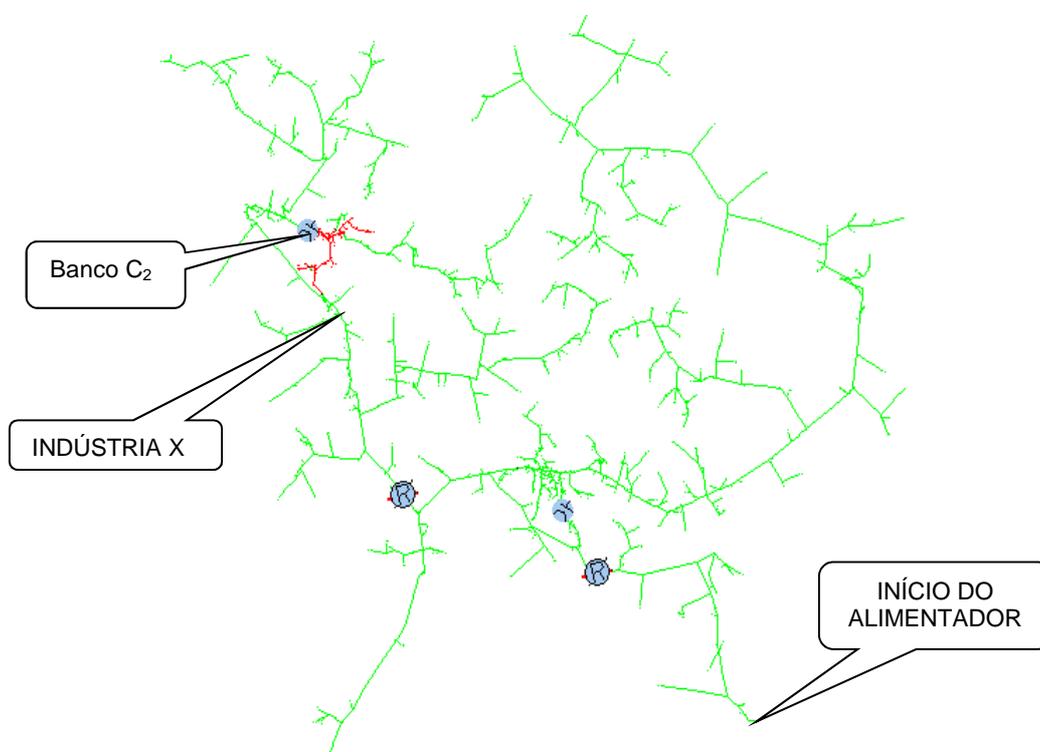


Figura 23 - Análise de planejamento - modelo impedância constante.

Na situação da Figura 23, apesar da região de subtensão estar reduzida, ela deve ser corrigida com a ampliação do banco de capacitores C2 de 300kVAr para 600kVAr, cujo custo médio instalado é de R\$ 15.000. De forma semelhante, os perfis de tensão (sem obra e com obra) são mostrados na Figura 24 e na Figura 25. Como pode ser visto, depois de instalado o banco de capacitores, não mais existiu subtensões sustentadas na rede de distribuição.

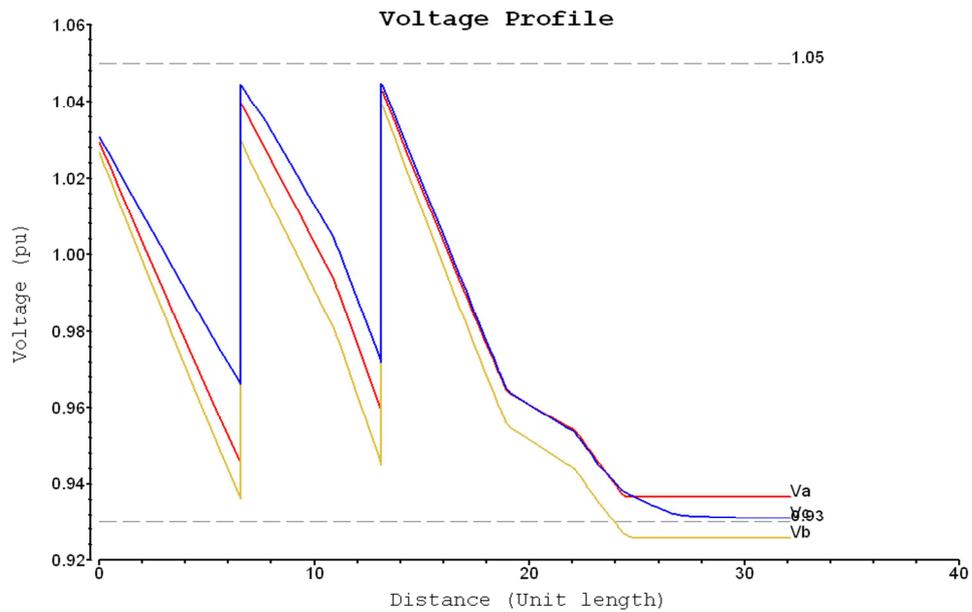


Figura 24 - Perfis de tensão - situação sem obras.

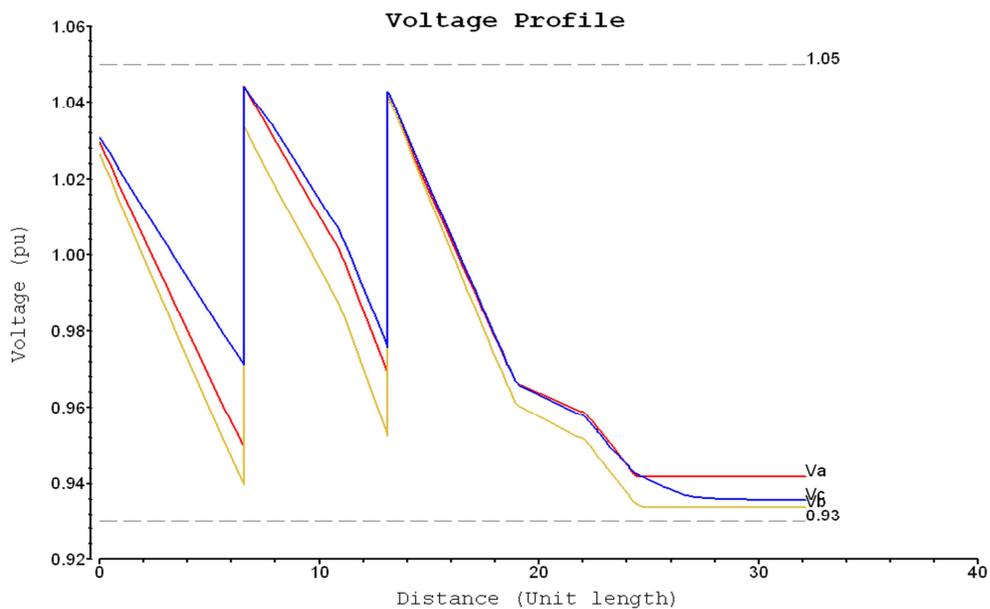


Figura 25-Perfis de tensão - situação com obras.

A situação mostrada na Figura 26 considera uma modelagem de carga do tipo potência constante para todas as cargas do alimentador, que leva à situação de degradação de tensão mais crítica de todas. Para normalizar esta situação serão necessárias mais obras de adequação, cujo custo total médio é de R\$ 300.000, correspondendo à inserção de um Regulador de Tensão (banco R3), ampliação de um existente (banco R2) e ampliação de dois bancos de capacitores (bancos C1 e C2).

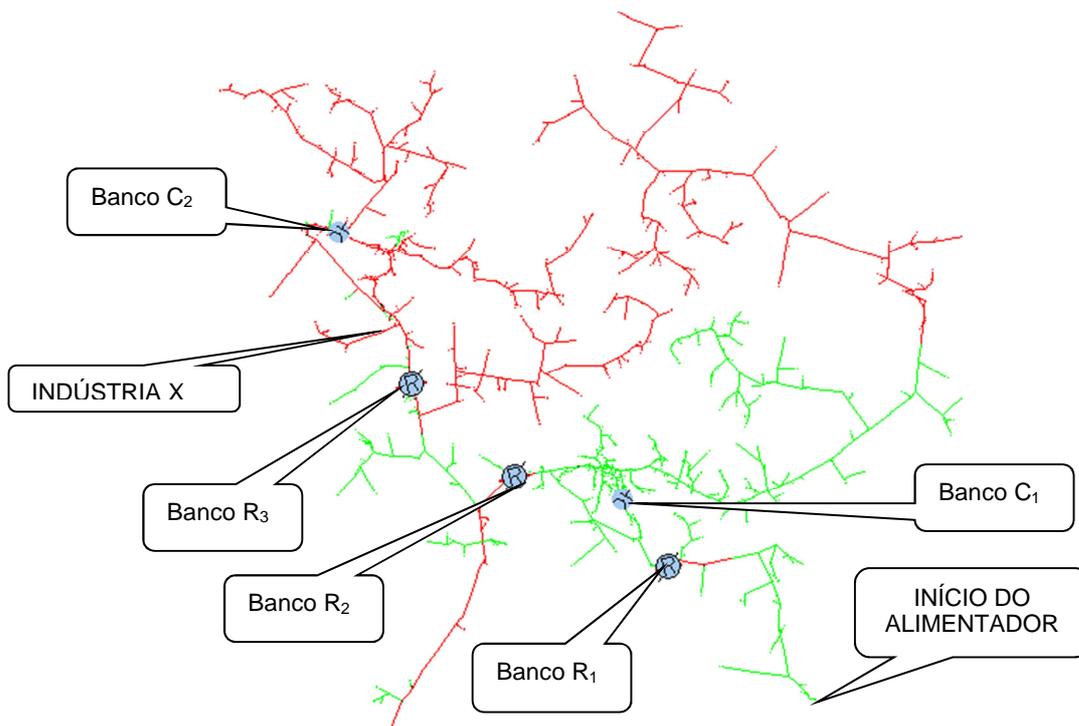


Figura 26 - Análise de planejamento - modelo potência constante.

Os perfis de tensão antes e depois das obras de normalização são mostrados na Figura 27 e Figura 28 respectivamente. Observa-se que antes da inserção das obras, o perfil de tensões ilustrado na Figura 27 mostra fortes subtensões sustentadas, principalmente na fase B. Com as obras, ocorre a desejada regularização dos níveis de tensão ao longo da rede.

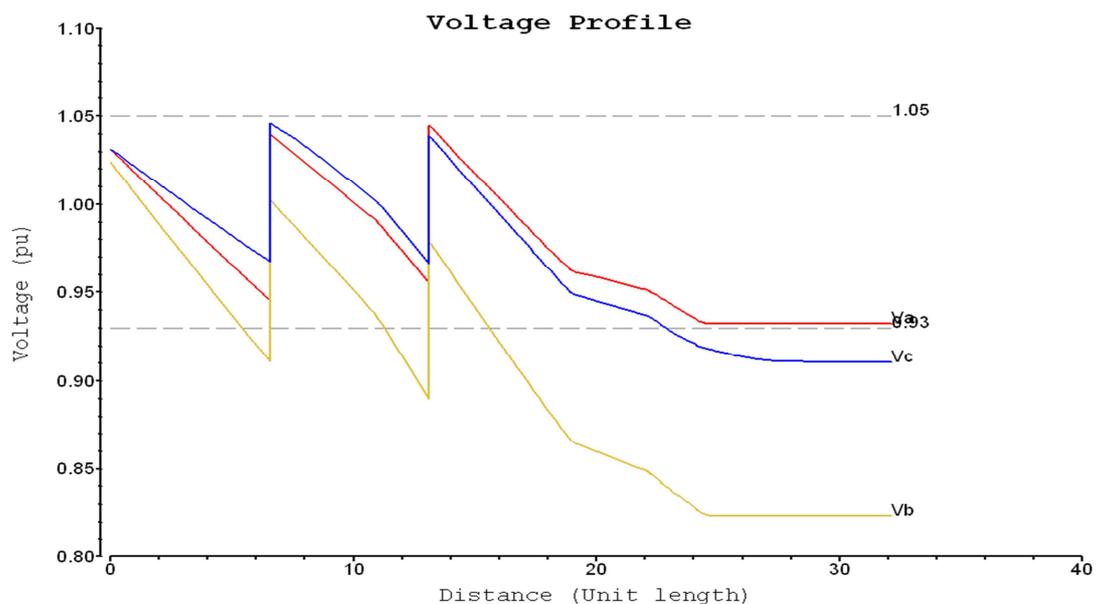


Figura 27- Perfis de tensão - sem obras

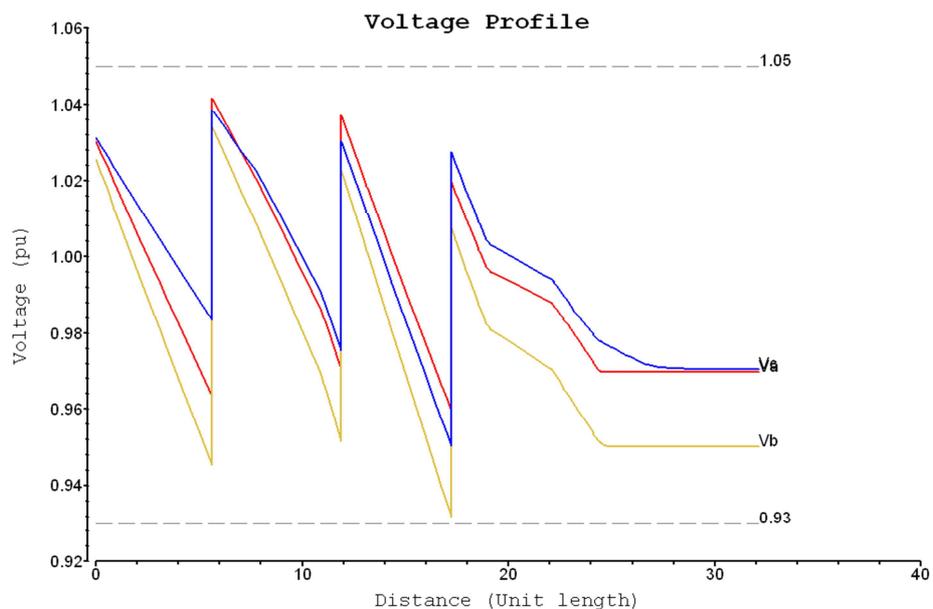


Figura 28- Perfis de tensão - com obras.

As análises apresentadas evidenciam os importantes impactos da modelagem de carga sobre o processo de planejamento, exibindo diferentes diagnósticos operativos e realizações físico-financeiras para normalização das condições de fornecimento.

O modelo atualmente empregado situa-se de forma intermediária entre as opções extremas obtidas por modelagens com impedância e potência constantes respectivamente, cujos impactos financeiros diferem por um valor aproximado de R\$ 275.000, dentro desse simples caso exemplo, limitando-se ao curto horizonte de um ano apenas.

Certamente a aplicação de uma modelagem de carga mais confiável e consistente, conduziria a resultados mais realistas e próximos às necessidades dos estudos de expansão e operação dos sistemas

A Tabela 16 mostra as diferenças financeiras entre os casos de modelagem abordados no exemplo aqui utilizado.

Tabela 16-Resultados financeiros para as diferentes modelagens utilizadas no caso exemplo.

Modelagem	Investimentos (R\$)	Dif. para situação atual (R\$)
Impedância constante	15 000	- 10 000
Atual	25 000	0
Potência constante	300 000	275 000

6. Sumário do capítulo.

Este capítulo apresenta inicialmente um estudo com o objetivo de testar e validar a metodologia de modelagem de carga proposta, incluindo os procedimentos de medição e a aplicação dos modelos obtidos. Os resultados mostraram-se aderentes e favoráveis à utilização prática da metodologia apresentada.

Para consolidação da técnica em estudo e produção dos primeiros resultados práticos associados a sistemas reais, foram realizadas várias medições em grupos de cargas típicos (residencial, comercial e industrial), gerando as várias tabelas correspondentes. Para estabelecer um comparativo entre os modelos convencional e novo (polinomial ampliado), foram aplicadas ambas representações gerando várias tabelas correspondentes, que permitem concluir com clareza as limitações do modelo ZIP convencional para cargas que variam fortemente com a tensão (expoentes acima de 2). Pelos resultados obtidos, observam-se as variações e tendências de cada carga selecionada, na maior parte dentro de valores e comportamentos esperados, ilustrados nas figuras do texto e mais detalhadamente no Apêndice A.

Ao final, é feito um estudo de caso da Cemig com o objetivo de comprovar os impactos técnicos e econômicos decorrentes das diferentes modelagens de carga adotadas, ratificando assim a grande relevância e amplitude do tema.

Capítulo 5

Conclusões e recomendações de aprimoramento.

1. Conclusões gerais.

Considerando a importância e a exigência cada vez maior em relação à qualidade (exatidão) dos resultados da aplicação de fluxos de potência aos diversos estudos de engenharia elétrica, seja na operação ou nos estudos de expansão dos SEP, a correta modelagem das cargas, são sempre instrumentos imprescindíveis ao processo. Neste sentido, o trabalho tem como foco, apresentar uma opção de metodologia para modelagem estática de cargas, confiável, eficiente e de fácil aplicação.

A metodologia proposta, por meio de medição direta e aplicação de técnicas de otimização, apresenta um procedimento de modelagem mais refinado e aderente aos valores reais, obtidos através de ensaios de campo sistematizados, que buscam mitigar os efeitos indesejáveis das variações naturais da carga durante os procedimentos de teste, conforme discutido nos Capítulos 3 e 4.

A metodologia apresentada não tem a pretensão de prover resultados absolutamente corretos ou exatos, mas com certeza oferece um instrumento tecnicamente trabalhado e realizável para modelagem de cargas, de aplicação relativamente simples e resultados confiáveis, dentro dos limites expostos e considerando os cuidados na sua execução e análise.

No Capítulo 4, o novo modelo de representação polinomial é apresentado, amplamente testado e validado pelas medições reais. Este modelo ampliado resolve com eficiência a questão da representação polinomial para todas as cargas, notadamente as reativas de elevada sensibilidade às variações da tensão. Ambos os modelos, ZIP ampliado e exponencial, aliados à metodologia de ensaios e procedimentos propostos, apresentaram resultados satisfatórios para representação das cargas ativa e reativa, colocando esta metodologia disponível para utilização prática. O modelo ZIP convencional mostrou claramente sua dificuldade para representar a parcela reativa da carga, produzindo erros inaceitáveis, descartando definitivamente sua utilização para modelagem de cargas reativas. Como solução para o problema, apresentou-se o modelo polinomial ampliado.

Outra importante contribuição que pode ser creditada ao trabalho é o estabelecimento, também no Capítulo 4, de um conjunto de medições para as classes de carga predominantes (residencial, comercial e industrial), específico de um subsistema da Cemig, mas que pode ser adotado como referência preliminar para análises e comparações com medições semelhantes em outros sistemas ou concessionárias.

No futuro, com o contínuo aprimoramento das tecnologias aplicadas às redes elétricas, notadamente com o advento das redes inteligentes (smart grids), a “visibilidade” sobre a rede (parâmetros elétricos e energéticos) será maior e mais pulverizada, permitindo assim a implementação deste processo de modelagem ao longo da mesma, certamente com maior eficiência, acurácia e amplitude.

2. Proposições de trabalhos futuros.

Com relação à modelagem em si sugere-se pesquisar modelos com a introdução da parcela “motor de indução”, que perfaz elevados percentuais de composição das cargas atuais. A opção de representação com “motor de indução” serviria particularmente aos estudos de estabilidade e segurança de tensão nos SEP.

Outra sugestão para trabalho futuro recomenda-se estender a aplicação das medições de campo por mais classes de consumidores, ampliando os dados de parâmetros para classes específicas e oportunamente refinando a metodologia aqui apresentada. Outra ação importante neste contexto é a realização de medições em outras estações do ano retratando as sazonalidades devido ao clima, horário de verão, hábitos diferenciados, etc. Além disso, cabe pesquisar a periodicidade ideal de atualização dos parâmetros.

Recomenda-se também pesquisar a modelagem de cargas com a frequência, estabelecendo assim modelos de carga que permitam melhor estudar e controlar o fluxo de harmônicos nos SEP.

Encerrando, ressalta-se a importância dos estudos relacionados à modelagem de carga para qualificação das análises e resultados de engenharia associados ao fluxo de carga. Dessa forma, toda pesquisa sobre o assunto deve ser considerada com grande destaque e interesse.

Bibliografia

- [1] KOSTEREV D.; MEKLIN A. *et al*, *Load Modeling in Power System Studies: WECC Progress Update*, IEEE PES General Meeting, Vancouver, Canada, July 2008.
- [2] HISKENS I.A.; MIEEEE; MILANOVIC J.V., *Load Modelling in Studies of Power System Damping*, IEEE Transactions on Power System, Vol. 10, No. 4, November 1995.
- [3] PRICE, W.W. *et al*, *IEEE Task Force: Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation*, IEEE Transactions on Power Systems, v.10, February 1995.
- [4] HAJAGOS, L.M.; DANAI, B., *Laboratory Measurements and Models of Modern Loads and Their Effect on Voltage Stability Studies*, IEEE Transactions on Power Systems, v.13, No.2, May 1998.
- [5] PRICE, W.W. *et al*, *IEEE Task Force: Load Representation for Dynamic Performance Analysis*, IEEE Transactions on Power Systems, v.8, No.2, May 1993.
- [6] COKER, M.L.; KAGASOANE, H., *Load Modeling*, AFRICON, 1999 IEEE, 28 Sept.-1 Oct., 1999, Pages:663 - 668 v.2, 1999.
- [7] HONG, Y. Y., *Impacts of Load Models on Selections of Newton Optimal Power Flow*, IEEE TENCON'93/Beijing,1993.
- [8] XU, W; Vaahedi, E. *et al* , *Voltage Stability Load Parameter Determination from Field Tests on B.C Hydro's System*, IEEE Transactions on Power Systems, v.12, August 1997.
- [9] BAGHZOUZ, Y.; QUIST, C., *Determination of Static Load Models from LTC and Capacitor Switching Tests*, Proc. IEEE Power Engineering Society, 2000 Summer Meeting, July 16-20, 2000.

[10] RENADE, S.J.; ELLIS, A.; MECHENBIER, J., *The Development of Power System Load Model from Measurement*, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES, Pages: 201 – 206 v.1, 28 Oct.- 2 nov. 2001.

[11] BAGHZOUZ, Y.; QUIST, C., *Composite Load Model Derivation from Recorded Field Data*, Proc. 199 IEEE/PES Winter Meeting, New York City, NY, Jan 31 Feb 4, 1999.

[12] MAITRA A.; GAIKWAD A. *et al*, *Load Model Parameter Derivation Using an Automated Algorithm and Measured Data*, IEEE General Meeting, Vancouver, Canada, July 2008.

[13] Gaspar, W. ; Garcia, P. *et al*, *Modelagem Estática de Carga com Ajuste de Dados Através de Lógica Nebulosa*, XII Simpósio de especialistas em planejamento da operação e expansão elétrica, XII SEPOPE, Maio de 2012, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

[14] Pinto, D.P., *Representação das Cargas para Estudos de Estabilidade*, MSc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1988.

[15] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA–ANEEL, *Resolução 505, Conformidade dos Níveis de Tensão em Regime Permanente*, Novembro de 2001.

[16] MONTICELLI, A.J., 1983, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. 1ed. São Paulo, SP, Editora Edgard Blucher Ltda.

[17] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performances, *Load representation for dynamic performance analysis*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 2, pp. 472–482, May 1993.

[18] L. Pereira, D. Kosterev, P. Mackin, D. Davies, J. Undrill, W. Zhu, *An Interim Dynamic Induction Motor Model for Stability Studies in the WSCC*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.17, no. 4, pp. 1108-1115, November 2002.

[19] IEEE Task Force Report, *Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 1302-1313, August 1995.

- [20] V. Knyazkin, C. A. Canizares, L.H. Soder, *On the parameter estimation and modeling of aggregate power system loads* *Power Systems*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, Issue 2, pp. 1023- 1031 May 2004.
- [21] *Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, pp. 523–538, Feb. 1995.
- [22] J. V. Milanovic and I. A. Hiskens, *Effects of load dynamics on power system damping*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no, pp. 1022–1028, May 1995.
- [23] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, *Standard load models for power flow and dynamic performance simulation*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 3, pp. 1302-1313, Aug. 1995.
- [24] C. Concordia and S. Ihara, *Load representation in power systems stability studies*, IEEE Transactions on Power App. Systems, vol. PAS-101, no. 4, pp. 969–977, Apr. 1982.
- [25] J. M. Undrill and T. F. Laskowski, *Model selection and data assembly for power system simulation*, IEEE Transactions on Power App. Systems, vol. PAS-101, no. 9, pp. 3333–3341, Sep. 1982.
- [26] H. Renmu, Ma Jin, D.J. Hill, *Composite load modeling via measurement approach*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.21, no.2, pp. 663- 672, May 2006.
- [27] R. H. Craven and M. R. Michael, *Load representations in the dynamic simulation of the Queensland Power System*, J. Elect. Electron. Eng., vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 1983.
- [28] I. A. Hiskens and J. V. Milanovic, *Load modeling in studies of power system damping*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 4, pp. 1781–1788, Nov. 1995.
- [29] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1994.

[30] A. Gebreselassie and J. H. Chow, *Investigation of the effects of load models and generator voltage regulators on voltage stability*, International Journal of Electric Power and Energy Systems, vol. 16, no. 2, pp. 83-89, 1994.

[31] A. Maitra, A. Gaikwad, P. Zhang, M. Ingram, D.L. Mercado, W.D. Woitt, *Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models*, Power Systems Conference and Exposition, PSCE '06. 2006 IEEE PES, pp.1978- 1985, Oct. 29-Nov. 1, 2006.

[32] E. Vaahedi, M.A. El-Kady, J.A. Libaque-Esaine, V.F. Carvalho, *Load Models for Large-Scale Stability Studies from End-User Consumption*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.2, no.4, pp.864-870, Nov. 1987.

[33] General Electric Company, *Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies*, EPRI, Rep. EL-5003, vol. 1–4, Jan. 1987.

[34] W. W. Price, K. A. Wirgau, A. Murdoch, J. V. Mitsche, E. Vaahedi, and M. A. El-kady, *Load modeling for load flow and transient stability computer studies*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, no. 1, pp. 180–187, Feb. 1988.

[35] Dong Han, Jin Ma, Ren-mu He, Zhao-yang Dong, *A Real Application of Measurement-Based Load Modeling in Large-Scale Power Grids and its Validation*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.24, no.4, pp.1756-1764, Nov. 2009.

[36] Jinyu Wen, Shaorong Wang, Shijie Cheng, Q.H. Wu, D.W. Shimmin, *Measurement based power system load modeling using a population diversity genetic algorithm*, Power System Technology, 1998. Proceedings. POWERCON '98. 1998 International Conference on, vol.1, no., pp.771-775 vol.1, 18-21 Aug 1998.

[37] W. Xu, E. Vaahedi, Y. Mansour, J. Tamby, *Voltage stability load parameter determination from field tests on BC Hydro's system*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.12, no.3, pp.1290-1297, Aug 1997.

[38] Byoung-Kon Choi, Hsiao-Dong Chiang, Yinhong Li, Hua Li, Yung-Tien Chen, Der-Hua Huang, M.G. Lauby, *Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.21, no.3, pp.1276-1283, Aug. 2006.

[39] Byoung-Kon Choi, Hsiao-Dong Chiang, *Multiple Solutions and Plateau Phenomenon in Measurement-Based Load Model Development: Issues and Suggestions*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.24, no.2, pp.824-831, May 2009.

[40] Qian Ai, Danzhen Gu, Chen Chen, *New Load Modeling Approaches Based on Field Tests for Fast Transient Stability Calculations*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.21, no.4, pp.1864-1873, Nov. 2006.

[41] J.Y. Wen, L. Jiang, Q.H Wu, S.J. Cheng , *Power system load modeling by learning based on system measurements*, , IEEE Transactions on Power Delivery, vol.18, no.2, pp. 364- 371, April 2003.

[42] Ma Jin, H. Renmu, D.J. Hill, *Load modeling by finding support vectors of load data from field measurements*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no.2, pp. 726-735, May 2006.

[43] H. Renmu, M. Jin, D. J. Hill, *Composite load modeling via measurement approach*, IEEE Transactions on Power System, vol. 21, no.2, pp. 663-672, May 2006.

[44] D. J. Hill, *Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 1, pp. 166–176, Feb. 1993.

[45] D. Karlsson and D. J. Hill, *Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 1, pp. 157–166, Feb. 1994.

[46] C. J. Lin, Y. T. Chen, C. Y. Chiou, C. H.Huang, *Dynamic Load Models in Power system Using the Measurement Approach*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no.1, pp. 309-315, Feb. 1993.

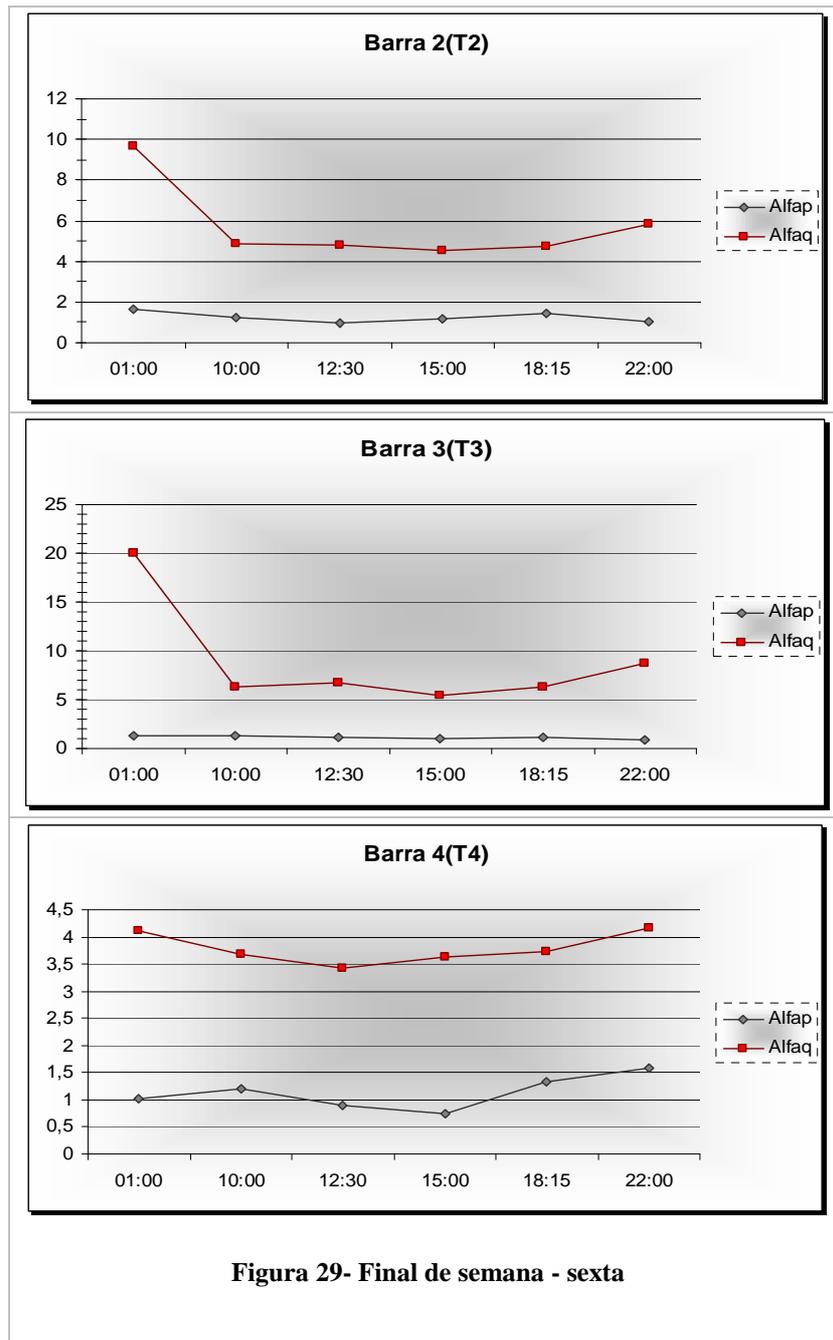
- [47] J. C. Wang, et al., *Development of a Frequency-Dependent Composite Load Model Using the Measure Approach*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no.3, pp. 1546-1556, Aug. 1994.
- [48] P.Ju, et al, *Sequential Parameter Estimation of a Simplified Induction Motor Load Model Synthesis Load Modeling Approach Based on Load Survey and Load Curve Analysis*, IEEE Transactions on Power Systems, vol.11, no.1, pp. 319-324, Feb.1996.
- [49] K. Rudion, et al, *Dynamic Synthesis Load Modeling Approach Based on Load Survey and Load Curve Analysis*, DRPT2008, pp. 6-9, Nanjin, China, April, 2008.
- [50] K.Mistry and R.Roy, *Enhancement of Voltage Stability index of Distribution System by Network Reconfiguration Including Static Load Model and Daily Load Curve*, Innovative Smart Grid Technologies-India, pp. 17-22, IEEE PES, Dec. 2011.
- [51] K. Rudion, et al, *Non-Linear Load Modeling Requirements and Preparation for Measurement*, pp. 1-7, Power & Energy Society General Meeting, IEEE PES '09, July, 2009.
- [52] A. A. Seyed, *On Line Measurement and Monitoring of Power System Impedance and Load Model Parameters*, Thesis submitted to the faculty of graduate studies and research in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in energy systems, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Fall 2010.
- [53] A. A. Seyed, W. Xu, *On Line Tracking of Voltage-Dependence Load Parameters Using ULTC Created Disturbances*, Power Systems, IEEE Transactions on, IEEE early access article, publication year 2012.

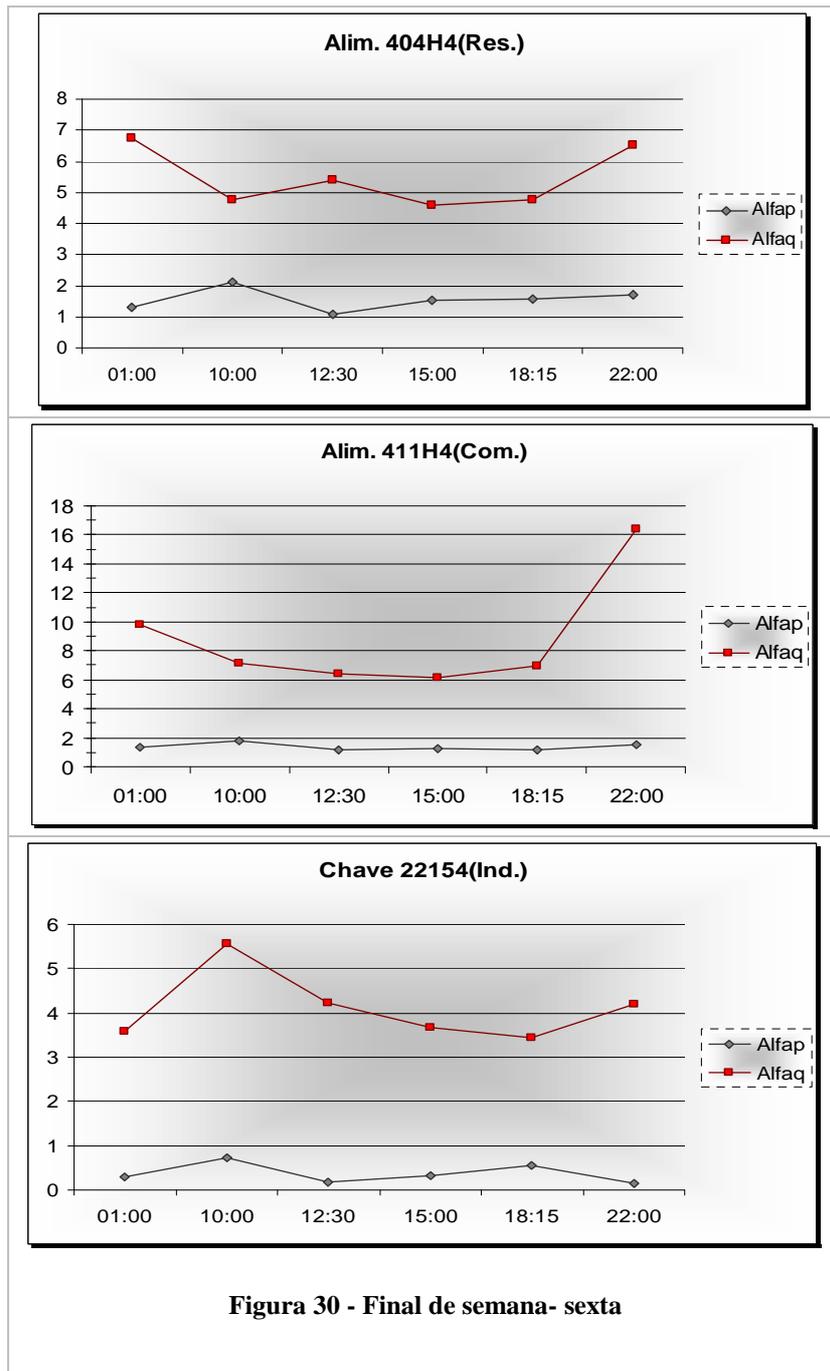
Apêndice A

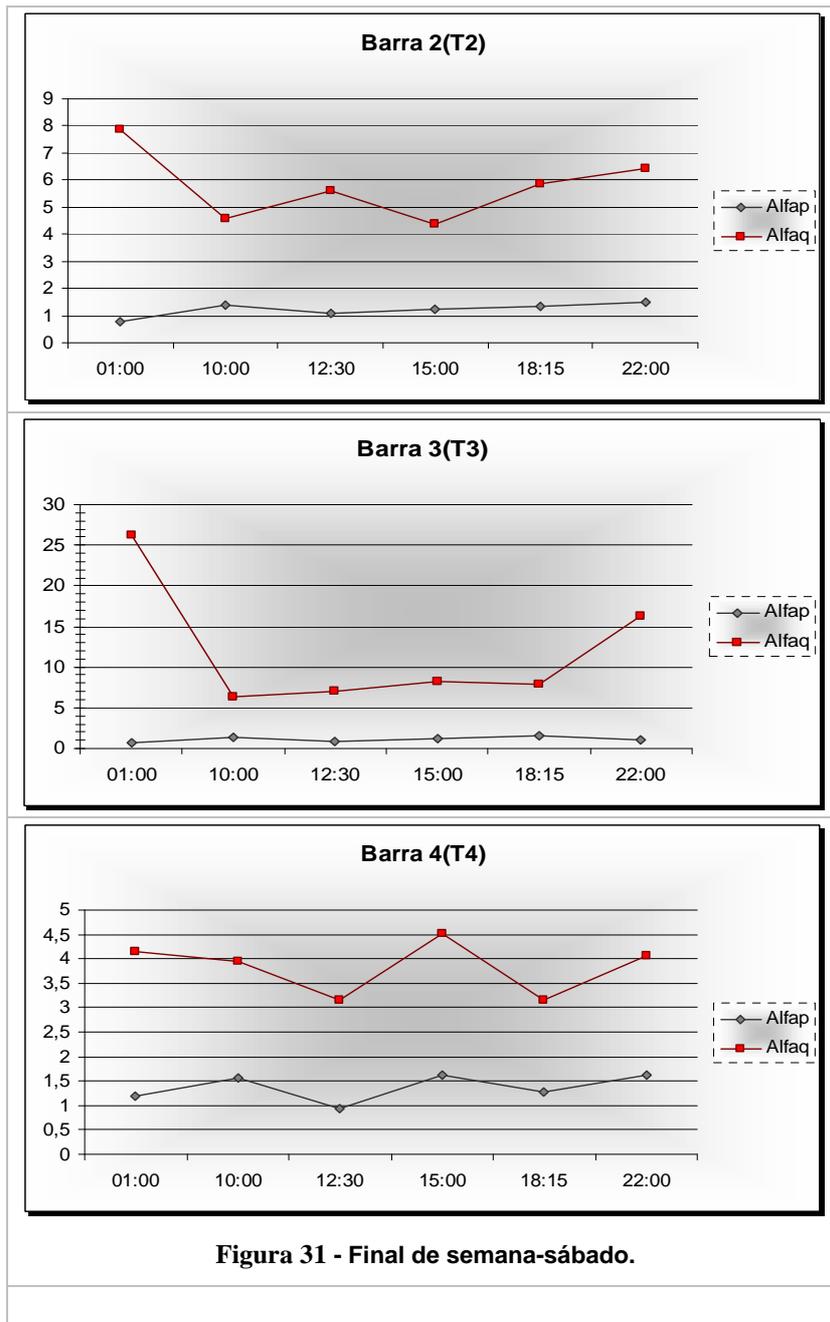
Gráficos dos ensaios para levantamento dos parâmetros α_p e α_q .

Este apêndice apresenta os dados referentes às medições realizadas nos pontos relacionados no Capítulo 4. Foram realizados três conjuntos de medições seqüenciais abrangendo sempre um dia de semana (sexta-feira), sábado e domingo.

Os gráficos estão organizados e apresentados da seguinte forma: Um primeiro conjunto refere-se às medições de um período escolhido. O segundo exibe as médias obtidas entre os três ensaios realizados e um terceiro grupo mostra simultaneamente as três medições realizadas em cada horário, com o objetivo de verificar a dispersão natural dos valores para um mesmo horário e dia de semana.







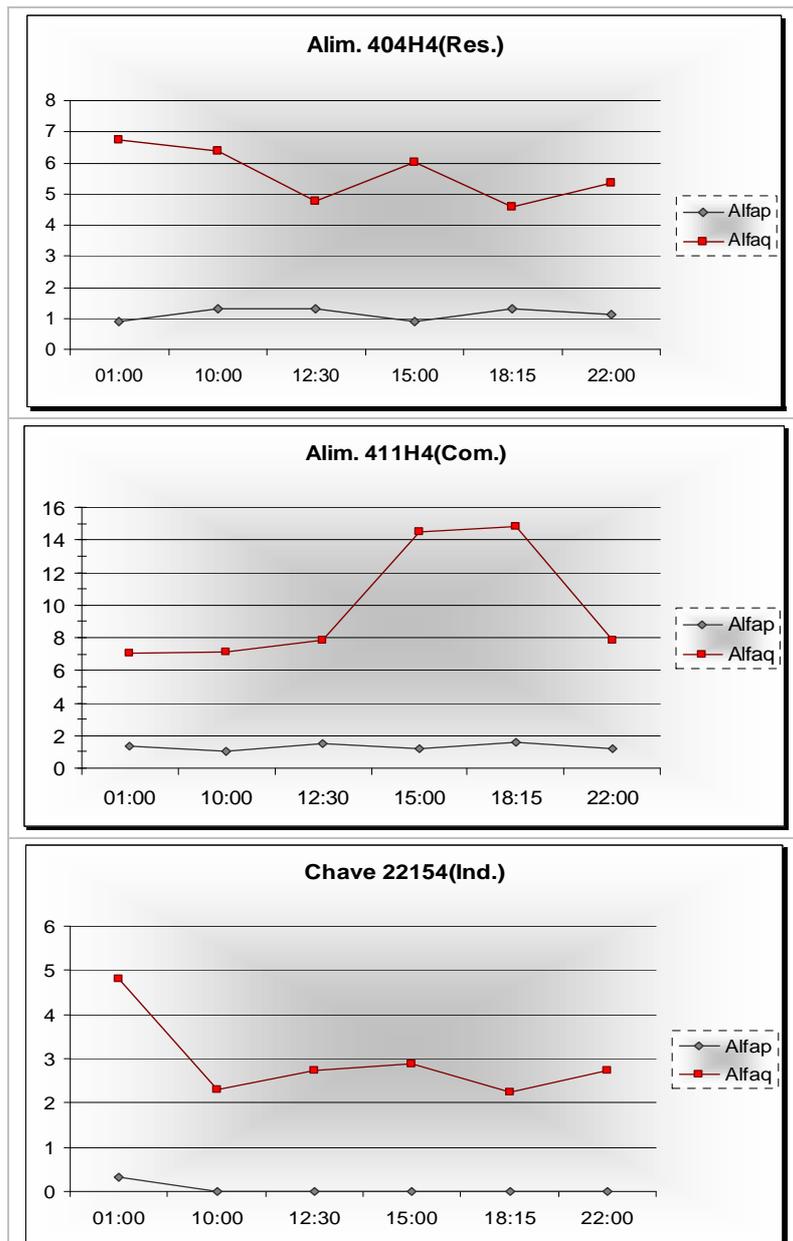


Figura 32 - Final de semana-sábado.

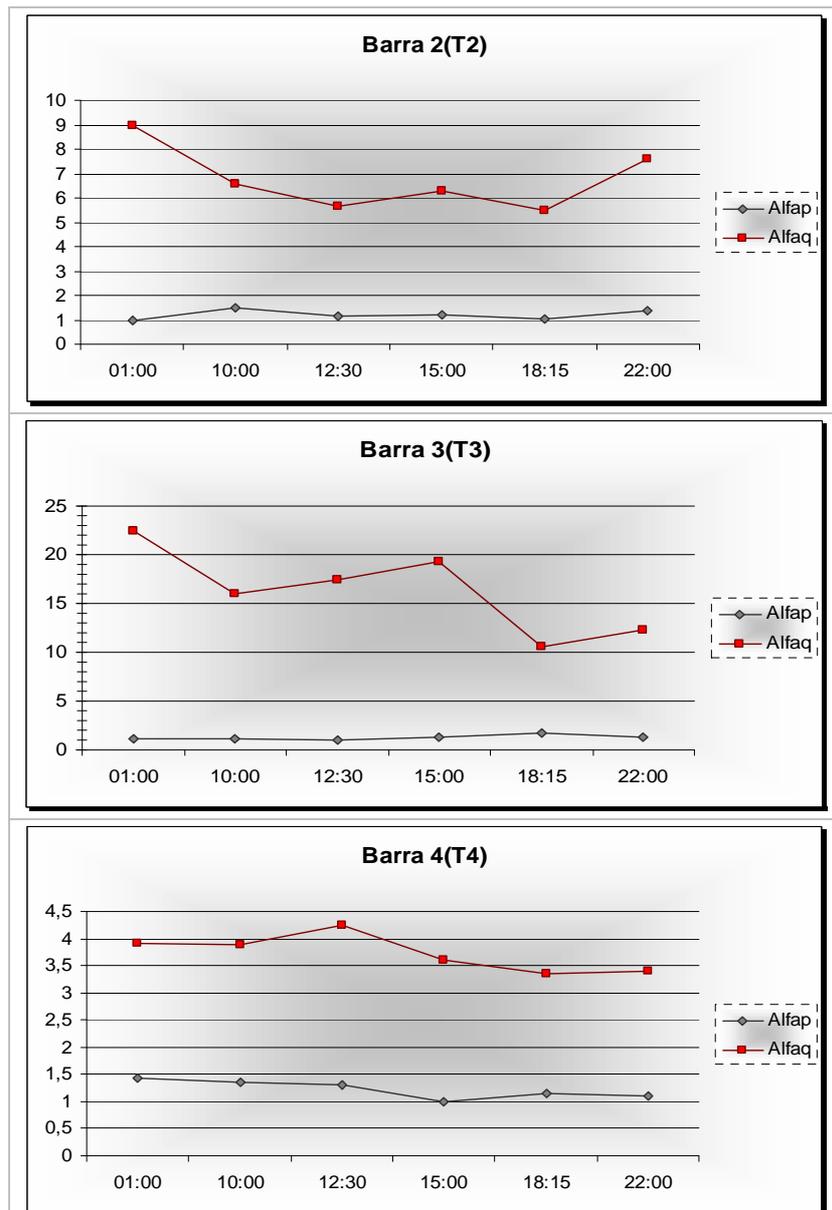
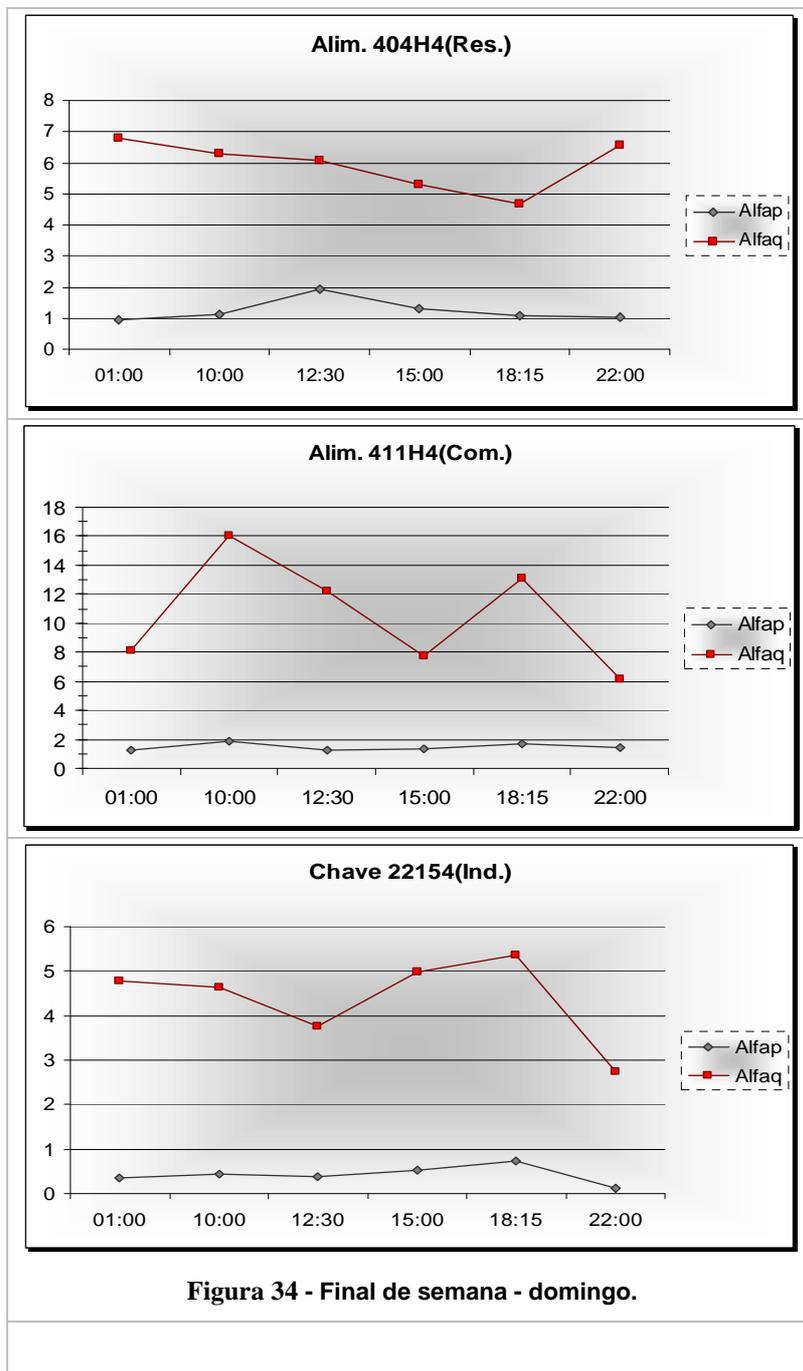
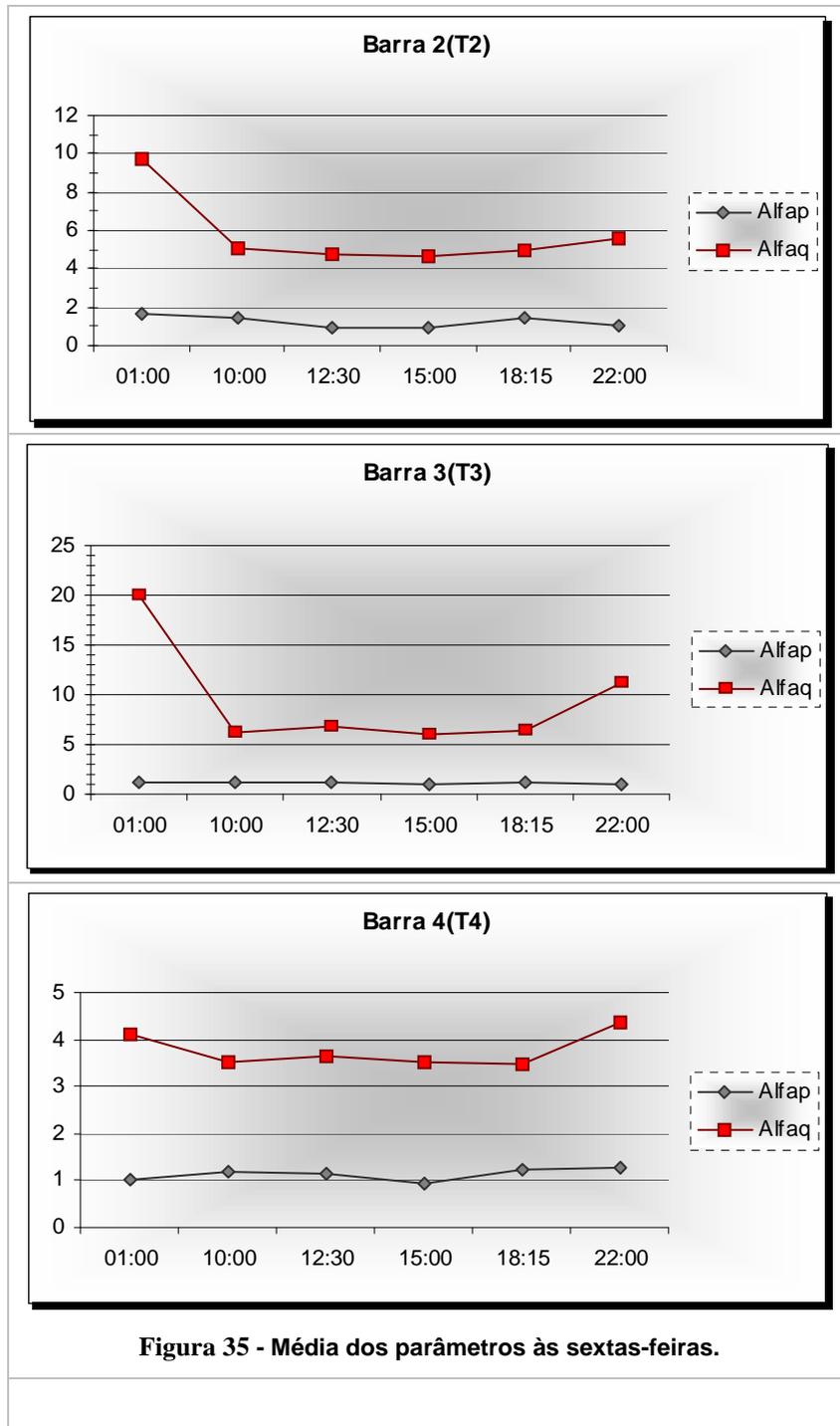
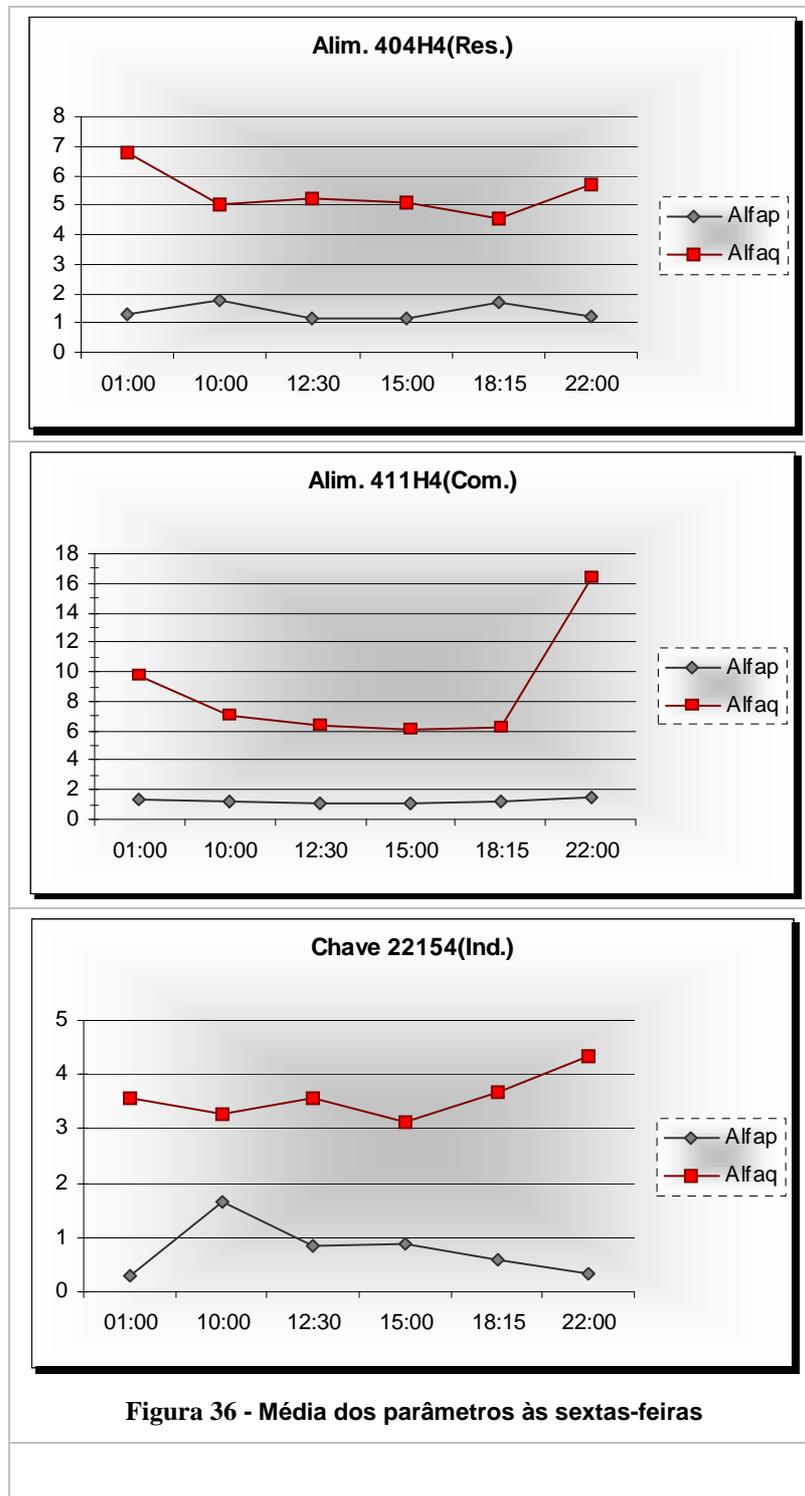
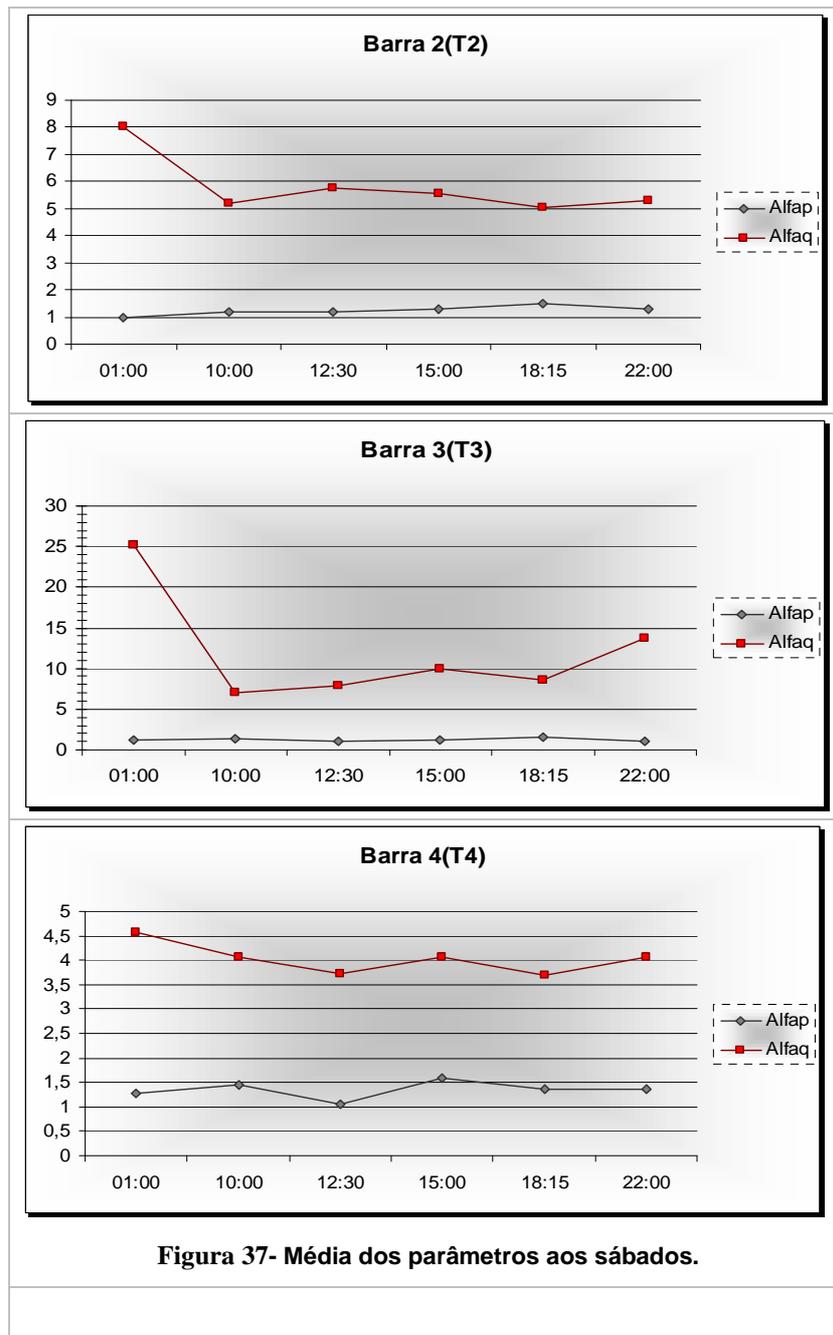


Figura 33 - Final de semana-domingo.









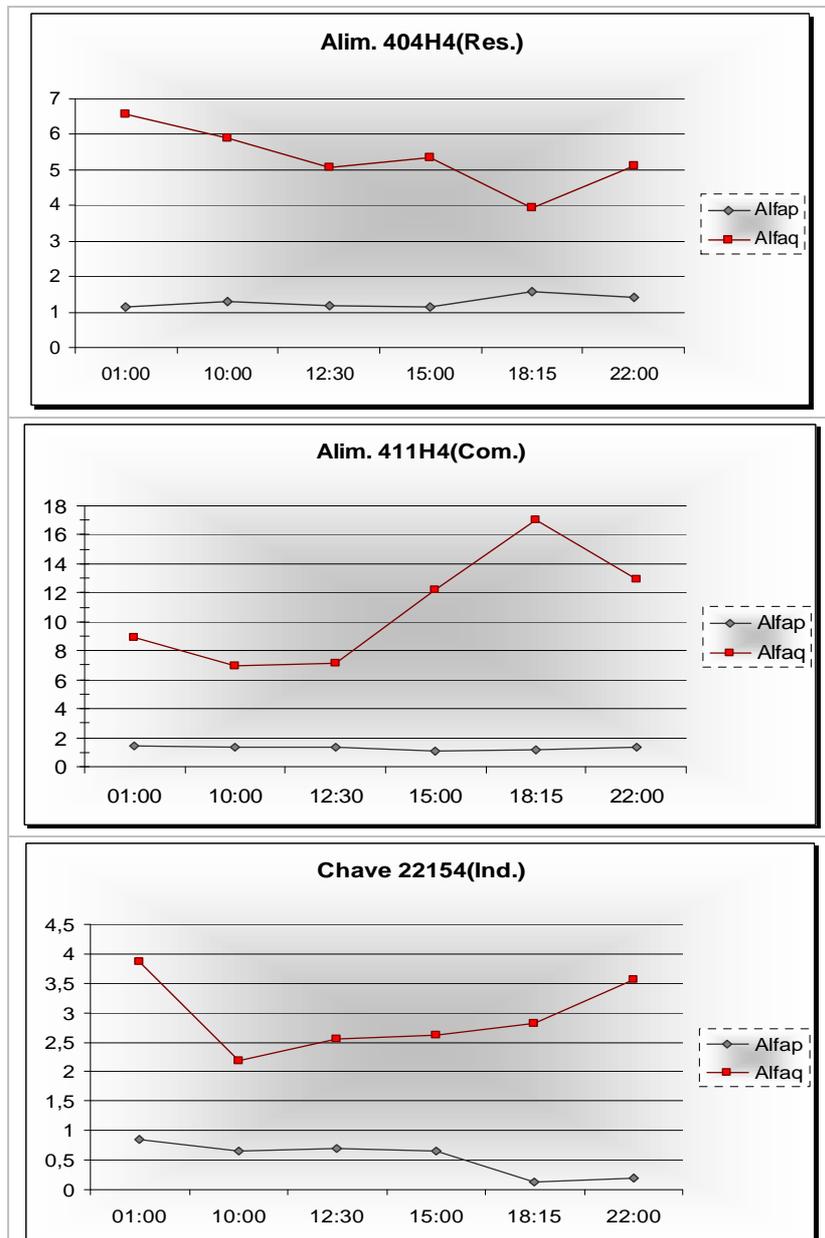


Figura 38 - Média dos parâmetros aos sábados.

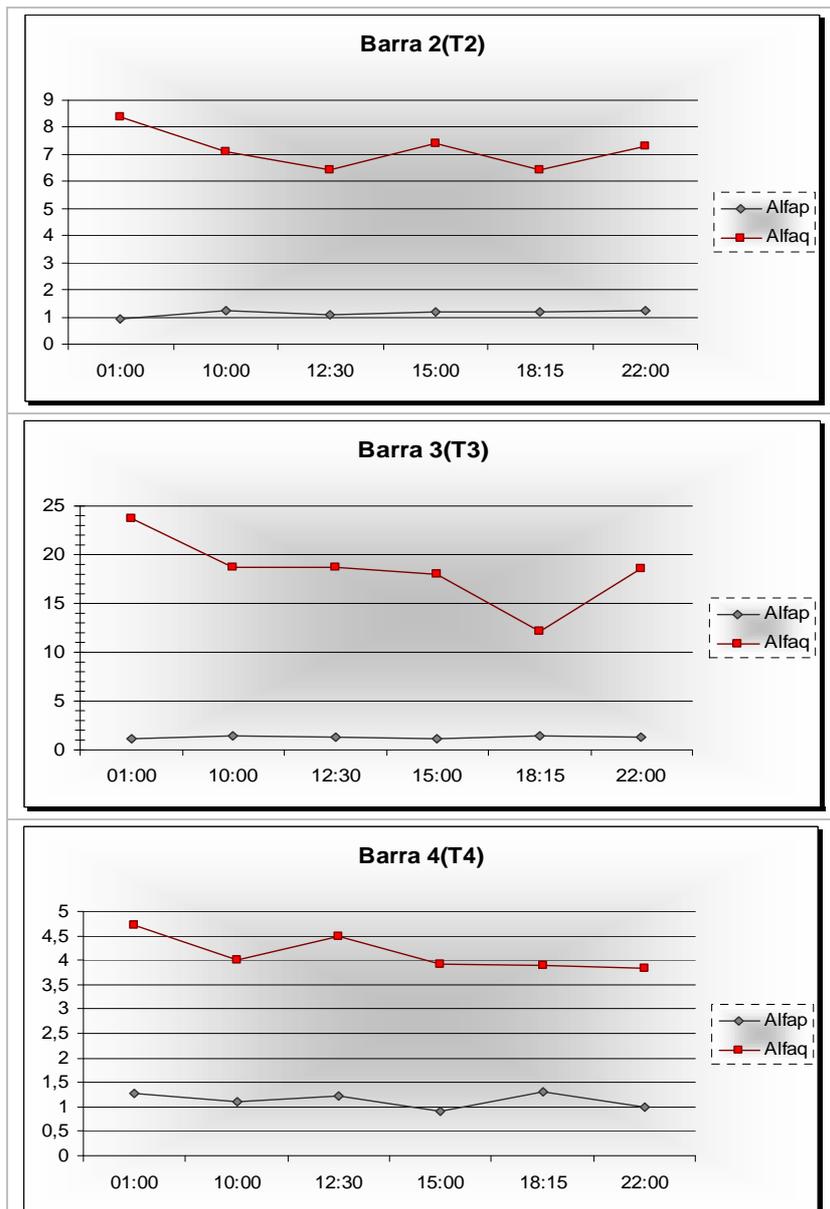
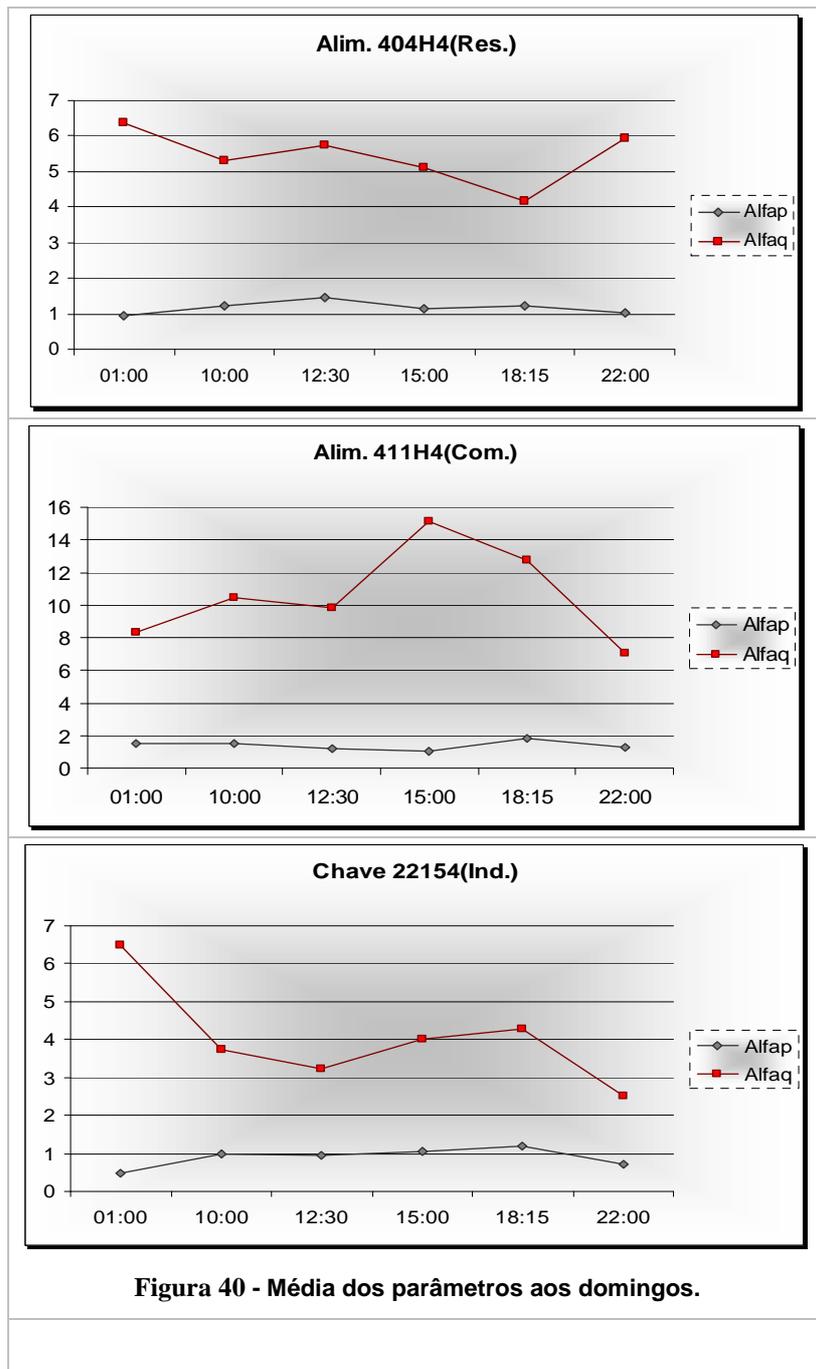


Figura 39 - Média dos parâmetros aos domingos.



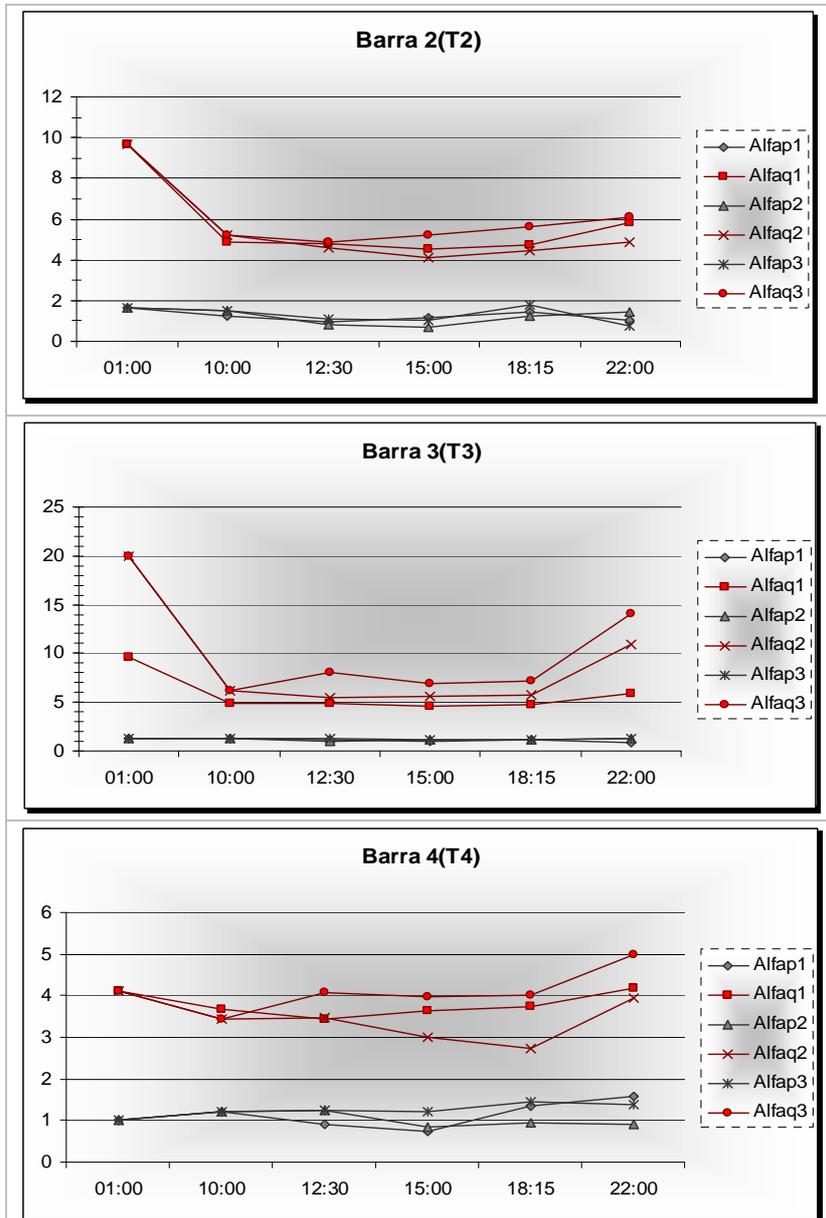


Figura 41 - Comparativo dos parâmetros α_p e α_q obtidos nas sextas

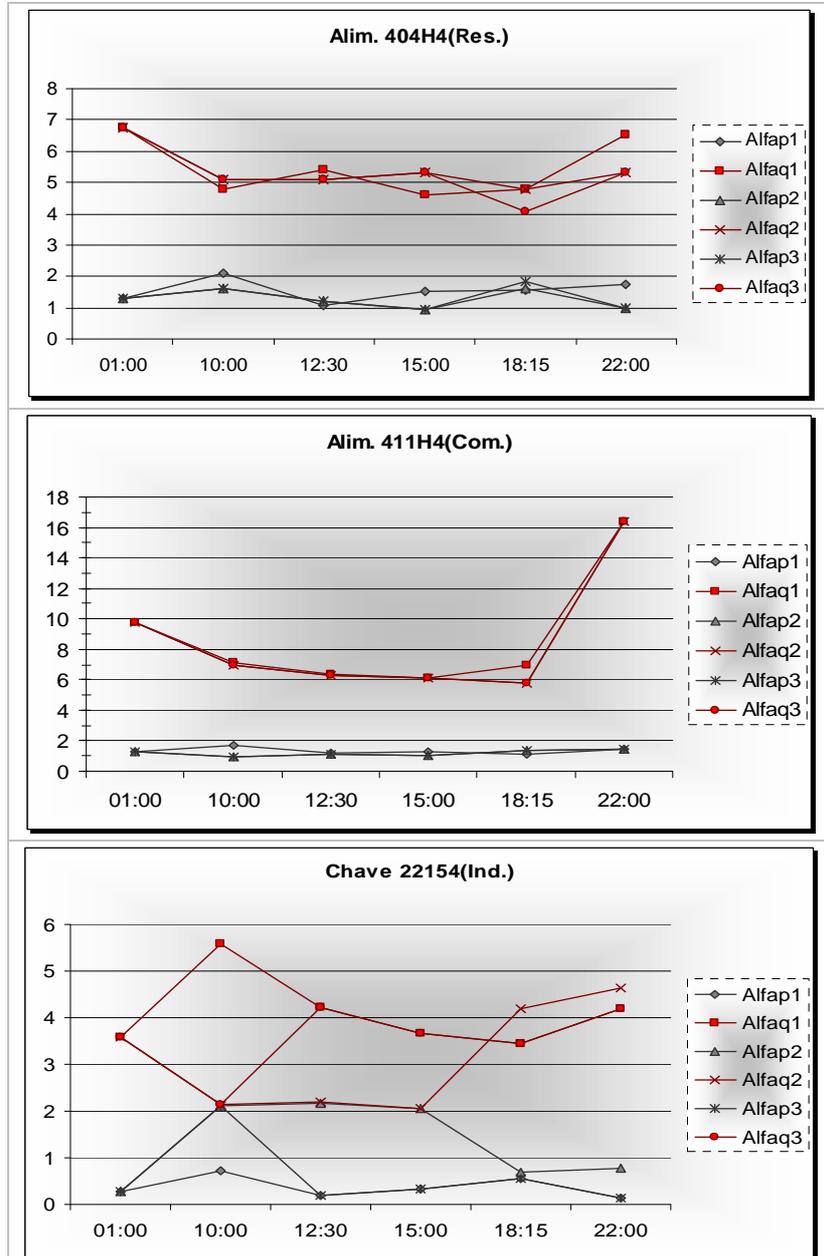


Figura 42 - Comparativo dos parâmetros α_p e α_q obtidos nas sextas.

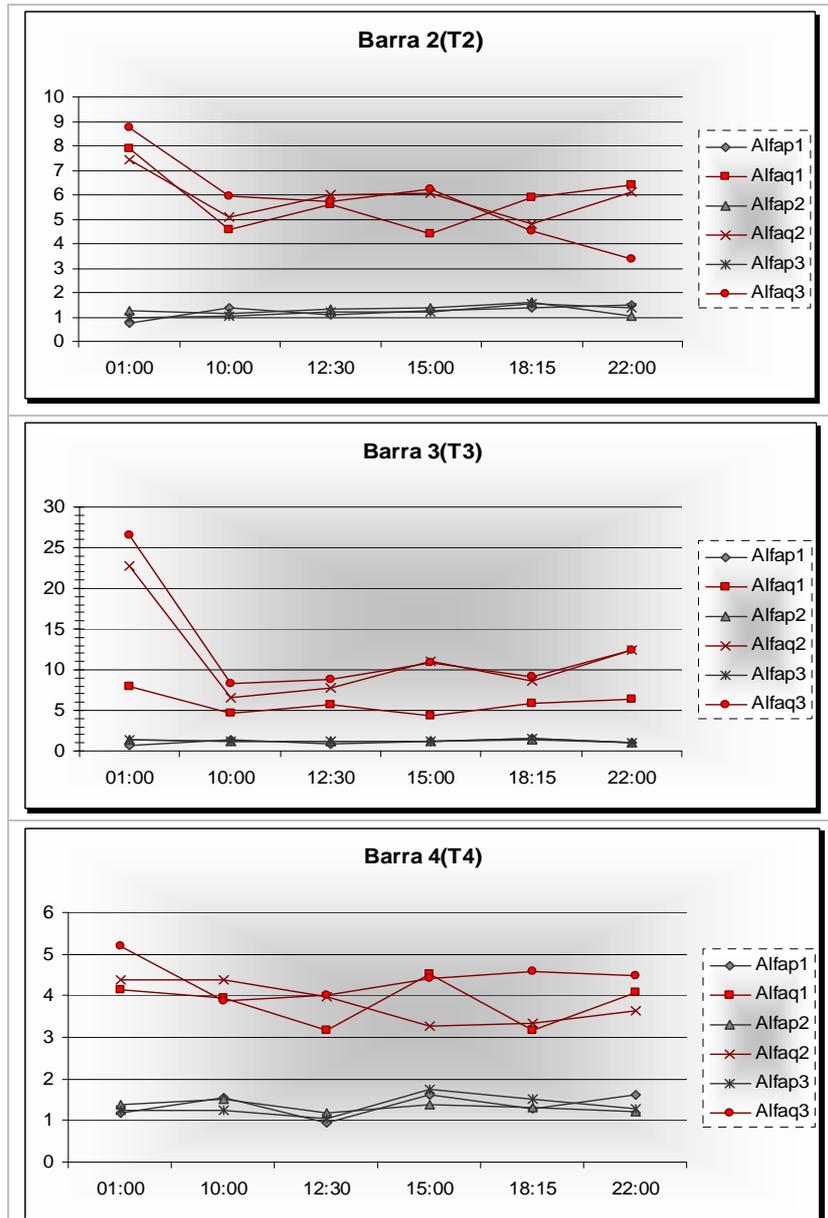


Figura 43 - Comparativo dos parâmetros α_p e α_q obtidos nos sábados.

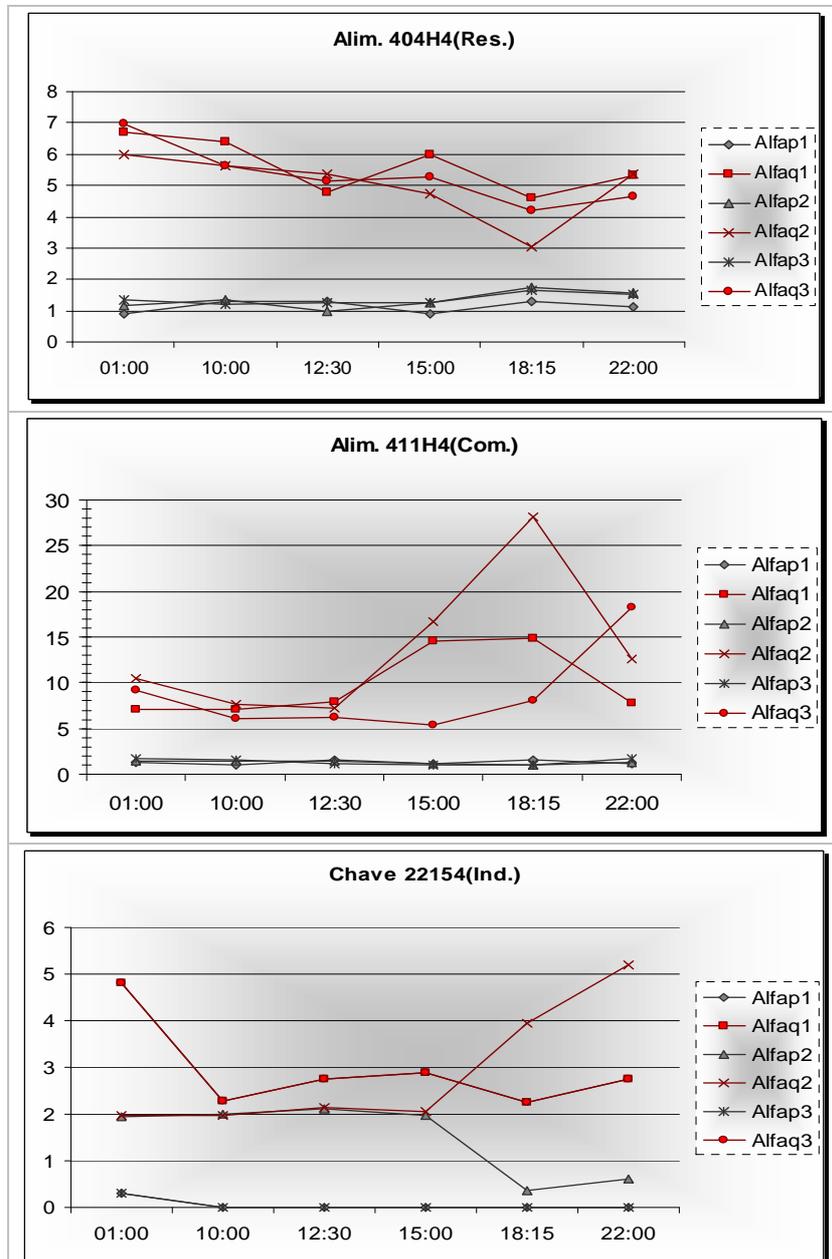
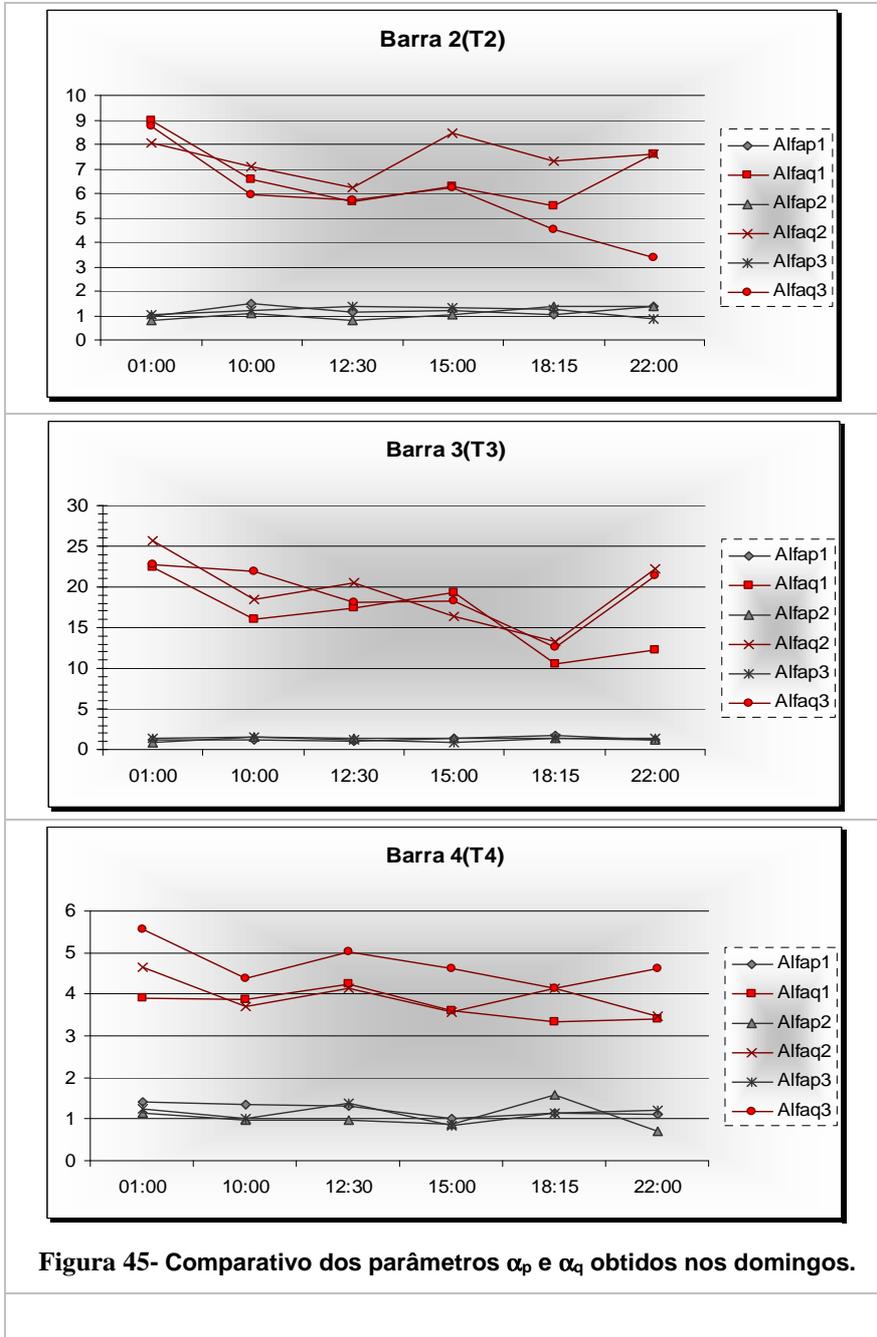


Figura 44- Comparativo dos parâmetros α_p e α_q obtidos nos sábados.



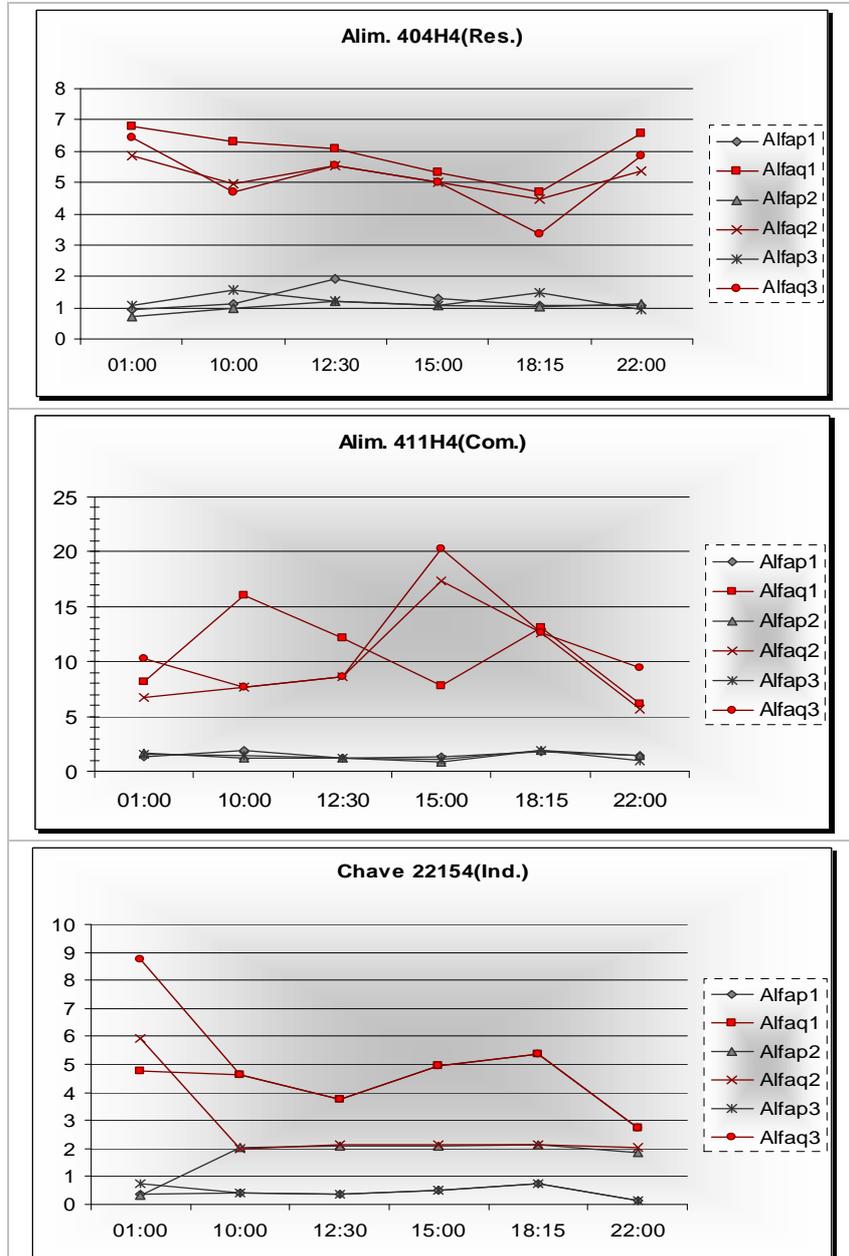


Figura 46- Comparativo dos parâmetros α_p e α_q obtidos nos domingos.

Apêndice B

Níveis de tensão - ANEEL.

A Tabela 17 e a Tabela 18 mostram os níveis de tensão e suas respectivas classificações segundo o órgão regulador - ANEEL.

Tabela 17- Pontos de entrega - tensão nominal igual ou inferior a 1 kV. Tensões padronizadas.

Tensão Nominal (TN)		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)
Ligação	Volts (V)			
Trifásica	(220) / (127)	(201 ≤ TL ≤ 231)/ (116 ≤ TL ≤ 133)	(189 ≤ TL < 201 ou 231 < TL ≤ 233)/ (109 ≤ TL < 116 ou 133 < TL ≤ 140)	(TL < 189 ou TL > 233)/ (TL < 109 ou TL > 140)
	(380) / (220)	(348 ≤ TL ≤ 396)/ (201 ≤ TL ≤ 231)	(327 ≤ TL < 348 ou 396 < TL ≤ 403)/ (189 ≤ TL < 201 ou 231 < TL ≤ 233)	(TL < 327 ou TL > 403)/ (TL < 189 ou TL > 233)
Monofásica	(254) / (127)	(232 ≤ TL ≤ 264)/ (116 ≤ TL ≤ 132)	(220 ≤ TL < 232 ou 264 < TL ≤ 269)/ (109 ≤ TL < 116 ou 132 < TL ≤ 140)	(TL < 220 ou TL > 269)/ (TL < 109 ou TL > 140)
	(440) / (220)	(402 ≤ TL ≤ 458)/ (201 ≤ TL ≤ 229)	(380 ≤ TL < 402 ou 458 < TL ≤ 466)/ (189 ≤ TL < 201 ou 229 < TL ≤ 233)	(TL < 380 ou TL > 466)/ (TL < 189 ou TL > 233)

Tabela 18 - Pontos de entrega - tensão nominal igual ou inferior a 1 kV. Tensões não padronizadas.

Tensão Nominal (TN)		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)
Ligação	Volts (V)			
Trifásica 4 Fios	(208)/(120)	(196 ≤ TL ≤ 229)/ (113 ≤ TL ≤ 132)	(189 ≤ TL < 196 ou 229 < TL ≤ 233)/ (109 ≤ TL < 113 ou 132 < TL ≤ 135)	(TL < 189 ou TL > 233)/ (TL < 109 ou TL > 135)
Monofásica	(230)/(115)	(216 ≤ TL ≤ 241)/ (108 ≤ TL ≤ 127)	(212 ≤ TL < 216 ou 241 < TL ≤ 253) (105 ≤ TL < 108 ou 127 < TL ≤ 129)	(TL < 212 ou TL > 253)/ (TL < 105 ou TL > 129)
	(240)/(120)	(216 ≤ TL ≤ 254)/ (108 ≤ TL ≤ 127)	(212 ≤ TL < 216 ou 254 < TL ≤ 260) (106 ≤ TL < 108 ou 127 < TL ≤ 130)	(TL < 212 ou TL > 260)/ (TL < 106 ou TL > 130)