

TESE

780

21/03/95

**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ**

**Dissertação de Mestrado**

**MODELAGEM DINÂMICA DE CARGAS  
ELÉTRICAS**

***ROBERTO AFFONSO DA COSTA JUNIOR***

**ORIENTADOR: GERMANO LAMBERT TORRES**  
**CO-ORIENTADOR: ALEXANDRE P. ALVES DA SILVA**

**ITAJUBÁ - MG**

**1994**



CLASS. 537.222.621.311.4(043.2)  
CUT. C 837m  
TOMBO. 780

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE CARACAS

Tratado de Matemática

MODELAGEM DINÂMICA DE CARGAS  
ELÁSTICAS

ROBERTO ANTONIO DE COSTA JUNIOR

ORIENTADOR: GERMANO LAMBERT TORRES  
CO-ORIENTADOR: ALEXANDRE Y. ALVES DA SILVA



Caracas - Venezuela  
1994



*Ministério da Educação e do Desporto*  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ  
*Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação*

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 391 de 24/11/94, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração de Sistemas Elétricos de Potência, satisfeitas as demais exigências regimentais, a Roberto Affonso da Costa Júnior.

Itajubá, 25 de Novembro de 1994.

Prof. Lineu Belico dos Reis  
1º Examinador - USP/SP

Prof. Paulo Márcio da Silveira  
2º Examinador - EFEI

Prof. Germano Lambert Torres  
3º Examinador - EFEI (Orientador)



Ministério da Educação e do Desporto  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ  
Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas"

Autor: ROBERTO AFFONSO DA COSTA JÚNIOR

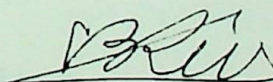
JULGAMENTO

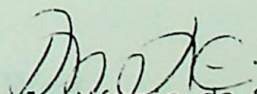
EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	PBR
2º	A	Paulo
3º	A	Jos

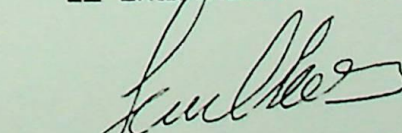
Resultado Médio: Conceito A, ou seja, APROVADO

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 25 de Novembro de 1994.

  
Prof. Lineu Belico dos Reis  
1º Examinador - USP/SP

  
Prof. Paulo Márcio da Silveira  
2º Examinador - EFEI

  
Prof. Germano Lambert Torres  
3º Examinador - EFEI (Orientador)

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, para que sempre se orgulhem de mim, a minha irmã e meu cunhado, pelo apoio necessário e, principalmente, a minha esposa Suelene e minhas filhas Michelle e Katherine, que me acompanharam e entenderam as minhas necessárias ausências, tranquilizando-me, com amor.

"Para os prisioneiros da consciência, cujo número, para nossa vergonha, é grande demais."

Morris West

---

## AGRADECIMENTO

- Aos Professores Germano Lambert Torres, orientador, e Alexandre P. Alves da Silva, co-orientador, pela paciência e atenção no decorrer de toda a dissertação.
- Ao Professor Hector Arango, pela orientação acadêmica durante toda a realização deste trabalho.
- Aos engenheiros da CEMIG, Hélio Moreira Valgas, Roberto del Guidice R. Pinto e Carlos França, que forneceram os dados necessários para o desenvolvimento desta dissertação.
- Aos funcionários da Biblioteca da EFEI, que sempre me atenderam atenciosamente na procura das bibliografias necessárias.
- Às funcionárias da PPG, que me atenderam com desvelo e eficiência.
- À CAPES, pelo auxílio financeiro, sem o qual seria impossível o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

A representação das cargas conectadas em subestações de alta ou baixa tensão é realizada, normalmente, por modelos que não conseguem expressar seu desempenho dinâmico. A utilização de melhores modelos permite cálculos mais precisos, o que pode levar o planejamento da operação a estabelecer controles e limites mais adequados e próximos da realidade.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um pacote computacional para a modelagem estática e dinâmica da carga elétrica através da utilização direta de medidas realizadas no Sistema Elétrico. Estas foram fornecidas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Dois modelos dinâmicos e um estático foram implementados e testados.

Um dos modelos dinâmicos, proveniente da concessionária canadense Hydro-Quebec, tenta modelar o comportamento da carga através de uma realimentação das potências ativa e reativa. Este modelo permite simular cargas com dinâmica de primeira ordem, utilizando uma matriz de covariância.

O outro modelo dinâmico, desenvolvido por uma concessionária australiana, é baseado em uma composição variável da carga tendo uma estrutura também variável.

O modelo estático, de potência-corrente-impedância constantes, foi incluído devido ao fato de que diversos programas, atualmente em uso, não possuem outro tipo de representação.

## ABSTRACT

The behavior of loads (i.e. their active and reactive power consumption) connected to low or high voltage substations is often poorly represented in programs simulating the system dynamics. Accurate dynamic load models allow more precise calculations of power system controls and stability limits, which are critical mainly in the operation planning of power systems.

This work describes the development of a computer program (software) for static and dynamic load model studies using the measurement approach for the CEMIG system. Two dynamic and one classical static load model structures are developed and tested.

The first dynamic model, from Hydro-Quebec, tries to model the behavior of the load using existence of feed-back in power system. This model includes first order dynamics and uses a covariance matrix approach.

The second dynamic model, from an State Electricity Commission of Victoria, Australia is based on a variable composition of a power system load and a consequent variable model structure. This method allows to promote the selection of the load model as well as the estimation of the model parameters.

The static model, using constant impedance-current-power, was included because many programs using by the industries cannot receive another kind of model.

## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
AGRADECIMENTO	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
SUMÁRIO	iv
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b>	
1.1 - OBJETIVO	2
1.2 - AS ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PACOTE COMPUTACIONAL	3
1.3 - SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	10
<b>CAPÍTULO 2 - FORMAS DE MODELAGEM DINÂMICA DA CARGA</b>	
2.1 - A OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	7
2.2 - A HIERARQUIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO	8
2.3 - A MUDANÇA NA ESTRUTURA DOS CENTROS DE OPERAÇÃO	10
2.4 - O PROCESSO DE ESCOLHA DO MODELO A SER UTILIZADO	11
2.5 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	11
2.5.1 - Efeitos da Dependência da Tensão	12
2.5.2 - Efeitos da Dependência da Frequência	14



---

2.6 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DAS CARGAS ELÉTRICAS	14
2.6.1 - A Classificação Baseada na Forma de Agregação do Modelo	15
2.6.2 - A Classificação do Modelo na Finalidade de Uso	18
2.6.3 - A Classificação Baseada na Característica da Carga	20
2.7 - ENSAIOS REALIZADOS NAS CONCESSIONÁRIAS E SEUS RESULTADOS	25
2.8 - CÁLCULO DOS COEFICIENTES DOS MODELOS DINÂMICOS E ESTÁTICOS	26
<b>CAPÍTULO 3 - O PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS</b>	
3.1 - O PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO	28
3.3 - ESCOLHA DOS MODELOS	31
<b>CAPÍTULO 4 - MODELOS SELECIONADOS</b>	
4.1 - MODELOS DE PRÉ-ESTUDO	34
4.1.1 - Modelo Pré-Estudo I	34
4.1.2 - Modelo Pré-Estudo II	35
4.2 - MODELO CANADENSE	35
4.2.1 - Equacionamento do Modelo	36
4.2.2 - Determinação dos Parâmetros do Modelo	37
4.2.3 - Saída do Modelo	40
4.2.4 - Grau de Confiança dos Resultados	41

---

4.3 - MODELO AUSTRALIANO	41
4.3.1 - Método de Seleção da Estrutura do Modelo	42
4.3.2 - Estimativa dos Coeficientes da Regressão	44
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS</b>	
5.1 - INTRODUÇÃO	47
5.2 - MANIPULAÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS	47
5.2.1 - Transformação em Arquivos *.MOD	48
5.2.2 - Criação dos Arquivos *.TRE	51
5.2.3 - Arquivos de Teste	52
5.3 - EXEMPLO ILUSTRATIVO	52
5.3.1 - Preparação dos Dados	52
5.3.2 - Geração dos Modelos	54
5.3.3 - Teste dos Modelos	58
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO</b>	<b>69</b>
<b>CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO I - MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS</b>	
I.1 - AJUSTAMENTO DE CURVAS	90
I.2 - DEFINIÇÃO DO MÉTODO	91
I.2.1 - Relações Não-Lineares	93
I.2.2 - Condições para a Solução do Sistema de Equações	94
I.2.3 - Função-Custo	94
I.2.4 - Séries Temporais	95

---

<b>ANEXO II - COVARIÂNCIA</b>	
II.1 - APRESENTAÇÃO	97
II.2 - MONTAGEM DA MATRIZES DE COVARIÂNCIA	98
<b>ANEXO III - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS</b>	101
<b>ANEXO IV - ARTIGO PUBLICADO NO IV SEPOPE</b>	104
<b>ANEXO V - CURVAS CEMIG</b>	110
<b>ANEXO VI - CURVAS DE TREINAMENTO E TESTE</b>	
VI.1 - ARQUIVOS DE TREINAMENTO	130
VI.2 - ARQUIVOS DE TESTE	143

## CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

**Capítulo 1****INTRODUÇÃO**

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo de carga elétrica para o estudo e análise dos sistemas elétricos, a sua adequação às condições de campo e a validação final dos modelos.

Porém, a prioridade deste trabalho é elaborar um conjunto de regras computacionais formando um pacote que permita modelar uma carga para estudos de operação e planejamento de um Sistema Elétrico.

Inicialmente o problema da Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas no contexto da Operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) será estudado apresentando as dificuldades que são encontradas para construir tal modelo.

De posse de medidas realizadas diretamente no SEP, serão estudados modelos que melhor se adequem a elas, bem como serão introduzidas possíveis melhorias nos mesmos.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 OBJETIVO

Esta dissertação tem a finalidade de desenvolver um pacote computacional para a Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas. As diversas etapas que estão previstas para o desenvolvimento deste trabalho são: o estudo e análise dos modelos matemáticos, a sua adequação às medições de campo e a validação final dos modelos.

Então, a prioridade deste trabalho é elaborar um conjunto de rotinas computacionais formando um pacote que permita modelar uma carga para estudos de operação e planejamento de um Sistema Elétrico.

Inicialmente o problema da Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas no contexto da Operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) será estudado apresentando as dificuldades que são encontradas para construir tal modelo.

De posse de medidas realizadas diretamente no SEP, serão estudados modelos que melhor se adequem a elas, bem como serão introduzidas possíveis melhorias nos mesmos.

O objetivo final do trabalho é fornecer ao setor elétrico uma ferramenta que possibilite representar de maneira mais acurada a carga e seu comportamento dinâmico.

## 1.2 AS ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PACOTE COMPUTACIONAL

Foram previstas quatro etapas principais para o desenvolvimento desta dissertação, que são:

- (a) Pesquisa Bibliográfica e Escolha de Métodos para o Equacionamento do Problema;
- (b) Desenvolvimento do Pacote Computacional com os Métodos Seleccionados;
- (c) Medições de Campo em Consumidores Previamente Escolhidos;
- (d) Consolidação e Validação dos Modelos Matemáticos das Cargas Elétricas.

Na etapa (a) serão levantados e analisados os principais métodos de simulação de cargas elétricas, descritos na literatura, verificando-se a possibilidade de aplicação dos mesmos às cargas elétricas.

Na etapa (b), os esforços serão concentrados visando a desenvolver o programa computacional que permitirá, a partir dos modelos matemáticos das cargas elétricas, seleccionados e implementados, a comparação de simulações em computador com medições reais do comportamento elétrico das cargas dos consumidores.

Na etapa (c), que será basicamente prática, concentrar-se-á em um processo de aquisição de dados (tensão, frequência, potência ativa e reativa), em tempo real, de diversos consumidores em algumas subestações (estes dados serão fornecidos pela Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG).

Na etapa (d), comparando-se as simulações dos modelos matemáticos com as medições de campo, pretende-se fazer com que as respostas obtidas pelas simulações se tornem, tanto quanto possível, próximas das medições executadas, em amplitude e frequência de oscilações.

### 1.3 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode ser resumido sucintamente como sendo um conjunto formado por geração, transformação, transmissão, distribuição e consumo. A operação deste sistema, bem como os ajustes dos diversos equipamentos e controles, é uma tarefa que necessita de amplo conhecimento do desempenho de cada unidade isoladamente e em conjunto. Por isto, muitos trabalhos têm sido realizados com o objetivo de representar os diversos elementos de um SEP de maneira simples e precisa.

Muitos estudos sobre o comportamento da geração (incluindo os geradores e seus controles) do sistema de transmissão e distribuição e das subestações foram realizados, podendo-se atualmente afirmar que são bem conhecidos seus modelos em regime permanente [13,19] e seus comportamentos transitórios [9,28]. Quanto ao conhecimento sobre o consumo, ou em última análise sobre a carga elétrica, muito ainda deve ser realizado, pois esta é a única em todo o conjunto que independe do controle da concessionária.

A representação precisa da carga elétrica é fundamental para a perfeita compreensão do comportamento do SEP, tanto em regime permanente quanto transitório. Entretanto esta modelagem é bastante difícil face ao carácter aleatório da carga, seja em seu valor ou em sua composição.

A carga de uma barra do sistema pode ter sua composição alterada a cada instante (por exemplo, com a entrada/saída de motores) ou simplesmente ter uma mudança no consumo devido a variações da tensão e da frequência. Entretanto, para grandes consumidores (ou para um grande número de pequenos e médios consumidores), a carga possui um comportamento mais ou menos definido, o que possibilita sua modelagem de acordo com alguns parâmetros, como, por exemplo, o carregamento e a hora do dia [26,58].

O objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo sobre o comportamento dinâmico da carga elétrica, visando a estabelecer o tipo de modelo que melhor se adapte a eles. Com isto, serão desenvolvidas algumas rotinas computacionais para que, em conjunto com medidas realizadas no Sistema, possam definir quais os modelos que devem ser utilizados nos programas que analisam esse Sistema, tais como, entre outros: fluxo de potência e estabilidade transitória.

CAPÍTULO 2

FORMAS DE MODELAGEM DINÂMICA DA CARGA

**CAPÍTULO 2**

**FORMAS DE MODELAGEM DINÂMICA DA CARGA**

(a) a qualidade do serviço, em termos de continuidade e de níveis normais de operação;

(b) a redução de seus custos operativos, manipulando as gerações e os sistemas de transmissão para reduzir as perdas e melhorar seu desempenho;

(c) uma operação sólida, minimizando possíveis problemas de segurança pessoal e de sistema.

## CAPÍTULO 2

### FORMAS DE MODELAGEM DINÂMICA DA CARGA

#### 2.1 A OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A principal função de uma concessionária de energia elétrica é fornecer, de maneira rápida e confiável, a demanda requerida por seus consumidores a cada instante. Isto leva a concessionária a adequar constantemente a geração à demanda. Porém, esta adequação deve ser realizada tendo como balizamento alguns pontos importantes:

- (a) a qualidade do serviço, em termos de continuidade e de níveis nominais de operação;
- (b) a redução de seus custos operativos, manipulando as gerações e os sistemas de transmissão para reduzir as perdas e melhorar seu desempenho; e
- (c) uma operação sólida, minimizando possíveis problemas de segurança pessoal e do sistema.

## 2.2 A HIERARQUIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

Com o constante aumento da demanda de energia por parte dos consumidores e da área a ser servida devido a novas ligações, as concessionárias de energia têm expandido seu parque de geração, aumentando o número e o nível de tensão de suas linhas de transmissão, para fazer face a estas solicitações. Com isto, seu sistema elétrico cresce, aumentando a complexidade e os problemas de sua operação. Diante deste quadro, fatos que antes não tinham grande importância em sistemas pequenos começam a se destacar. Esta afirmação está sendo intensificada devido a outros fatores presentes no cotidiano das companhias, como, por exemplo, entre outros: a defasagem das tarifas de energia elétrica, a diminuição de seu quadro técnico com impossibilidade de reposição e a escassez de recursos para investimentos; ou seja, fatores que estão ligados ao momento econômico por que passa nosso país.

Pelos fatos relatados, impõe-se à concessionária o desafio de operar com poucos recursos em sistema que cresce a cada ano. Porém, ela tem conseguido vencer tal desafio e, além disso, estruturar-se para o futuro. Desta maneira, está ocorrendo nas concessionárias uma mudança de sua estruturação de operação para ganhar maior agilidade, reduzir custos e fornecer um melhor serviço aos consumidores. Esta estrutura é baseada em um modelo hierárquico de centros de operação que desempenham funções próprias de seu nível.

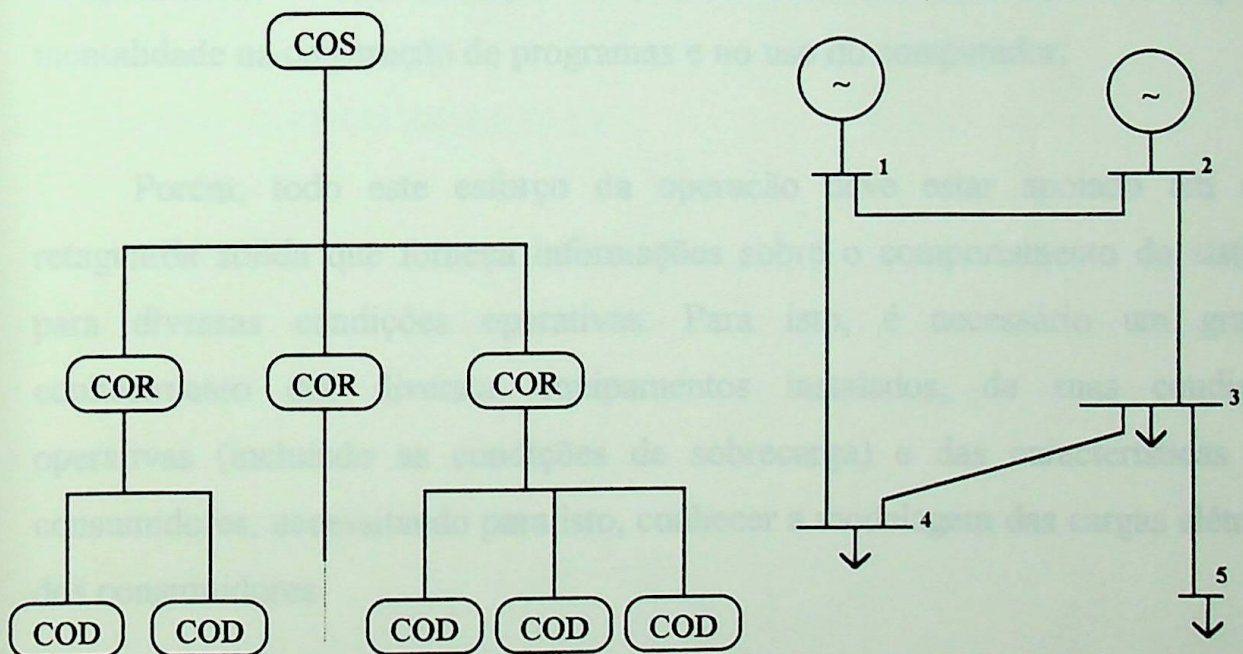
Primeiramente, no topo do modelo de um sistema, encontra-se o Centro de Operação de Sistema (COS), que tem a responsabilidade de coordenar os aspectos gerais da geração e da transmissão da energia elétrica, tomando a decisão sobre em qual área a energia irá ser produzida e qual o tipo de energia

primária que deverá ser utilizada. Ele também tem a função de monitorar as linhas de interligação entre suas áreas e as linhas de intercâmbio entre sistemas.

Sob o COS, estão os Centros de Operação de Área ou Regionais (COA ou COR), os quais desempenham controle das usinas de geração, do sistema de transmissão e das subestações da malha principal.

Sob o COR, estão os Centros de Operação de Distribuição, os quais operam os sistemas de subtransmissão e de distribuição urbana. São eles que têm, em última análise, a responsabilidade de fornecer energia à maioria dos consumidores.

A Figura 1.1 mostra esta estrutura hierárquica.



**FIGURA 1.1** - Estrutura Hierárquica de um Sistema Elétrico e um Sistema Típico Controlado por um

**COR**

Algumas vezes, quando o país ou a região é muito grande, como no Brasil, existem diversas concessionárias, cada uma com seu COS, existindo assim a necessidade de um Centro Nacional de Operação do Sistema (CNOS), que coordenaria a operação segundo uma filosofia abordada.

### 2.3 A MUDANÇA NA ESTRUTURA DOS CENTROS DE OPERAÇÃO

Atualmente, a estrutura dos Centros de Operação tem sofrido uma mudança de concepção no que diz respeito às máquinas utilizadas nestes centros. O poder de cálculo concentrado de que os computadores de grande porte ("mainframes computers") dispõem tem dado lugar à versatilidade e à operabilidade dos microcomputadores, das estações de trabalho e das redes de computadores. A esta evolução deve estar associada toda uma mudança de mentalidade na construção de programas e no uso do computador.

Porém, todo este esforço da operação deve estar apoiado em uma retaguarda sólida que forneça informações sobre o comportamento do sistema para diversas condições operativas. Para isto, é necessário um grande conhecimento dos diversos equipamentos instalados, de suas condições operativas (incluindo as condições de sobrecarga) e das características dos consumidores, necessitando para isto, conhecer a modelagem das cargas elétricas dos consumidores.

## 2.4 O PROCESSO DE ESCOLHA DO MODELO A SER UTILIZADO

Baseando-se nas novas estruturas dos Centros de Operações, onde se obtêm medidas realizadas diretamente no sistema, será abandonada, inicialmente, a representação individual de cada componente. Assim definido, é realizada uma pesquisa bibliográfica para se verificarem as referências que serão consultadas ao longo deste trabalho.

Uma análise apurada de todo este material fornece a linha mestra da solução do problema de Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas. Cabe ressaltar que existem outros artigos e trabalhos na área, mas, por não se coadunarem ao tipo de modelagem assumida, não foram listados; é o caso dos modelos de máquinas elétricas [65, 67, 69].

## 2.5. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A observação do comportamento dinâmico da carga mostra que seu valor (potência ativa e reativa) pode sofrer variações quando existem desvios da tensão e da frequência. Um modelo básico para esta representação é mostrado na equação 2.1.

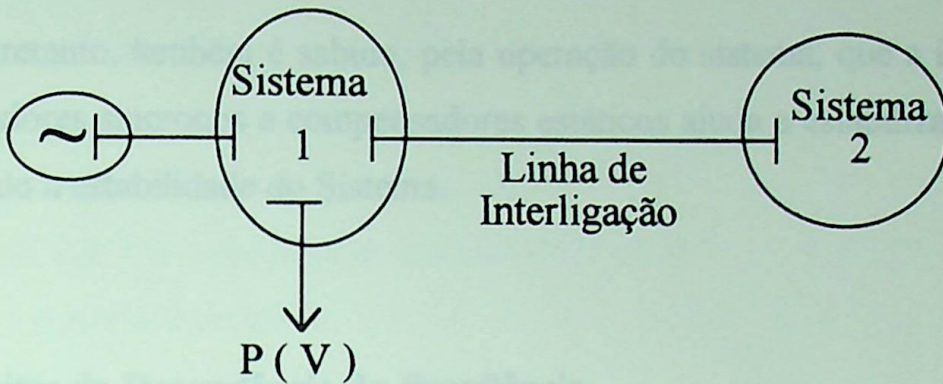
$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \omega} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \omega} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde  $\Delta P$  e  $\Delta Q$  representam as variações das demandas de potência ativa e reativa, respectivamente, em função das variações na tensão e na frequência ( $\Delta V$  e  $\Delta \omega$ ) [15,33,62].

Este modelo assume que as componentes de potência ativa e reativa da carga são funções diferenciáveis da magnitude da tensão e da frequência.

### 2.5.1. Efeitos da Dependência da Tensão

Diferentemente dos outros elementos do SEP, no caso da carga elétrica, não se pode julgar antecipadamente se uma maior ou menor dependência da potência ativa em relação à tensão é benéfica ou maléfica aos controle do sistema [7,11]. A figura 2.1 ilustra o Sistema. Ao diminuir a sensibilidade da carga em relação à tensão no Sistema 1, aumentou-se o limite de potência que poderia ser exportada por este sistema. Entretanto, no caso de se importar potência, este limite é reduzido. Uma breve análise do comportamento das condições de transferência de potência deixa claro este processo [74,77].



**Figura 2.1 - Exemplo da Dependência da Tensão**

Uma outra afirmação que também pode ser retirada do comportamento operativo entre dois sistemas (ou duas áreas) é que os limites de estabilidade muitas vezes diminuem quando a representação da carga muda de impedância constante para potência constante, especialmente quando as cargas estão distantes dos centros de geração [71]. Entretanto, estes limites tendem a aumentar para a mesma mudança de representação, se as cargas estiverem próximas à geração [38,73].

Os modelos de impedância constante e potência constante serão apresentados a seguir.

A dependência da potência reativa em relação à frequência não é facilmente representada, pois os efeitos causados são, em quase toda a sua totalidade, não lineares. Como exemplo disto, podem-se ter as curvas de saturação dos motores e dos transformadores que dependem da tensão e da frequência. Estas devem ser consideradas ao mesmo tempo para uma perfeita representação do fenômeno.

Entretanto, também é sabido, pela operação do sistema, que a inclusão de compensadores síncronos e compensadores estáticos ajuda a estabilizar a tensão, melhorando a estabilidade do Sistema.

### 2.5.2. Efeitos da Dependência da Freqüência

A dependência da freqüência é reconhecida como um importante fator no amortecimento do sistema [20,39,78,79]. Com isto, é intuitivo que, para um melhor desempenho da estabilidade do sistema, a carga deveria ter o seguinte comportamento: (a) a potência ativa deveria diminuir com a diminuição da freqüência, e (b) a potência reativa deveria aumentar com a diminuição da freqüência.

Se observarmos o comportamento de uma carga indutiva poderemos notar que ela opera de maneira diferente da relatada acima. A carga tende a aumentar com a diminuição da freqüência. Este fato ainda é mais comprometido, pois este aumento de carga acarreta um aumento na queda de tensão, o que, geralmente, leva a uma diminuição da potência ativa consumida. Por sorte, existem capacitores no sistema que invertem este desempenho.

## 2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DAS CARGAS ELÉTRICAS

Dentre os diversos tipos de classificação que podem ocorrer no processo de modelagem da carga elétrica, foram selecionados três que melhor se adaptam a este estudo. São eles classificados segundo:

(a) a forma de agregação do modelo:

- baseado em medidas [25,34,42,59,70]
- baseado em componentes individuais [52,55]

(b) a sua finalidade de uso:

- para programas de fluxo de potência [29,30,75,76]
- para programas de estabilidade transitória [10,12,16,51,53,80]
- para programas de curto-circuito [61,89]
- etc...

(c) a característica da carga:

- estática [17,18,72,81]
- dinâmica [32,44,60]

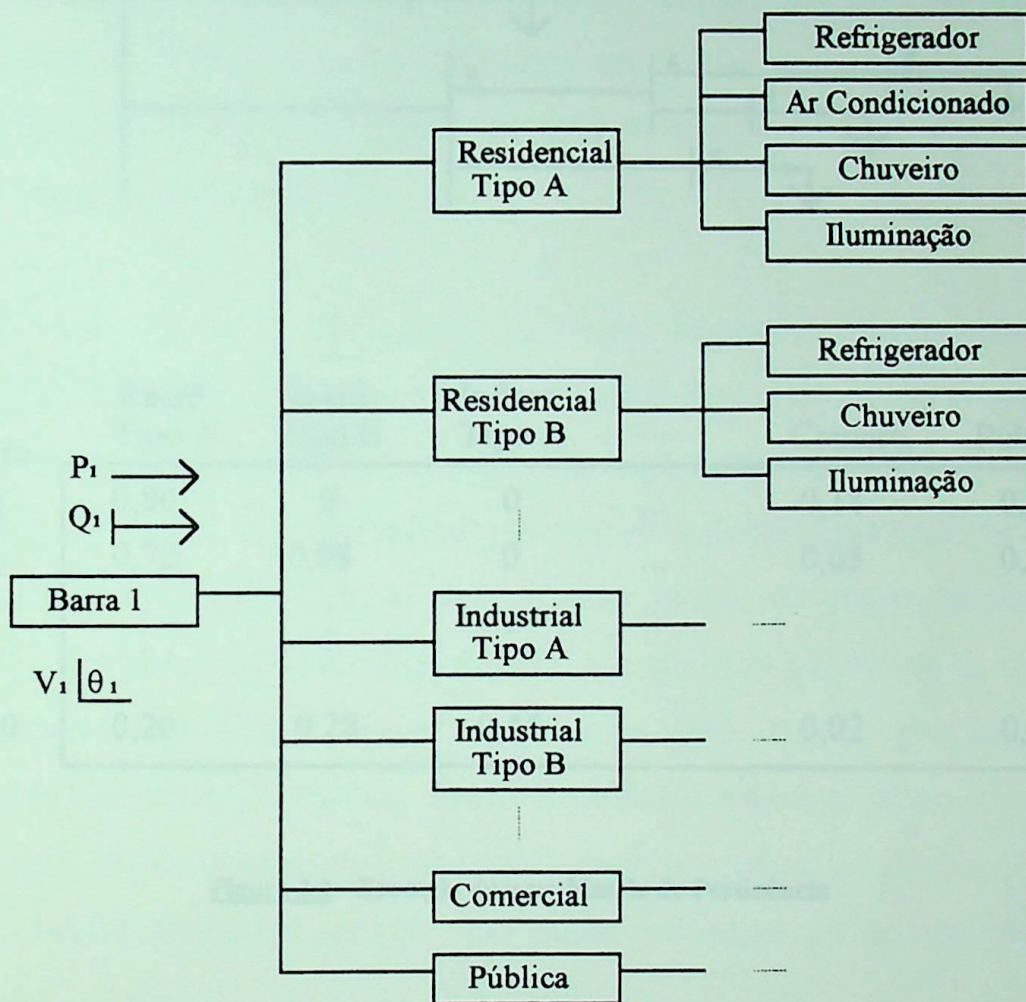
### 2.6.1 A Classificação Baseada na Forma de Agregação do Modelo

De acordo com este tipo de classificação, duas abordagens são possíveis: a modelagem baseada em medidas e a modelagem baseada em componentes individuais.

A primeira abordagem, utilizando medidas realizadas no sistema, envolve a monitoração das cargas para determinar a sensibilidade das suas potências ativas e reativas face às variações da frequência e da tensão. De posse desse conjunto de medidas, pode-se utiliza-lo diretamente através de um processo de otimização ou identificar os parâmetros que melhor definem o modelo [27,37].

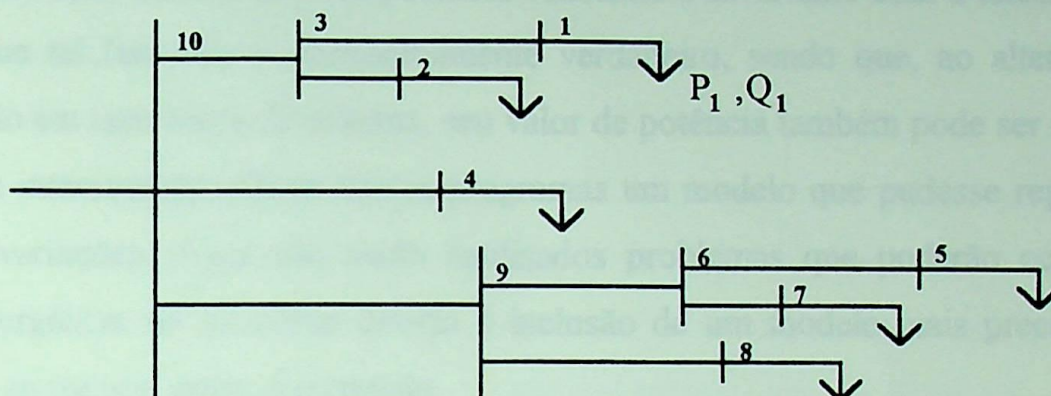
A segunda abordagem, a qual agrega os componentes individuais do sistema, é desenvolvida através da construção, por partes, do modelo. Cada componente é modelado individualmente e participa do modelo total com um certo valor de pertinência. Nesta abordagem, podem-se construir grupos e subgrupos de consumidores típicos [21,45,54,90]. A figura 2.2 apresenta este tipo de abordagem. Uma matriz de valores pode ser construída para melhor armazenar as relações existentes, como mostra a figura 2.3.

A principal vantagem da primeira abordagem sobre a segunda é a monitoração direta da carga, podendo produzir os parâmetros necessários para os modelos que serão utilizados nos programas de estabilidade, fluxo de potência, entre outros. Sua desvantagem é o custo de aquisição do equipamento, bem como monitorá-lo para cada carga, levando-se em consideração aspectos como, entre outros: a hora do dia, o dia da semana e o período do ano.



**Figura 2.2 - Abordagem Baseada em Componentes Individuais**

Diversas podem ser as finalidades para as quais o modelo de carga elétrica pode ser necessário [48-49]. Destaca-se enfoque especial ao uso pelos programas computacionais de planejamento e operação, principalmente, para os casos de fluxo de potência, estabilidade transiente e curto-circuito.



Barra	Resid. Tipo A	Resid. Tipo B	Indust. Tipo A	...	Comerc.	Público
1	0,80	0	0	...	0,18	0,02
2	0,72	0,08	0	...	0,05	0,07
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
10	0,20	0,28	0,45	...	0,02	0,06

**Figura 2.3 - Exemplo de uma Matriz de Pertinência**

### 2.6.2 A Classificação do Modelo na Finalidade de Uso

Diversas podem ser as finalidades para as quais o modelo de carga elétrica pode ser necessário [48,49]. Daremos enfoque especial ao uso pelos programas computacionais de planejamento e operação, principalmente, entre eles, os de fluxo de potência, estabilidade transitória e curto-circuito.

Normalmente, nos programas de fluxo de potência, a carga de uma barra é representada através de uma potência constante e invariante com a tensão. Sabe-se que tal fato não é necessariamente verdadeiro, sendo que, ao alterarmos a tensão em uma barra do sistema, seu valor de potência também pode ser alterado. Seria interessante utilizar nestes programas um modelo que pudesse representar tais variações. Aqui não serão analisados problemas que poderão ocorrer na convergência do processo devido à inclusão de um modelo mais preciso, pois foge ao escopo desta dissertação.

Os programas de estabilidade transitória fornecem informações sobre a capacidade do sistema de manter seu sincronismo diante de um determinado tipo de distúrbio, por exemplo, chaveamentos de equipamentos ou linhas, perdas de carga e curtos-circuitos. Um conjunto de equações diferenciais, que representam a dinâmica do sistema, é utilizado para calcular grandezas que podem afetar a sua estabilidade como, por exemplo, ângulo interno dos geradores e tempo de eliminação de uma falta. Durante um distúrbio pode existir uma flutuação de tensão e da frequência do sistema. Sendo a carga um elemento sensível a este tipo de flutuação, seria conveniente uma melhor representação da mesma, para que os valores obtidos pudessem retratar com maior fidelidade os acontecimentos do sistema.

Em estudos de curto-circuito, as características da carga durante a falta devem assumir maior atenção do que elas têm costumeiramente tido, pois o afundamento das tensões das barras faz com que a carga estudada não seja mais aquela representada por um modelo de potência constante. Sistemas que seriam estáveis utilizando-se um determinado tipo de modelo poderiam não sê-lo para outro tipo de representação.

Por exemplo, é sabido que, em geral, os geradores aceleram menos durante uma falta com cargas locais de potência constante do que com cargas locais de impedância constante.

Outros programas que poderiam utilizar os mesmos modelos seriam, entre outros, o de análise de contingência e o de fluxo de potência ótimo. Atualmente, os programas disponíveis no setor modelam a carga através da combinação de modelos constantes de potência, corrente e impedância, definidos nos próximos itens.

Uma possibilidade alternativa, devido à facilidade de sua incorporação nos programas existentes, é a modelagem de cargas através de um modelo equivalente de motor de indução mais uma carga resistiva pura [6,14,22,23,31,36,41]. Todavia este tipo de modelagem tem-se mostrado eficiente para pequenas perturbações ou excursões ao redor do ponto de operação. Quando de grandes perturbações, os erros tornam sua utilização irreal [66].

### 2.6.3 A Classificação Baseada na Característica da Carga

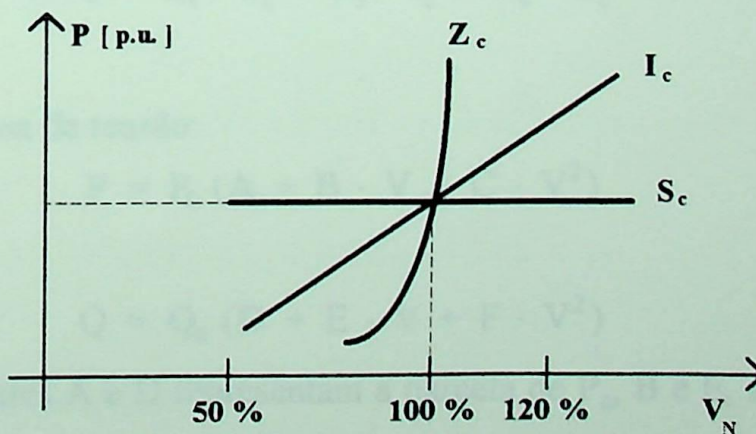
Historicamente, a classificação do modelo da carga elétrica segundo suas características pode ser dividido em dois tipos: modelo estático e modelo dinâmico. O primeiro representa a carga através de elementos não temporais, enquanto no segundo o fator tempo é também uma variável para se obter o valor das potências ativa e reativa [46].

**a. Modelo Estático:**

O modelo estático da carga é aquele que pode representar a carga através de polinômios ou de outro tipo de função algébrica, como uma exponencial. Esta representação é normalmente baseada na tensão e na frequência (ou em seus desvios), sempre observando-se as faixas de variação possíveis a que a carga está sujeita. Normalmente, as variações da frequência são de  $\pm 3$  Hz (5%), enquanto as de tensão devem ser obtidas de 0 a 120 % da tensão nominal.

A faixa de excursão da tensão e da frequência à qual fica submetida a carga durante a operação do sistema depende da natureza do distúrbio. Por exemplo, perdas de carga acarretam altos desvios na frequência e na tensão, enquanto curtos-circuitos acarretam severas quedas de tensão sem grandes oscilações na frequência.

Classicamente, a representação estática da carga é feita através da combinação de três representações individuais, que são: impedância constante ( $Z_c$ ), corrente constante ( $I_c$ ) e potência constante ( $S_c$ ). A figura 2.4 mostra estas três representações em um gráfico Potência Ativa versus Tensão.

**Figura 2.4 - Representações Estáticas da Carga**

Observando a figura 2.4, pode-se afirmar que a representação  $S_c$ , na maioria dos casos, é a mais severa de todas, pois quando existe uma diminuição da tensão, esta carga causa um aumento na corrente, o que ocasiona uma queda de tensão ainda maior, e assim indefinidamente até gerar uma instabilidade. Em contrapartida, a representação  $Z_c$  é estabilizadora (também na maioria dos casos), pois quando existe uma redução na tensão esta carga causa uma diminuição na corrente, diminuindo a queda de tensão, tendendo a retornar aos níveis iniciais [95]. Uma análise idêntica pode ser realizada para o aumento da tensão.

Cada uma das representações ou suas combinações podem modelar a carga para pequenas variações de tensão próximas do ponto de operação; entretanto para grandes variações as proporções utilizadas podem não ser adequadas.

A representação da carga através da combinação linear dos três elementos  $Z_c$ ,  $S_c$  e  $I_c$  pode ser realizada como mostrado nas equações (2.2) e (2.3).

$$P = k_1 \cdot S_c + k_2 \cdot I_c + k_3 \cdot Z_c \quad (2.2)$$

$$Q = k_4 \cdot S_c + k_5 \cdot I_c + k_6 \cdot Z_c \quad (2.3)$$

Ou na forma de tensão:

$$P = P_0 (A + B \cdot V + C \cdot V^2) \quad (2.4)$$

$$Q = Q_0 (D + E \cdot V + F \cdot V^2) \quad (2.5)$$

onde os coeficientes A e D representam a parcela de  $P_c$ , B e E, a parcela de  $I_c$  e C e F a parcela de  $Z_c$  da carga.

De maneira análoga à influência da tensão na representação estática da carga pode-se desenvolver um modelo para a frequência. Porém, na realidade, calcula-se o valor de P e Q, não se utilizando os valores de V e  $\omega$  diretamente, mas os seus desvios do ponto de operação. Com isto utilizam-se as equações gerais (2.6) e (2.7).

$$P = g_1(\Delta V, \Delta\omega) \quad (2.6)$$

$$Q = g_2(\Delta V, \Delta\omega) \quad (2.7)$$

Evidentemente, as equações (2.2) e (2.3) podem ser convertidas em (2.6) e (2.7) e vice-versa.

Diversos estudos foram realizados com cargas individuais para calcular os coeficientes médios de um determinado tipo de equipamento. A seguir são apresentados alguns exemplos [24,43,47]:

#### - Refrigerador:

$$P = 0,798 + 0,606 \cdot V + 1,146 \cdot V^2 + 0,067 \cdot \omega - 0,428 \cdot V\omega$$

$$Q = 0,624 + 1,540 \cdot V + 3,370 \cdot V^2 - 0,143 \cdot \omega - 1,173 \cdot V \cdot \omega$$

#### - Aquecedor elétrico:

$$P = 1,0 + 2,0 \cdot V + 1,0 \cdot V^2$$

$$Q = 0$$

**- Aparelho de ar condicionado:**

$$P = 0,828 + 0,387 \cdot V + 1,623 \cdot V^2 + 0,047 \cdot \omega - 0,380 \cdot V \cdot \omega$$

$$Q = 0,571 + 1,407 \cdot V + 3,220 \cdot V^2 + 6,340 \cdot V^3 + 44,480 \cdot V^4 - 0,143 \cdot \omega - 1,173 \cdot V \cdot \omega$$

**b. Modelo Dinâmico:**

Os modelos dinâmicos são aqueles cuja resposta à variação da tensão e freqüência depende do tempo [56,91,93]. Os motores (que, em geral, constituem a grande carga das indústrias) são os exemplos típicos de carga que necessitam de uma representação dinâmica [57,94].

Diversas formas de solução do problema de modelagem têm sido propostas. Normalmente, elas se baseiam em um conjunto de equações diferenciais, onde suas constantes deverão ser calculadas por um processo de identificação qualquer. Este tipo de procedimento é bastante interessante em estudos de estabilidade, pois facilitam a sua incorporação ao programa. Estas equações têm, em geral, a forma a seguir:

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \quad (2.8)$$

$$y = C \cdot x + D \cdot u \quad (2.9)$$

onde  $x$  é o vetor de estado,  $u$  o vetor de entrada e  $y$  o de saída. Nesta representação, o vetor de estado  $x$  é de segunda ordem, pois esta é a menor ordem capaz de representar as equações dinâmicas de balanço de um motor de indução. Diversas grandezas podem fazer parte do vetor  $u$  como, por exemplo: o módulo da tensão, o ângulo da tensão, a frequência ou, ainda, as variações dessas grandezas. Por sua vez, o vetor  $y$  deve conter as componentes das potências ativa e reativa ou as suas variações.

## 2.7 ENSAIOS REALIZADOS NAS CONCESSIONÁRIAS E SEUS RESULTADOS

Algumas concessionárias de energia têm apresentado resultados da utilização dos modelos descritos acima [35,40,50,63,64,68,85]. A comparação dos modelos simples em relação aos mais detalhados usando dados provenientes do sistema tem sido feita para pequenos e grandes distúrbios. Isto tem levado à verificação de alguns fatos importantes com as seguintes excursões de tensão e de frequência em certos tipos de indústrias, como as que utilizam fornos a arco ou as químicas [84].

Outro tipo de carga importante são os motores de indução e outras cargas saturáveis, que tem a flutuação de tensão e, principalmente, da frequência, e têm seu comportamento bastante alterado.

## 2.8 CÁLCULO DOS COEFICIENTES DOS MODELOS DINÂMICOS E ESTÁTICOS

Para calcular os coeficientes e parâmetros dos modelos, há uma necessidade de monitorar a carga elétrica no barramento considerado importante, observando o seu comportamento (conforme visto no item 2.3.1) [8,82,83,84].

Após feita esta monitoração pode-se realizar um tratamento dos dados aquisitados, utilizando vários processos para determinar os parâmetros dos modelos dinâmicos e estáticos, sendo alguns destes processos apresentados no capítulo a seguir.

Também alguns grupos de trabalho têm desenvolvido estudos sobre este assunto, que foram relatados em algumas publicações do IEEE [87,96,97,98] e da CIGRÉ [86,92].



## CAPÍTULO 3

## O PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

**CAPÍTULO 3****O PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS**

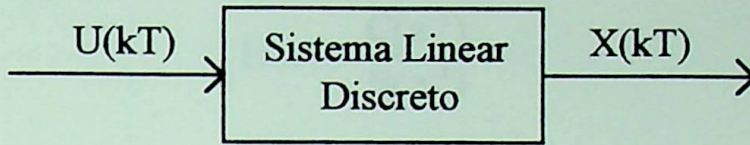
## CAPÍTULO 3

### O PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

#### 3.1. O PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO

Existem dois grupos de métodos de identificação de sistemas (não mutuamente exclusivos). O primeiro é constituído pelos métodos paramétricos, onde a partir de uma estrutura pré-especificada para o modelo, o método é responsável pela estimativa dos parâmetros do modelo. Os métodos não-paramétricos caracterizam o segundo grupo. Estes métodos estimam não somente os parâmetros do modelo mas também a sua estrutura. Os métodos não-paramétricos geralmente requerem um esforço computacional bem superior ao exigido pelos paramétricos. Existem ainda métodos que se situam entre os dois grupos descritos, tal como o apresentado na referência [05].

Embora as cargas representem sistemas contínuos, é mais prático e conveniente aproximar o comportamento dinâmico das mesmas por modelos discretos. Isto deve-se ao fato de que nas equações as diferenças são algébricas por natureza, logo, mais fáceis de manipular e identificar do que equações diferenciais.



**Figura 3.1 - Sistema Discreto**

Considere-se um sistema linear discreto estacionário (isto é, cujas características estatísticas não variam no tempo) como mostrado na Figura 3.1.  $U(kT)$  e  $X(kT)$  são exemplares dos sinais de entrada e saída do sistema, respectivamente, e  $T$  é o intervalo de amostragem. Assumindo que o sistema possa ser descrito por uma equação, na qual as diferenças de enésima ordem (uma variável) possuem coeficientes constantes, tem-se:

$$\begin{aligned} x(k) + b_1 \cdot x(k-1) + b_2 \cdot x(k-2) + \dots + b_n \cdot x(k-n) = \\ = c_0 \cdot u(k) + c_1 \cdot u(k-1) + \dots + c_n \cdot u(k-n) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Na equação (3.1),  $T$  foi retirado de  $U(kT)$  e  $X(kT)$  para simplificar a notação. A equação (3.1) pode ser reescrita utilizando-se o seguinte operador-deslocamento:

$$B(q^{-1}) \cdot x(k) = C(q^{-1}) \cdot u(k) \quad (3.2)$$

onde:

$$\begin{aligned} B(q^{-1}) &= 1 + b_1 \cdot q^{-1} + b_2 \cdot q^{-2} + \dots + b_n \cdot q^{-n} \\ C(q^{-1}) &= c_0 + c_1 \cdot q^{-1} + c_2 \cdot q^{-2} + \dots + c_n \cdot q^{-n} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Este sistema tem uma função de transferência  $H(z)$  definida por:

$$H(z) = \frac{C(z^{-1})}{B(z^{-1})} \quad (3.4)$$

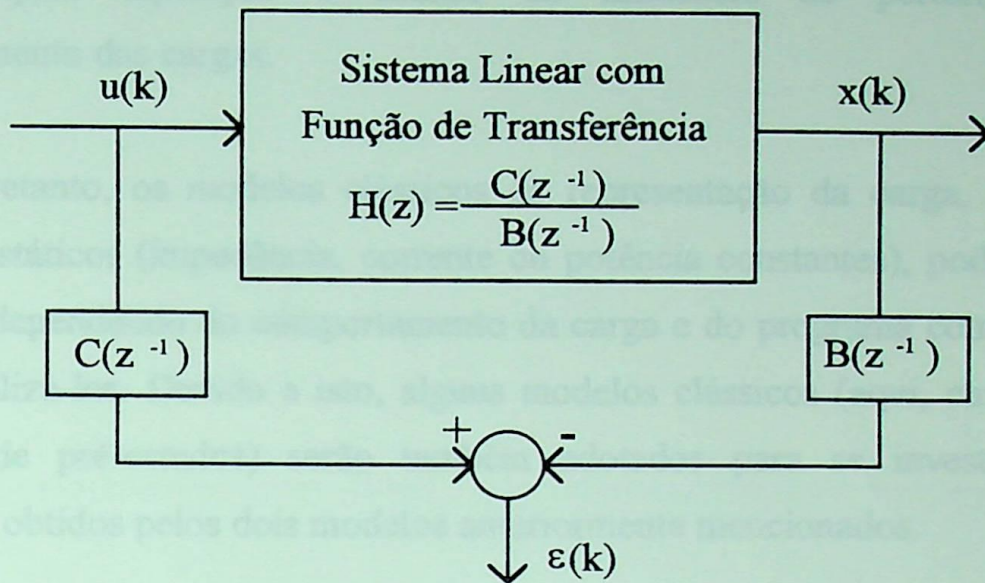
A partir da equação (3.1), o problema de identificação de sistemas pode ser descrito da seguinte forma:

*"Assumindo que o sistema representado pela equação (3.1) é estável, de ordem  $n$ , e estacionário; dadas  $n$  medidas de entrada/saída  $\{u(k), x(k)\}$ ,  $k = 1, \dots, N$ , estime os parâmetros constantes ( $b_i$  e  $c_i$ ) do sistema."*

O problema acima pode ser resolvido pelo ajuste da equação do sistema aos dados de entrada/saída, de forma a escolher os melhores valores dos parâmetros com o critério de erro quadrático mínimo. Para isto, escreve-se a equação do sistema como:

$$B(q^{-1}) \cdot x(k) = C(q^{-1}) \cdot u(k) + \varepsilon(k) \quad (3.5)$$

onde  $x(k)$  e  $u(k)$  são medidas, e o termo  $\varepsilon(k)$  representa o erro do ajuste. Na teoria de regressão linear,  $\varepsilon(k)$  é denominado resíduo. Este erro é representado esquematicamente na figura 3.2.



**Figura 3.2** - Diagrama de Blocos Representando o Sinal de Erro  $\varepsilon(k)$

### 3.2 ESCOLHA DOS MODELOS

Foram escolhidos inicialmente dois métodos para a estimação em tempo-real do modelo dinâmico de carga, utilizando-se a abordagem baseada em medidas realizadas em uma determinada barra do sistema. Estes modelos foram apresentados à comunidade internacional através de artigos técnicos e encontram-se em operação nas concessionárias Hydro-Quebec (Canadá) [01-04] e State Electricity Commission of Victoria (Austrália) [05].

A escolha específica desses dois modelos deve-se ao fato de que eles incorporam algumas propriedades interessantes para a modelagem da carga (tais como, entre outras, flexibilidade e robustez), além de poderem ser implementados em tempo-real. Com isto, a coleta de grandes quantidades de dados, para posterior análise "off-line", pode ser evitada utilizando-se um microcomputador

---

dedicado para aquisição e análise da influência de perturbações no comportamento das cargas.

Entretanto, os modelos clássicos de representação da carga, através de modelos estáticos (impedância, corrente ou potência constantes), poderão ainda ser úteis, dependendo do comportamento da carga e do programa computacional que irá utilizá-los. Devido a isto, alguns modelos clássicos (aqui, chamados de modelos de pré-estudos) serão também adotados para se investigarem os resultados obtidos pelos dois modelos anteriormente mencionados.

## MODELOS DE PRÉ-ESTUDOS

## CAPÍTULO 4

## MODELOS SELECIONADOS

## 1.1. MODELOS DE PRÉ-ESTUDO

## CAPÍTULO 4

## MODELOS SELECIONADOS

Este capítulo apresenta os modelos selecionados para a análise de pré-estudo. A seguir, são apresentados os modelos selecionados.

## 1.1. Modelo de Pré-Estudo 1

O primeiro modelo de pré-estudo tem a finalidade de representar a carga através de suas parcelas de potência constante ( $S_p$ ), corrente constante ( $I$ ) e impedância constante ( $Z_c$ ). As equações (4.1) e (4.2) representam estes modelos.

$$SP = P_0(a + b \cdot \Delta V + c \cdot \Delta V^2) \quad (4.1)$$

$$IQ = Q_0(d + e \cdot \Delta V + f \cdot \Delta V^2) \quad (4.2)$$

onde os coeficientes  $a$  e  $d$ ,  $b$  e  $e$ ,  $c$  e  $f$  representam as variações de  $S_p$ ,  $I$  e  $Z_c$  na carga modelada, respectivamente.

## CAPÍTULO 4

### MODELOS SELECIONADOS

#### 4.1. MODELOS DE PRÉ-ESTUDO

Foram selecionados dois modelos de pré-estudo que podem ser utilizados diretamente nos programas disponíveis no setor. Tais modelos foram escolhidos por serem baseados em estruturas simples e pré-definidas. A seguir, são apresentados os modelos selecionados.

##### 4.1.1 Modelo de Pré-Estudo I

O primeiro modelo de pré-estudo tem a finalidade de representar a carga através de suas parcelas de potência constante ( $S_c$ ), corrente constante ( $I_c$ ) e impedância constante ( $Z_c$ ). As equações (4.1) e (4.2) representam estes modelos.

$$\Delta P = P_0(a + b \cdot \Delta V + c \cdot \Delta V^2) \quad (4.1)$$

$$\Delta Q = Q_0(d + e \cdot \Delta V + f \cdot \Delta V^2) \quad (4.2)$$

onde os coeficientes **a** e **d**, **b** e **e**, **c** e **f** representam as participações de  $S_c$ ,  $I_c$  e  $Z_c$  na carga modelada, respectivamente.

### 4.1.2 Modelo de Pré-Estudo II

O segundo modelo de pré-estudo tenta ajustar o comportamento da carga através de uma curva de ordem variável como expresso nas equações (4.3) e (4.4).

$$P = k_p \cdot V^{n_p} \cdot f^{n_f} \quad (4.3)$$

$$Q = k_q \cdot V^{n_q} \cdot f^{n_g} \quad (4.4)$$

onde os valores  $n_p$ ,  $n_f$ ,  $n_q$  e  $n_g$  definem a ordem do modelo e as constantes  $k_p$  e  $k_q$  são os coeficientes das equações.

## 4.2 MODELO CANADENSE [1-4]

A Modelagem Dinâmica da Carga Elétrica, em face da sua natureza aleatória e da dependência de outras variáveis do sistema, quase sempre envolve algoritmos bastante complexos para a sua representação.

Entre os modelos já referenciados, o modelo proposto e adotado pela Hydro-Quebec (HQ) [1] reveste-se de um grande interesse, pela existência de uma realimentação permanente, durante o processo de obtenção dos parâmetros do modelo, entre as potências ativa e reativa (pelo lado da carga), e a tensão e frequência (pelo lado da geração), e vice-versa.

Entre os principais atrativos do modelo, pode-se listar:

- sua simplicidade (são necessários 16 parâmetros para representar a carga).

- . dependendo das facilidades computacionais disponíveis, o algoritmo para obter o modelo pode ser utilizado "on-line".
- . não é necessário contabilizar, de forma explícita, os componentes da carga. Tal fato representa a grande flexibilidade do modelo.
- . o modelo apresenta resultados bastante satisfatórios para pequenas variações da carga. Admitem-se variações da tensão da ordem de 10%.
- . não há necessidade de se provocarem distúrbios no sistema para a obtenção dos parâmetros do modelo.
- . apesar da relativa simplicidade do modelo, o mesmo é bastante robusto sob o ponto de vista numérico.

Assim sendo, nas seções seguintes será apresentada a formulação do modelo e a obtenção dos seus parâmetros.

#### 4.2.1 Equacionamento do Modelo

O Modelo (HQ), em face do elevado número de dados aquisitados ao sistema, permite adotar um comportamento linear para representar a carga. Assim sendo, um modelo auto-regressivo de primeira ordem pode ser adotado para representar tal comportamento, conforme a expressão:

$$\underline{x}(t) = \underline{A} \cdot \underline{x}(t-1) + \underline{\omega}(t) \quad (4.5)$$

onde:

$$\underline{x}(t) = \left[ \frac{\Delta P}{P}(t), \frac{\Delta Q}{Q}(t), \frac{\Delta V}{V}(t), \frac{\Delta F}{F}(t) \right] \quad (4.6)$$

$$\underline{x}(t-1) = \left[ \frac{\Delta P}{P}(t-1), \frac{\Delta Q}{Q}(t-1), \frac{\Delta V}{V}(t-1), \frac{\Delta F}{F}(t-1) \right] \quad (4.7)$$

$$\underline{\omega}(t) = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4] \quad (4.8)$$

A equação (4.5), sob a forma expandida, resulta:

$$\frac{\Delta P}{P}(t) = b_1 \frac{\Delta P}{P}(t-1) + a_{12} \frac{\Delta Q}{Q}(t) + a_{13} \frac{\Delta V}{V}(t) + a_{14} \frac{\Delta F}{F}(t) \quad (4.9)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q}(t) = a_{21} \frac{\Delta P}{P}(t) + b_2 \frac{\Delta Q}{Q}(t-1) + a_{23} \frac{\Delta V}{V}(t) + a_{24} \frac{\Delta F}{F}(t) \quad (4.10)$$

$$\frac{\Delta V}{V}(t) = a_{31} \frac{\Delta P}{P}(t) + a_{32} \frac{\Delta Q}{Q}(t) + b_3 \frac{\Delta V}{V}(t-1) + a_{34} \frac{\Delta F}{F}(t) \quad (4.11)$$

$$\frac{\Delta F}{F}(t) = a_{41} \frac{\Delta P}{P}(t) + a_{42} \frac{\Delta Q}{Q}(t) + a_{43} \frac{\Delta V}{V}(t) + b_4 \frac{\Delta F}{F}(t-1) \quad (4.12)$$

onde (t) e (t-1) referem-se a dois instantes sucessivos de tempo.

#### 4.2.2 Determinação dos Parâmetros do Modelo

Considerando:  $x_1 = \frac{\Delta P}{P}$ ;  $x_2 = \frac{\Delta Q}{Q}$ ;  $x_3 = \frac{\Delta V}{V}$ ;  $x_4 = \frac{\Delta F}{F}$ , o sistema de equações (4.9-4.12) fica escrito da seguinte forma resumida:

$$x_i(t) = b_i \cdot x_i(t-1) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 a_{ij} \cdot x_j(t) + \omega_i \quad (4.13)$$

e sendo:  $a_{ii} = -1$  para  $i = 1, 2, 3, 4$ .

Trabalhando a expressão (4.13), chega-se a:

$$\sum_{j=1}^4 a_{ij} \cdot x_j(t) = b_i \cdot x_i(t-1) - \omega_i \quad (4.14)$$

onde matricialmente tem-se:

$$\begin{bmatrix} -1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & -1 & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & -1 & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t-1) \\ x_2(t-1) \\ x_3(t-1) \\ x_4(t-1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

ou:

$$\underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{x}}(t) = -\underline{\underline{B}} \cdot \underline{\underline{x}}(t-1) - \underline{\underline{\omega}} \quad (4.16)$$

Sendo:  $\underline{\underline{B}}$  uma matriz diagonal com  $b_i$  elementos.

Dividindo a equação (4.16) por  $\underline{\underline{A}}^{-1}$  e multiplicando por  $\sum \underline{\underline{x}}^t(t-1)$ , vem:

$$\sum \underline{\underline{x}}(t) \cdot \underline{\underline{x}}^t(t-1) = -\underline{\underline{A}}^{-1} \cdot \underline{\underline{B}} \cdot \sum \underline{\underline{x}}^{-1}(t) \cdot \underline{\underline{x}}^t(t-1) - \underline{\underline{A}}^{-1} \cdot \sum \underline{\underline{\omega}}(t) \cdot \underline{\underline{x}}^t(t-1) \quad (4.17)$$

como:  $\underline{\underline{\omega}}$  e  $\underline{\underline{x}}^t(t-1)$  são estaticamente independentes, logo:

$$\underline{\underline{\omega}} \cdot \underline{\underline{x}}^t(t-1) = 0.$$

E denominando:

$$\underline{\underline{F}} = \sum \underline{\underline{x}}(t) \cdot \underline{\underline{x}}^t(t-1) = \text{Cov}(\underline{\underline{x}}(t), \underline{\underline{x}}^t(t-1)) \quad (4.18)$$

$$\underline{\underline{G}} = \sum \underline{\underline{x}}(t-1) \cdot \underline{\underline{x}}^t(t-1) = \text{Cov}(\underline{\underline{x}}(t-1), \underline{\underline{x}}^t(t-1)) \quad (4.19)$$

onde  $\underline{\underline{F}}$  e  $\underline{\underline{G}}$  são duas matrizes de covariância (Anexo II).

Então a equação (4.16) fica:

$$\underline{\underline{F}} = -\underline{\underline{A}}^{-1} \cdot \underline{\underline{B}} \cdot \underline{\underline{G}} + \underline{\underline{0}} \quad (4.20)$$

e reescrevendo, vem:

$$\underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{B}}^{-1} = -\underline{\underline{F}}^{-1} \cdot \underline{\underline{G}} \quad (4.21)$$

por definição:

$$\underline{\underline{H}} = \underline{\underline{F}}^{-1} \cdot \underline{\underline{G}} \quad (4.22)$$

então tem-se:

$$\underline{\underline{H}} = -\underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{B}}^{-1} \quad (4.23)$$

Das expressões anteriores é possível estabelecer as seguintes igualdades:

$$b_i = -\frac{1}{h_{ii}} \quad \therefore \quad a_{ij} = -\frac{h_{ij}}{h_{ii}} \quad (4.24)$$

para:  $i = 1, \dots, 4$

$j = 1, \dots, 4$

onde os elementos  $h_{ij}$  e  $h_{ii}$  constituem a matriz  $\underline{H}$ .

### 4.2.3 Saída do Modelo

Após montadas as matrizes A e B dos parâmetros, utilizam-se as equações 4.9 e 4.10 para se obterem os valores de  $\frac{\Delta P}{P}$  e  $\frac{\Delta Q}{Q}$ . Contudo pela expressão há uma dependência entre as potências do mesmo instante; trabalhando-se ambas as equações, tem-se:

$$\frac{\Delta P}{P}(t) = \frac{b_1 \frac{\Delta P}{P}(t-1) + (a_{13} + a_{23}) \frac{\Delta V}{V}(t) + (a_{14} + a_{24}) \frac{\Delta F}{F}(t) + b_2 \frac{\Delta Q}{Q}(t-1)}{1 - a_{21}} \quad (4.25)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q}(t) = \frac{b_2 \frac{\Delta Q}{Q}(t-1) + (a_{13} + a_{23}) \frac{\Delta V}{V}(t) + (a_{14} + a_{24}) \frac{\Delta F}{F}(t) + b_1 \frac{\Delta P}{P}(t-1)}{1 - a_{12}} \quad (4.26)$$

Com isso, tem-se uma relação das potências ativa e reativa com a tensão e frequência e potências ativa e reativa do instante anterior.



#### 4.2.4 Grau de Confiança dos Resultados

A precisão dos resultados depende da precisão das variáveis aquiritadas bem como do tipo de cálculo. Todo o processo de obtenção dos parâmetros do modelo de carga, a partir de amostras dos valores instantâneos da tensão e da corrente, pode ser subdividido em três etapas:

- 1º) Conversão dos valores instantâneos de tensão e corrente aquiritados em desvios das potências ativas e reativas ( $\Delta P$  e  $\Delta Q$ ), tensão ( $\Delta V$ ) e freqüência ( $\Delta F$ );
- 2º) Cálculo das matrizes de covariância e dos parâmetros do modelo.

#### 4.3 MODELO AUSTRALIANO [5]

Este modelo pode apresentar variações significativas em sua estrutura, assim como em seus parâmetros, de forma a considerar a variações na composição da carga e nas condições ambientais. Ele permite uma implementação "on-line", o que resulta em um melhor rastreamento das variações nas características da carga (modelo de carga adaptativo). Com isto, o sistema de aquisição de dados deve monitorar continuamente a tensão, freqüência e respostas da carga. Serão de interesse para a construção do modelo somente seqüências de pontos contendo distúrbios.

É sabido que a resposta de uma carga não é apenas função da tensão e da freqüência, mas também de fatores externos, tais como temperatura, localização e hora do dia. Estes fatores externos tornam variáveis as características das cargas.

Conseqüentemente, as estruturas de seus modelos também devem ser variáveis. Com isto, paralelamente à estimativa dos parâmetros, esta metodologia inclui a monitoração do desempenho dos modelos de maneira que suas estruturas venham a ser apropriadamente modificadas.

### 4.3.1 Método de Seleção da Estrutura do Modelo

Inicialmente, são selecionadas diferentes estruturas em função do tipo de carga, da estação do ano e da hora do dia. Tais estruturas são determinadas "off-line" e progressivamente atualizadas à medida que mais informações são recebidas. O sistema monitora "on-line" o erro do modelo em uso, através de uma função-custo. Caso este erro seja elevado, uma nova estrutura é escolhida entre as previamente selecionadas. Os modelos pré-selecionados possuem a seguinte estrutura:

$$\Delta p_k = \sum_{i=1}^{n_p} a_i \cdot \Delta p_{k-i} + \sum_{i=1}^{n_v} b_i \cdot \Delta v_{k-i} + \sum_{i=1}^{n_f} c_i \cdot \Delta f_{k-i} + \varepsilon_k \quad (4.27)$$

Estes modelos de carga são do tipo duas entradas e uma saída, onde  $p_k$  representa as respostas da carga,  $v_k$  e  $f_k$  denotam os sinais de entrada observados de tensão e freqüência, respectivamente, e a parcela  $\varepsilon_k$  representa o erro da modelagem causado pela natureza aleatória da carga. Os coeficientes da regressão em  $p_i$ ,  $v_i$  e  $f_i$  são representados por  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$ , respectivamente, enquanto  $n_p$ ,  $n_v$  e  $n_f$  determinam as correspondentes ordens da regressão.

As estruturas dos modelos são definidas por triplas de valores do tipo  $M_i = [n_p, n_v, n_f]$ . Com isto, o número total de parâmetros a serem estimados em um

Conseqüentemente, as estruturas de seus modelos também devem ser variáveis. Com isto, paralelamente à estimativa dos parâmetros, esta metodologia inclui a monitoração do desempenho dos modelos de maneira que suas estruturas venham a ser apropriadamente modificadas.

#### 4.3.1 Método de Seleção da Estrutura do Modelo

Inicialmente, são selecionadas diferentes estruturas em função do tipo de carga, da estação do ano e da hora do dia. Tais estruturas são determinadas "off-line" e progressivamente atualizadas à medida que mais informações são recebidas. O sistema monitora "on-line" o erro do modelo em uso, através de uma função-custo. Caso este erro seja elevado, uma nova estrutura é escolhida entre as previamente selecionadas. Os modelos pré-selecionados possuem a seguinte estrutura:

$$\Delta p_k = \sum_{i=1}^{n_p} a_i \cdot \Delta p_{k-i} + \sum_{i=1}^{n_v} b_i \cdot \Delta v_{k-i} + \sum_{i=1}^{n_f} c_i \cdot \Delta f_{k-i} + \varepsilon_k \quad (4.27)$$

Estes modelos de carga são do tipo duas entradas e uma saída, onde  $p_k$  representa as respostas da carga,  $v_k$  e  $f_k$  denotam os sinais de entrada observados de tensão e frequência, respectivamente, e a parcela  $\varepsilon_k$  representa o erro da modelagem causado pela natureza aleatória da carga. Os coeficientes da regressão em  $p_i$ ,  $v_i$  e  $f_i$  são representados por  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$ , respectivamente, enquanto  $n_p$ ,  $n_v$  e  $n_f$  determinam as correspondentes ordens da regressão.

As estruturas dos modelos são definidas por triplas de valores do tipo  $M_i = [n_p, n_v, n_f]$ . Com isto, o número total de parâmetros a serem estimados em um

certo modelo é dado por:

$$n = n_p + n_v + n_f + 2 \quad (4.28)$$

A Tabela 4.1 apresenta algumas estruturas pré-selecionadas para os modelos de carga em função do tipo de carga a ser modelado. São apresentadas duas alternativas para cada tipo de potência. A seqüência [2,2,1] (alternativa 1 da potência reativa para cargas residenciais durante o inverno) significa que os valores de  $n_p$ ,  $n_v$  e  $n_f$  são, respectivamente, 2, 2 e 1, sendo o número de parâmetros a serem estimados igual a 7.

Tipo da carga	Potência Ativa		Potência Reativa	
	Alter1	Alter2	Alter1	Alter2
Residencial (Inverno)	[2,2,2]	[1,0,0]	[2,2,1]	[1,0,0]
Residencial (Verão) Combinação				
Comercial-Residencial	[3,3,3]	[1,0,0]	[3,3,1]	[1,0,0]
Combinação Agro-Industrial	[4,4,4]	[1,0,0]	[4,4,1]	[1,0,0]
Industrial	[5,5,5]	[1,0,0]	[5,5,1]	[1,0,0]

**Tabela 4.1 - Estruturas Pré-selecionadas para os Modelos de Carga**

A função-custo que avalia o desempenho do modelo é definida como:

$$J = \frac{N}{N - n} \sum_{k=1}^N (\Delta p(k) - \Delta \hat{p}(k))^2 \quad (4.29)$$

onde  $\Delta\hat{p}(k)$  é a saída do modelo dada por:

$$\Delta\hat{p}_k = \sum_{i=1}^{n_p} \hat{a}_i \cdot \Delta p_{k-i} + \sum_{i=1}^{n_v} \hat{b}_i \cdot \Delta v_{k-i} + \sum_{i=1}^{n_f} \hat{c}_i \cdot \Delta f_{k-i} \quad (4.30)$$

e  $\Delta p(k)$  é o valor de potência medido, enquanto  $\Delta\hat{p}(k)$  são as estimativas (mínimos quadrados) dos parâmetros da regressão e  $N$  o número de observações consideradas. Observe-se que o fator  $\left(\frac{N}{N-n}\right)$  da função-custo favorece modelos de baixa ordem. Entre modelos com desempenho similar, deve-se selecionar o de menor ordem, pois geralmente este terá melhor capacidade de generalização (isto é, respostas mais precisas frente a novos distúrbios).

#### 4.3.2 Estimativa dos Coeficientes da Regressão

Seja um conjunto de  $N$  observações. A partir da equação (4.30) pode-se escrever o sistema linear:

$$\begin{aligned} \Delta p_k &= a_1 \cdot \Delta p_{k-1} + a_2 \cdot \Delta p_{k-2} + \dots + a_{n_p} \cdot \Delta p_{k-n_p} + \\ &+ b_0 \cdot \Delta v_k + b_1 \cdot \Delta v_{k-1} + \dots + b_{n_v} \cdot \Delta v_{k-n_v} + \\ &+ c_0 \cdot \Delta f_k + c_1 \cdot \Delta f_{k-1} + \dots + c_{n_f} \cdot \Delta f_{k-n_f} + \varepsilon_k \\ \Delta p_{k-1} &= a_1 \cdot \Delta p_{k-2} + a_2 \cdot \Delta p_{k-3} + \dots + a_{n_p} \cdot \Delta p_{k-n_p-1} + \\ &+ b_0 \cdot \Delta v_{k-1} + b_1 \cdot \Delta v_{k-2} + \dots + b_{n_v} \cdot \Delta v_{k-n_v-1} + \\ &+ c_0 \cdot \Delta f_{k-1} + c_1 \cdot \Delta f_{k-2} + \dots + c_{n_f} \cdot \Delta f_{k-n_f-1} + \varepsilon_{k-1} \\ &\vdots \\ \Delta p_{k-N+1} &= a_1 \cdot \Delta p_{k-N} + a_2 \cdot \Delta p_{k-N-1} + \dots + a_{n_p} \cdot \Delta p_{k-n_p-N+1} + \\ &+ b_0 \cdot \Delta v_{k-N+1} + b_1 \cdot \Delta v_{k-N} + \dots + b_{n_v} \cdot \Delta v_{k-n_v-N+1} + \\ &+ c_0 \cdot \Delta f_{k-N+1} + c_1 \cdot \Delta f_{k-N} + \dots + c_{n_f} \cdot \Delta f_{k-n_f-N+1} + \varepsilon_{k-N+1} \end{aligned} \quad (4.31)$$

A solução deste sistema linear no senso dos mínimos quadrados pode ser expressa em forma matricial como se segue:

$$\underline{A} = (\underline{U}^t \cdot \underline{U})^{-1} \cdot \underline{U}^t \cdot \underline{X} \quad \text{para } N \geq n \quad (4.32)$$

onde:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_{n_p} & b_0 & b_1 & \cdots & b_{n_v} & c_0 & c_1 & \cdots & c_{n_f} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} \Delta p_{k-1} & \cdots & \Delta p_{k-n_p} & \Delta v_k & \cdots & \Delta v_{k-n_v} & \Delta f_k & \cdots & \Delta f_{k-n_f} \\ \Delta p_{k-2} & \cdots & \Delta p_{k-n_p-1} & \Delta v_{k-1} & \cdots & \Delta v_{k-n_v-1} & \Delta f_{k-1} & \cdots & \Delta f_{k-n_f-1} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta p_{k-N} & \cdots & \Delta p_{k-n_p-N+1} & \Delta v_{k-N+1} & \cdots & \Delta v_{k-n_v-N+1} & \Delta f_{k-N+1} & \cdots & \Delta f_{k-n_f-N+1} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

e

$$\underline{X} = [\Delta p_k \quad \Delta p_{k-1} \quad \cdots \quad \Delta p_{k-N+1}] \quad (4.35)$$

De forma a evitar a inversão matricial completa na equação (4.35), toda vez que uma nova observação venha a ser incorporada para reestimar os parâmetros do modelo e ainda evitar o armazenamento de toda informação passada, um procedimento baseado na técnica recursiva de mínimos quadrados deve ser utilizado.

Observe-se que, ao contrário do modelo canadense, o australiano não está limitado a modelos de primeira ordem. Entretanto, o modelo australiano não considera a influência da carga na alimentação da mesma.

## CAPÍTULO 5

## RESULTADOS

## CAPÍTULO 5

## RESULTADOS

computadores. O objetivo deste capítulo é apresentar os dados de carga de carga, os resultados dos testes e o funcionamento dos programas, sendo para isto um Pacote Funcional chamado LOADDYN [9] (Anexo IV).

Inicialmente, o Sistema de Aquisição de Dados AT-CON (Anexo III), de CHMIG, registra os valores de hora, tensão, frequência e potência ativa e reativa, armazenando assim um arquivo para cada conjunto de distúrbios ocorridos em um teste contínuo. Estes arquivos vão formar um banco de dados (referência na Figura 5.1 pelo símbolo Arquivo de Dados), os quais são utilizados pelo LOADDYN para a construção de seus modelos.

## 5.2 MANIPULAÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS

Os arquivos de dados, ao serem lidos pelo programa, sofrem manipulações por parte do usuário com a finalidade de torná-los próprios para a construção dos modelos. Estas manipulações são descritas nos próximos tópicos.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

#### 5.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta exemplos ilustrativos dos modelos obtidos, como os dados registrados pela Companhia de Energética de Minas Gerais (CEMIG) de um de seus consumidores. O objetivo deste capítulo é, de posse dos dados da CEMIG, mostrar aos usuários o funcionamento dos programas, usando para isto um Pacote Computacional chamado LOADDYN [99] (Anexo IV).

Inicialmente, o Sistema de Aquisição de Dados AT-CON (Anexo III), da CEMIG, registra os valores de hora, tensão, frequência e potência ativa e reativa, construindo assim um arquivo para cada conjunto de distúrbios ocorridos em um certo consumidor. Estes arquivos vão formar um banco de dados (referência na Figura 5.1 pelo símbolo Arquivo de Dados), os quais são utilizados pelo LOADDYN para a construção de seus modelos.

#### 5.2 MANIPULAÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS

Os arquivos de dados, ao serem lidos pelo programa, sofrem manipulações por parte do usuário com a finalidade de tomá-los próprios para a confecção dos modelos. Estas manipulações são descritas nos próximos tópicos.

### 5.2.1 Transformação em Arquivos \*.MOD

Ao serem lidos pelo Programa LOADDYN, os arquivos de dados provenientes do AT.CON devem sofrer uma transformação com a finalidade de se tornarem arquivos \*.MOD. Estes arquivos devem conter somente o distúrbio que ocasionou o registro pelo sistema de aquisição de dados. Esta manipulação é imperativa, pois durante o registro diversos pontos anteriores e posteriores ao distúrbio também são registrados (tais pontos devem ser suprimidos a fim de que tenhamos somente o distúrbio), o que acarretaria uma modelagem de estado permanente e não dinâmica como é o objetivo do programa.

Um exemplo desta conversão está mostrado nas figuras 5.1 e 5.2, que apresentam os arquivos 02SET93X.006, provenientes do sistema de aquisição de dados, e ANT4.MOD, um dos possíveis arquivos que podem ser gerados (neste caso foram tomados os pontos no intervalo de 160 a 260).

```

"DATA:" "02/09/93"
"HORA:" "13:29:06:00"
"TAXA(ms):" "100"
"PRE-GAT:" "200"
"POS-GAT:" "1800"
" " " "F(00)" " V(00) " " P(00,01)" " Q(00,01)"
" " " " (Hz) " " (Kv) " " (Kw) " " (Kvar) "
" " " "" 60.000" " 138.000" "70000.000" "25000.000"
"1" " 0" " 60.044" " 142.845" "71068.078" "27073.284"
"1" " 1" " 59.980" " 142.808" "70772.142" "26834.403"
"1" " 2" " 60.055" " 143.615" "71583.855" "27075.353"
"1" " 3" " 60.046" " 143.456" "71567.168" "26828.562"

      :           :

"1" " 159" " 60.056" " 143.505" "69936.172" "24239.748"
"1" " 160" " 59.984" " 143.543" "69930.610" "24400.559"
"1" " 161" " 60.056" " 143.579" "70202.008" "24530.983"
"1" " 162" " 59.984" " 142.964" "69589.076" "24624.190"

      :           :

"1" " 258" " 59.949" " 143.857" "70130.102" "24259.166"
"1" " 259" " 59.961" " 143.843" "69932.098" "24287.778"
"1" " 260" " 59.950" " 143.835" "70353.636" "24522.899"
"1" " 261" " 59.949" " 143.885" "70234.030" "24536.496"

      :           :

"1" "1998" " 59.950" " 143.067" "70612.000" "25155.495"
"1" "1999" " 59.956" " 142.580" "70256.579" "25267.772"
    
```

**Figura 5.1 - Listagem Parcial do Arquivo 02SET93X.006**

59.9840	143.5430	69930.6094	24400.5586
60.0560	143.5790	70202.0078	24530.9824
59.9840	142.9640	69589.0781	24624.1895
60.0470	143.4300	70015.8125	24648.4668
60.0470	143.5760	70213.6172	24608.4551
60.0470	143.0210	69654.0938	24721.3945
59.9820	143.6390	70394.6484	24729.4004
⋮		⋮	
60.0230	143.0910	69102.5469	24464.4980
59.9550	143.8450	69330.4844	24378.0801
59.9570	143.7720	69547.2891	24441.2305
59.9460	143.2370	69270.2891	24501.0898
59.9490	143.8570	70130.1016	24259.1660
59.9610	143.8430	69932.1016	24287.7773
59.9500	143.8350	70353.6328	24522.8984

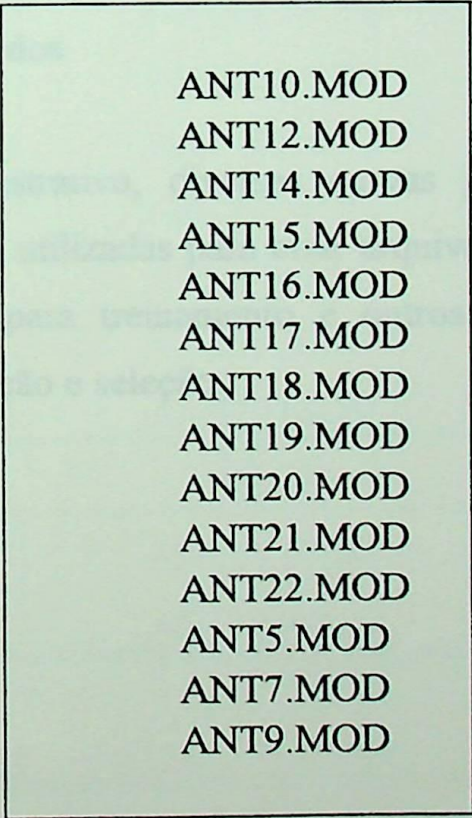
**Figura 5.2 - Listagem Parcial do Arquivo ANT4.MOD**

## 5.2.2 Criação dos Arquivos \*.TRE

Após a criação dos arquivos \*.MOD, o usuário deve criar os arquivos para treinamento, denominados \*.TRE. Estes são compostos por um ou alguns arquivos \*.MOD e têm o objetivo de obter o modelo dinâmico da carga. Sua criação ocorre no pacote no item SIMULAÇÃO, em sua função ARQUIVO DE TREINAMENTO. Depois da seleção de quais os arquivos (\*.MOD) que serão escolhidos para o treinamento do modelo, o programa pergunta qual o nome do arquivo (\*.TRE) que armazenará este conjunto.

Quando do treinamento, o usuário deverá informar qual o nome do arquivo \*.TRE que será utilizado para a obtenção do modelo.

A Figura 5.3 apresenta a listagem de um arquivo \*.TRE, denominado TIP1.TRE.



```
ANT10.MOD
ANT12.MOD
ANT14.MOD
ANT15.MOD
ANT16.MOD
ANT17.MOD
ANT18.MOD
ANT19.MOD
ANT20.MOD
ANT21.MOD
ANT22.MOD
ANT5.MOD
ANT7.MOD
ANT9.MOD
```

**Figura 5.3 - Listagem do Arquivo TIP1.TRE**

### 5.2.3 Arquivos de Teste

Novamente, os arquivos \*.MOD voltam a ser utilizados pelo usuário, quando da fase de testes do modelo, agora no item SIMULAÇÃO em função TESTE.

Inicialmente, o usuário informa ao programa qual equação ele deseja utilizar (através de arquivos \*.EQU), para em seguida selecionar o distúrbio que será utilizado, dentre os arquivos \*.MOD. Nesta situação estes arquivos servem para teste do modelo e são utilizados individualmente, ao contrário do treinamento onde diversos arquivos podem ser concatenados.

## 5.3 EXEMPLO ILUSTRATIVO

### 5.3.1 Preparação dos Dados

Neste exemplo ilustrativo, diversas curvas provenientes do sistema de aquisição de dados foram utilizadas para criar arquivos \*.MOD, sendo que alguns deles foram escolhidos para treinamento e outros para testes. A Tabela 5.1 apresenta esta transformação e seleção.

Arquivo EQU	Arquivo *.MOD	Intervalo
10CANT93X.001	ANT11.MOD	30 - 130
16OUT193X.000	ANT13.MOD	30 - 130

Tabela 5.1 - Tabela de seleção dos Arquivos de Treinamento e de Teste

Arquivo CEMIG	Arquivo *.MOD	Intervalo
<b>TREINAMENTO</b>		
02SET93X.000	ANT4.MOD	160 - 260
06SET93X.003	ANT5.MOD	180 - 280
21SET93X.009	ANT6.MOD	180 - 280
21SET93X.011	ANT7.MOD	180 - 280
21SET93X.020	ANT8.MOD	160 - 260
02OUT93X.000	ANT9.MOD	250 - 350
10OUT93X.000	ANT10.MOD	30 - 105
11OUT93X.007	ANT12.MOD	30 - 170
19OUT93X.000	ANT14.MOD	30 - 130
19OUT93X.003	ANT15.MOD	30 - 129
20OUT93X.000	ANT16.MOD	10 - 110
20OUT93X.001	ANT17.MOD	30 - 130
20OUT93X.002	ANT18.MOD	30 - 130
20OUT93X.003	ANT19.MOD	30 - 130
24OUT93X.005	ANT20.MOD	30 - 130
24OUT93X.011	ANT21.MOD	30 - 200
24OUT93X.011	ANT22.MOD	420 - 600
<b>TESTE</b>		
10OUT93X.001	ANT11.MOD	30 - 130
16OUT93X.000	ANT13.MOD	30 - 130

**Tabela 5.1 - Tabela de Seleção dos Arquivos de Treinamento e de Testes**

Os arquivos de treinamento foram armazenados no arquivo TIP1.TRE mostrado na Figura 5.3.

### 5.3.2 Geração dos Modelos

De posse do arquivo TIP1.TRE, procedeu-se à geração dos modelos para cada um dos métodos escolhidos e descritos no Capítulo 4. Isto aconteceu através do item SIMULAÇÃO em sua função TREINAMENTO. Houve a seleção do método a ser utilizado e obteve-se individualmente cada um dos modelos. As Figuras 5.4 a 5.6 mostram os arquivos de saída das equações (\*.EQU) para cada um dos métodos.

MODELO ZIP

$$\Delta P(t) = -11.027 + 660.5201 \cdot \Delta V(t) + 10.4052 \cdot \Delta V^2(t)$$
$$\Delta Q(t) = -6.582 + 1104.8230 \cdot \Delta V(t) + 9.0070 \cdot \Delta V^2(t)$$

**Figura 5.4 - Listagem do Arquivo ZIP.EQU - Modelo Clássico**



## MODELO HYDRO-QUEBEC

$$\Delta P(t) = ( -.19669 ) \cdot \Delta P(t-1) + ( -.04889 ) \cdot \Delta Q(t-1) \\ + ( 1.31919 ) \cdot \Delta V(t) + ( .38905 ) \cdot \Delta f(t)$$

$$\Delta Q(t) = ( 1.08719 ) \cdot \Delta P(t-1) + ( -.32261 ) \cdot \Delta Q(t-1) + \\ + ( 10.82030 ) \cdot \Delta V(t) + ( 1.98459 ) \cdot \Delta f(t)$$

**Figura 5.5 - Listagem do Arquivo HQ.EQU - Modelo Hydro-Quebec**

MODELO AUSTRALIANO

$$\Delta P(t) = a_{ip} \cdot \Delta P(t-i_p) + b_{iv} \cdot \Delta V(t-i_v) + c_{if} \cdot \Delta F(t-i_f)$$

$$b(2) = 351.5224 \quad c(2) = -443.6997$$

$$b(1) = -388.1377 \quad c(1) = -1133.0110$$

$$b(0) = 122.0019 \quad c(0) = -771.0653$$

$$\Delta Q(t) = a_{iq} \cdot \Delta Q(t-i_q) + b_{iv} \cdot \Delta V(t-i_v) + c_{if} \cdot \Delta F(t-i_f)$$

$$b(2) = 907.6563 \quad c(2) = 2174.6030$$

$$b(1) = -470.4050 \quad c(1) = 415.0882$$

$$b(0) = -80.8882 \quad c(0) = -19.4158$$

(a)

MODELO AUSTRALIANO

$$\Delta P(t) = a_{ip} \cdot \Delta P(t-i_p) + b_{iv} \cdot \Delta V(t-i_v) + c_{if} \cdot \Delta F(t-i_f)$$

$$b(3) = 379.5454 \quad c(3) = -122.5161$$

$$b(2) = -372.8889 \quad c(2) = -887.5443$$

$$b(1) = 142.1683 \quad c(1) = -511.3097$$

$$b(0) = 64.7177 \quad c(0) = 227.5102$$

$$\Delta Q(t) = a_{iq} \cdot \Delta Q(t-i_q) + b_{iv} \cdot \Delta V(t-i_v) + c_{if} \cdot \Delta F(t-i_f)$$

$$b(3) = 860.3092 \quad c(3) = 1663.7670$$

$$b(2) = -403.1151 \quad c(2) = 353.9035$$

$$b(1) = -106.8206 \quad c(1) = -104.0408$$

$$b(0) = -144.9073 \quad c(0) = -79.0629$$

(b)

**Figura 5.6 - Listagem do Arquivo AUSTRAL.EQU - Modelo Australiano**

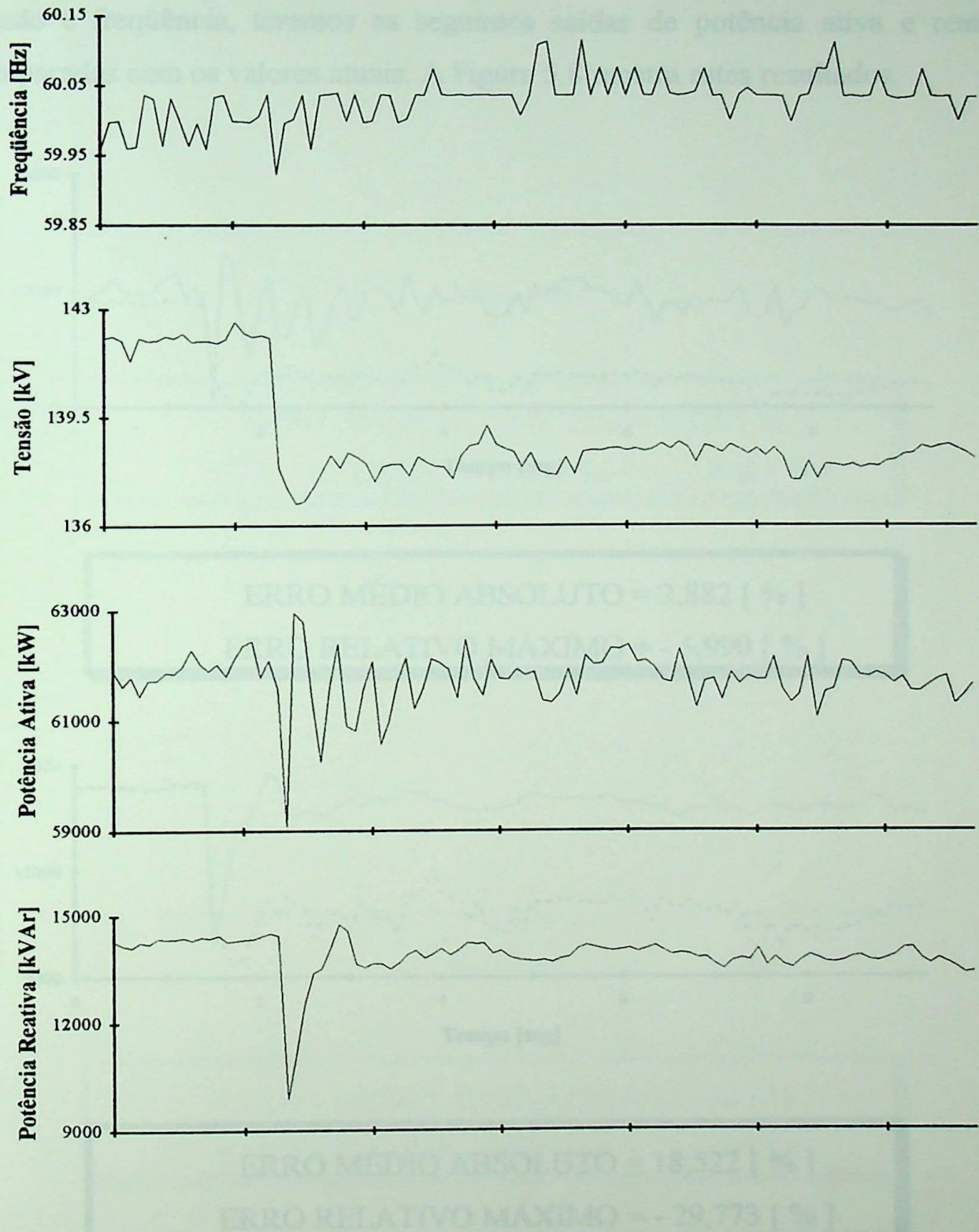
A Figura 5.6 apresenta dois conjuntos de equações, pois o Modelo Australiano permite que a ordem da equação seja variável. Para o caso (a) escolheu-se a tripla [0,1,1] para a potência ativa e [0,2,2] para a reativa. No caso (b) para ambas as potências utilizou-se a tripla [0,2,2].

### 5.3.3 Teste dos Modelos

De posse dos modelos, pode-se iniciar a etapa de testes do modelo para diversos distúrbios. Neste caso, serão utilizados os arquivos ANT11.MOD e ANT13.MOD.

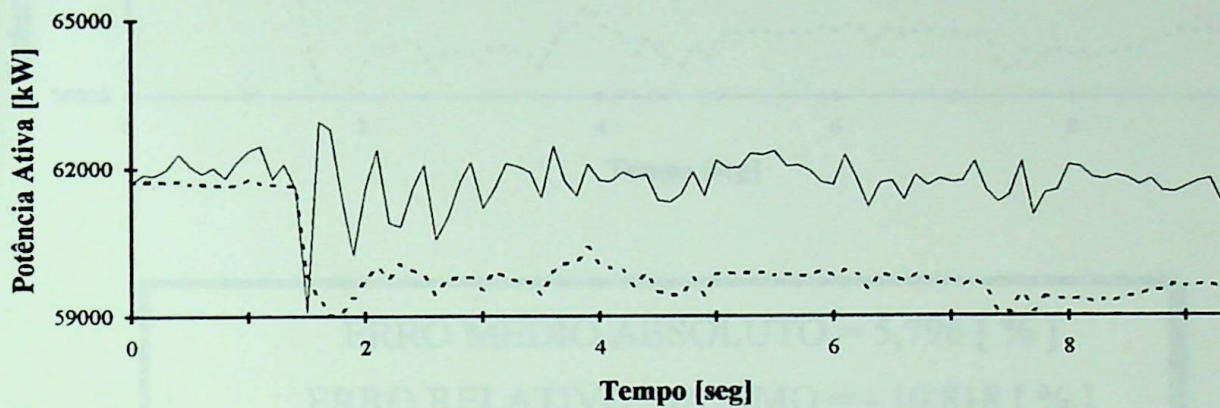
#### a. Teste 1 - Arquivo ANT11.MOD

A Figura 5.7 contém as curvas de tensão, frequência, potência ativa e reativa registradas durante os distúrbios.



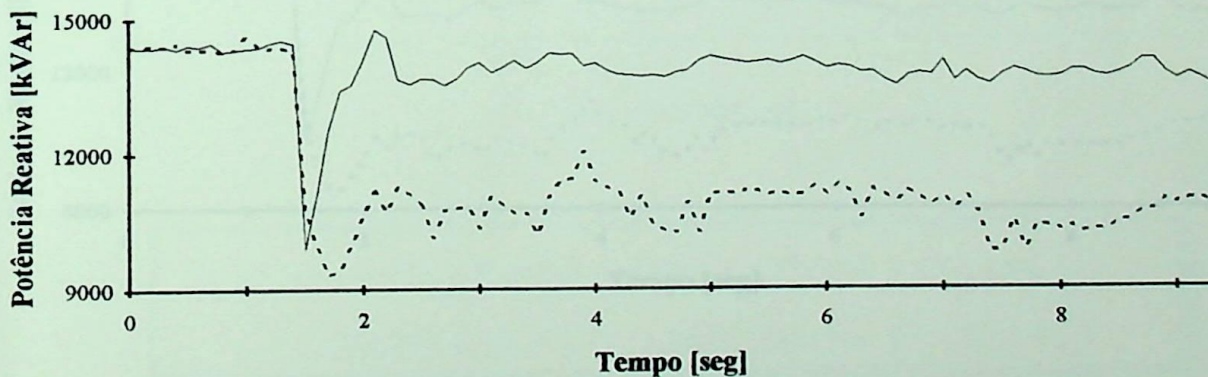
**Figura 5.7 - Dados do Arquivo ANT11.MOD**

Ao aplicarmos nas equações das figuras 5.4, 5.5 e 5.6(a) os dados de tensão e frequência, teremos as seguintes saídas de potência ativa e reativa comparadas com os valores atuais. A Figura 5.8 mostra estes resultados.



ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 2,882 [ % ]

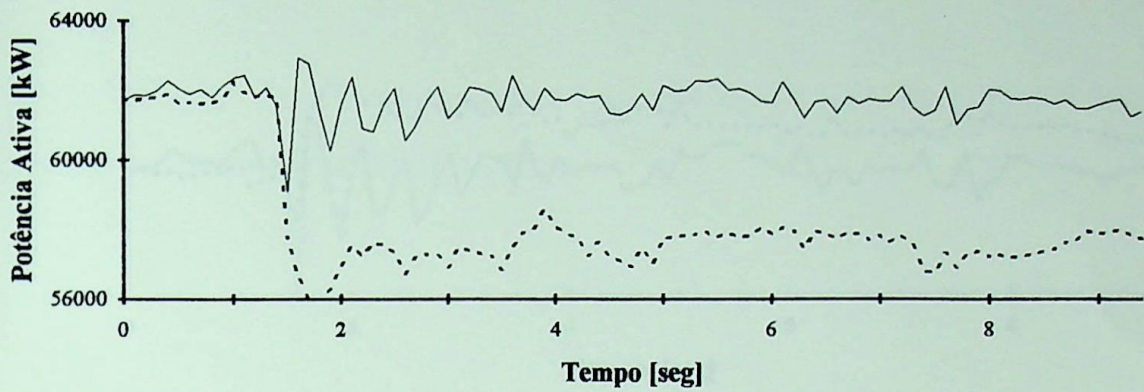
ERRO RELATIVO MÁXIMO = - 5,990 [ % ]



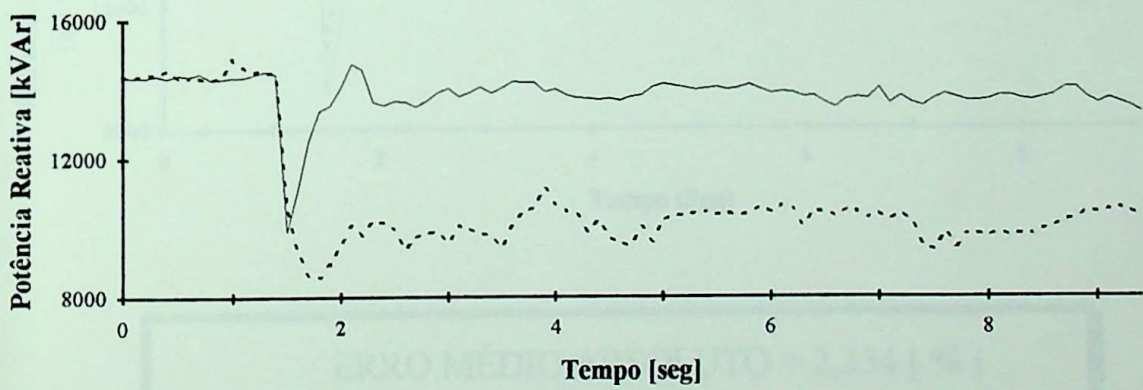
ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 18,522 [ % ]

ERRO RELATIVO MÁXIMO = - 29,773 [ % ]

(a)

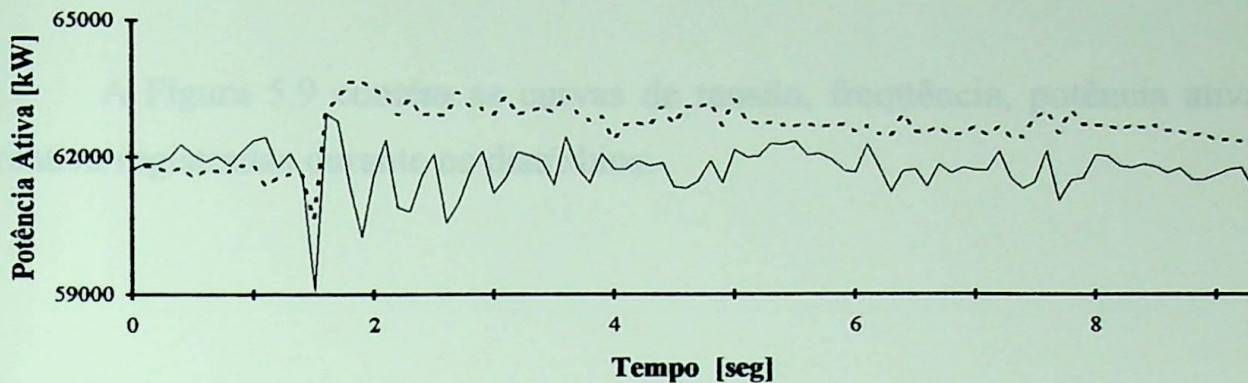


ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 5,796 [ % ]  
 ERRO RELATIVO MÁXIMO = - 10,818 [ % ]

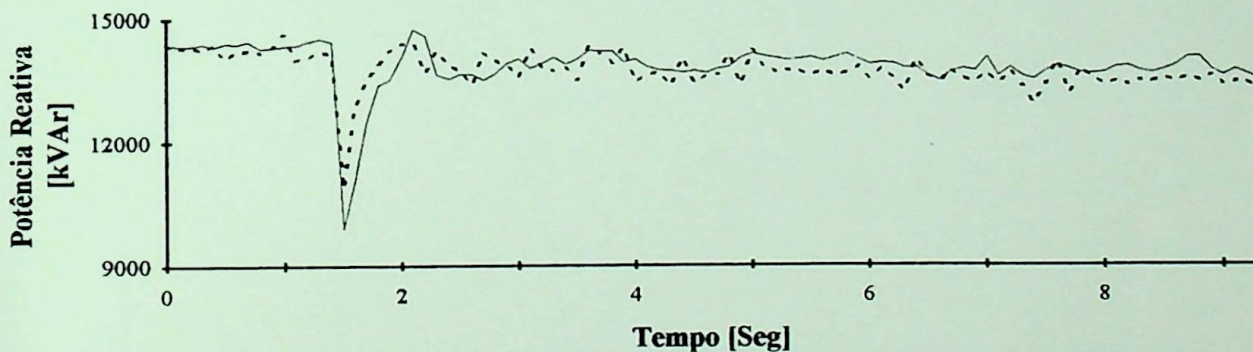


ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 22,748 [ % ]  
 ERRO RELATIVO MÁXIMO = - 35,961 [ % ]

(b)



ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 1,551 [ % ]  
 ERRO RELATIVO MÁXIMO = 5,371 [ % ]



ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 2,354 [ % ]  
 ERRO RELATIVO MÁXIMO = 15,740 [ % ]

(c)

**Figura 5.8 - Resultado dos Modelos versus Valores Atuais**

**(a) Modelo Clássico; (b) Modelo Hydro-Quebec; (c) Modelo Australiano**

**b. TESTE 2 - ARQUIVO ANT13.MOD**

A Figura 5.9 contém as curvas de tensão, frequência, potência ativa e reativa registradas durante os distúrbios.

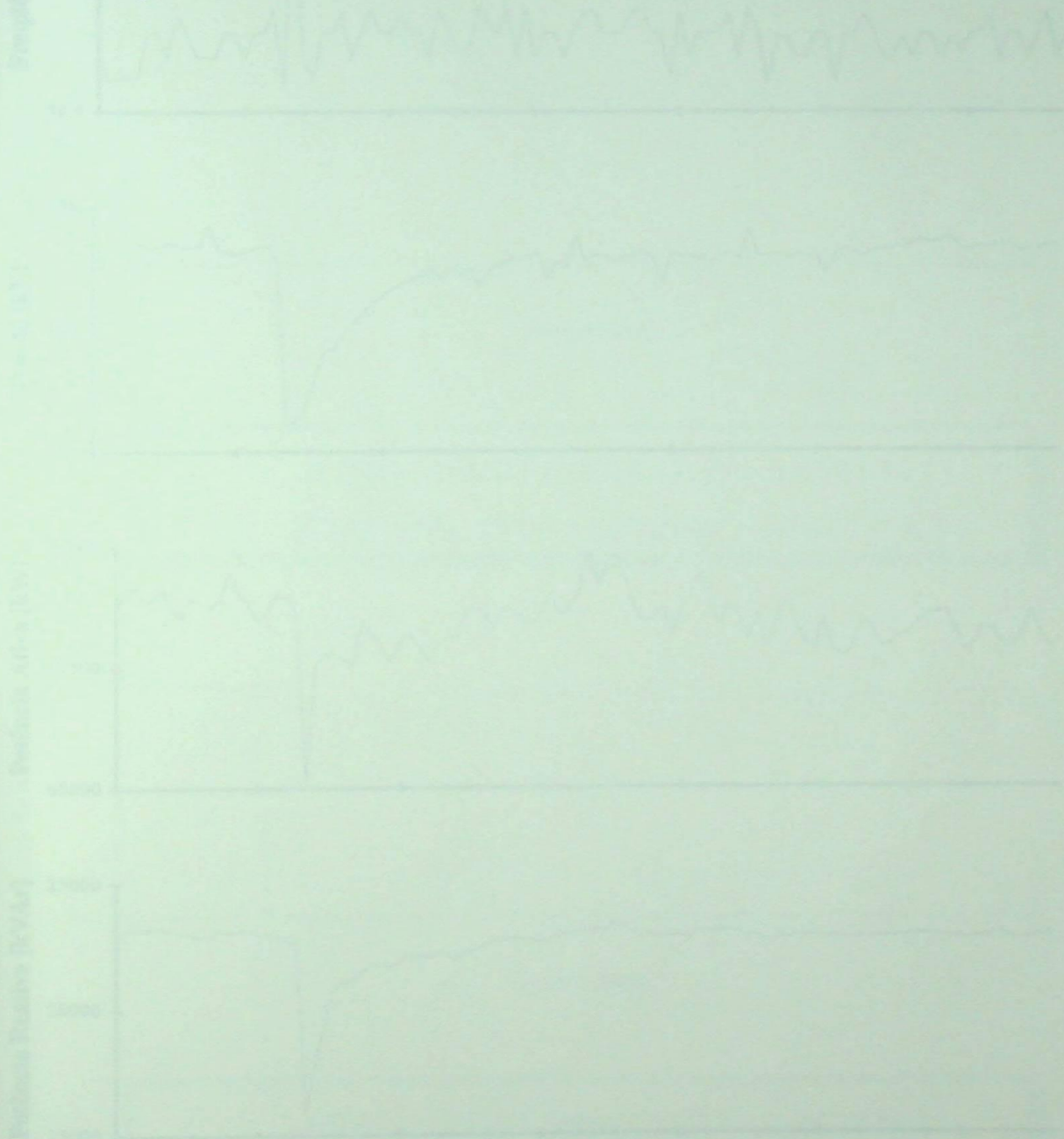
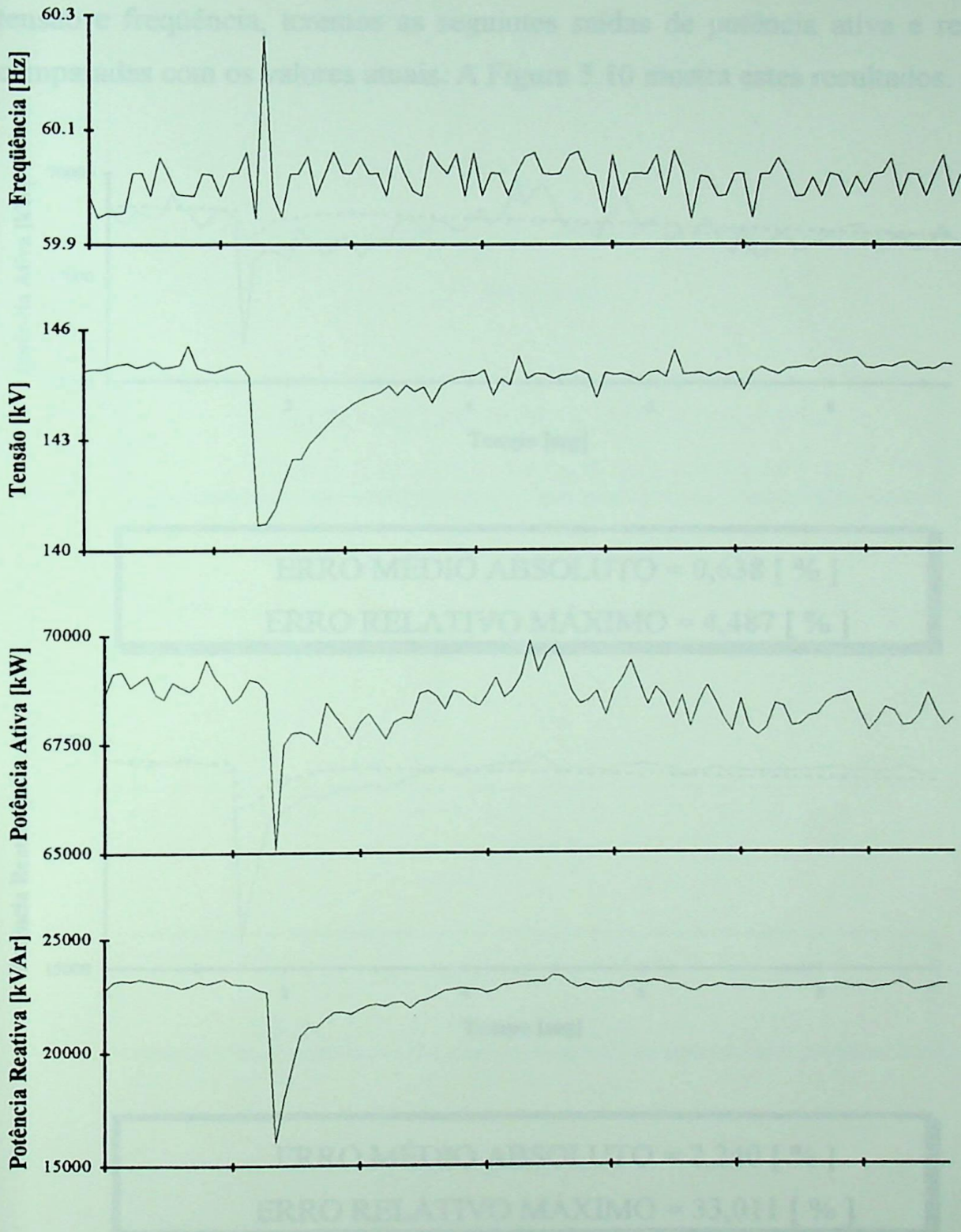
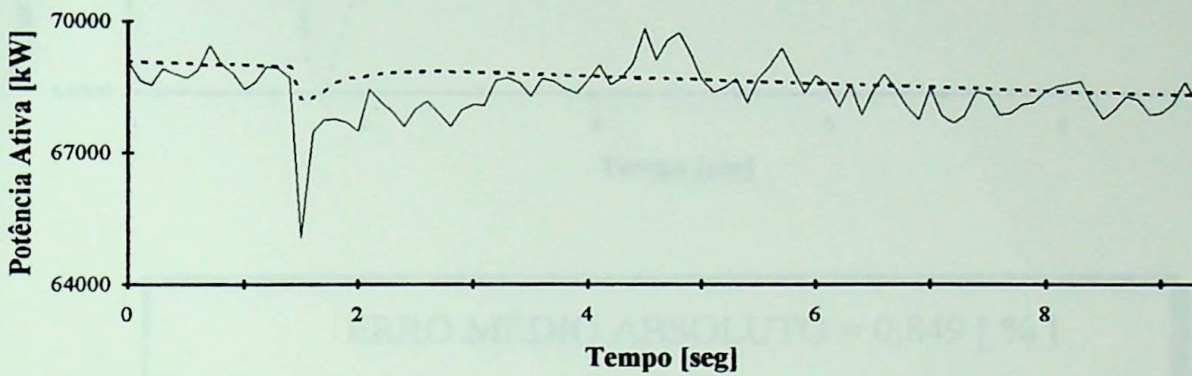


Figura 5.9 - Dados do Arquivo ANT13.MOD



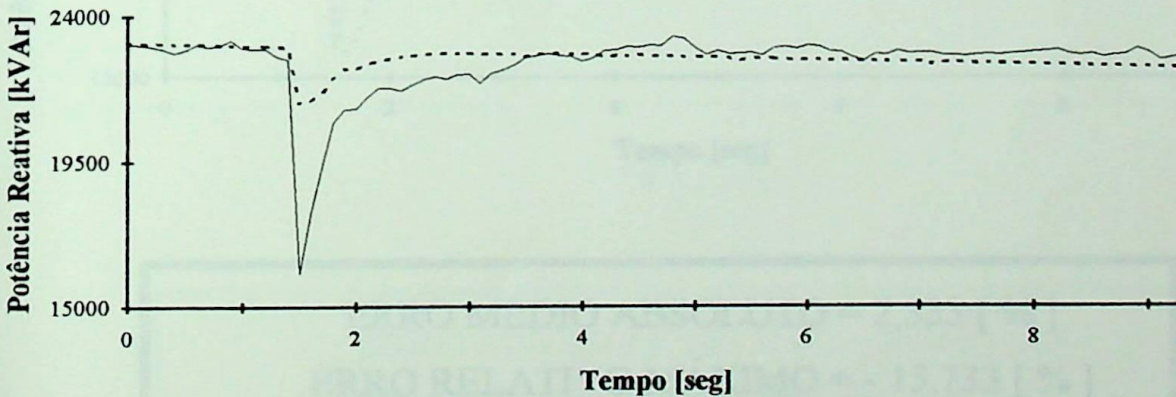
**Figura 5.9 - Dados do Arquivo ANT13.MOD**

Ao aplicarmos nas equações das figuras 5.4, 5.5 e 5.6(b) os dados de tensão e frequência, teremos as seguintes saídas de potência ativa e reativa comparadas com os valores atuais. A Figura 5.10 mostra estes resultados.



ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 0,638 [ % ]

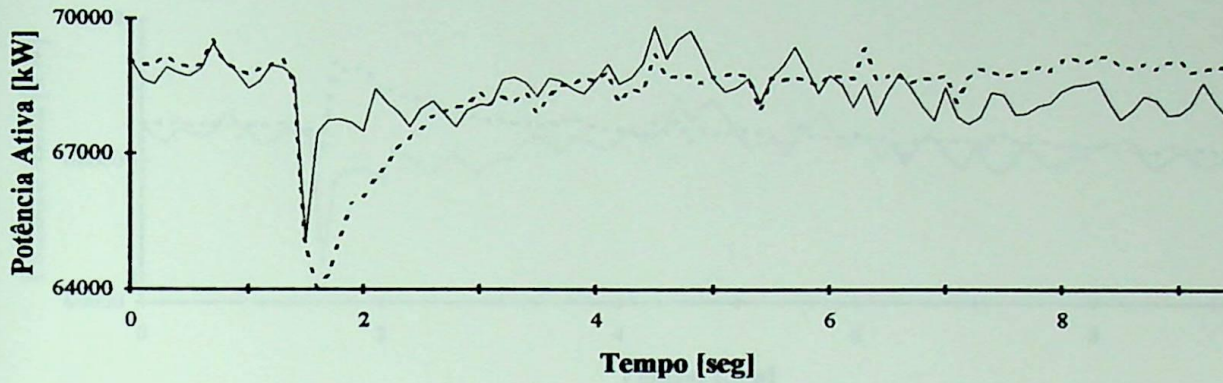
ERRO RELATIVO MÁXIMO = 4,487 [ % ]



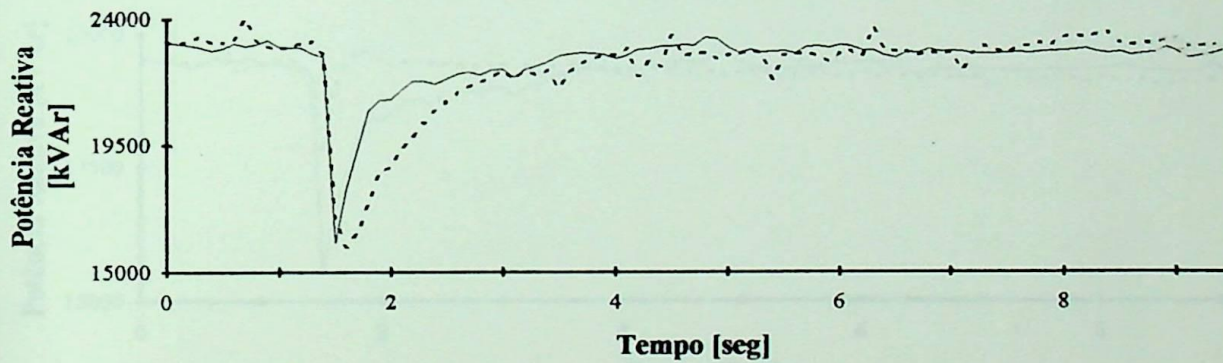
ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 2,240 [ % ]

ERRO RELATIVO MÁXIMO = 33,011 [ % ]

(a)



**ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 0,849 [ % ]**  
**ERRO RELATIVO MÁXIMO = - 5,119 [ % ]**

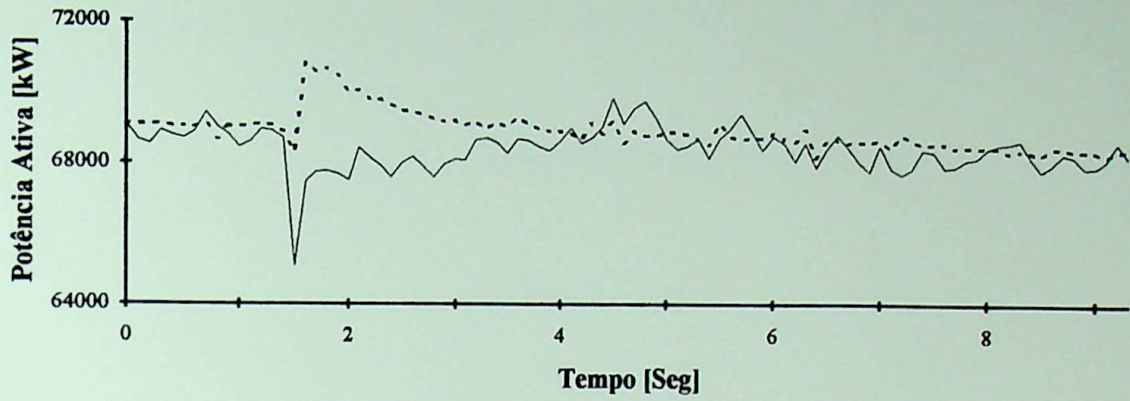


**ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 2,333 [ % ]**  
**ERRO RELATIVO MÁXIMO = - 15,733 [ % ]**

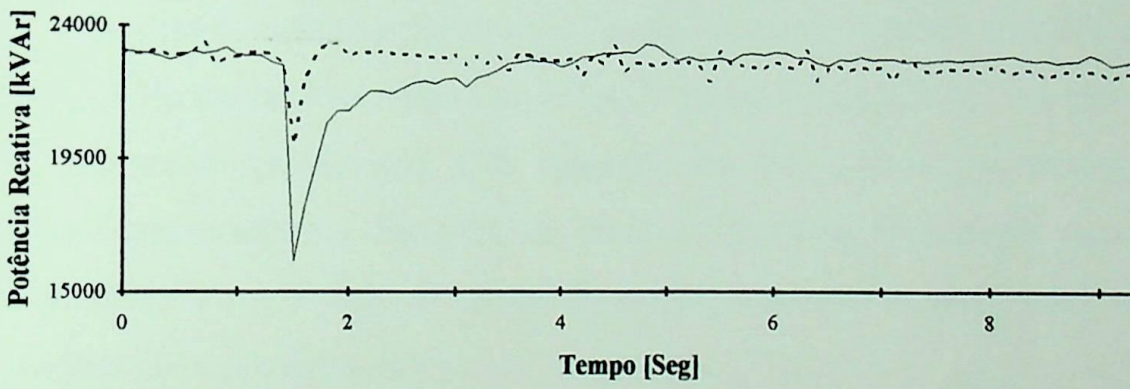
(b)

Figura 5.12 - Resultados dos Modelos com os Valores Atuais

(a) Modelo Clássico; (b) Modelo Híbrido; (c) Modelo Avançado



ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 0,974 [ % ]  
 ERRO RELATIVO MÁXIMO = 4,960 [ % ]



ERRO MÉDIO ABSOLUTO = 2,746 [ % ]  
 ERRO RELATIVO MÁXIMO = 24,612 [ % ]

(c)

**Figura 5.10 - Resultado dos Modelos versus Valores Atuais**

(a) Modelo Clássico; (b) Modelo Hydro-Quebec; (c) Modelo Australiano

## CAPÍTULO 6

## CONCLUSÃO

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um pacote computacional para a modelagem dinâmica da carga elétrica. Ele foi dividido em várias etapas, que foram cumpridas de maneira seqüencial e possibilitaram a adequação e validação dos modelos.

Os dados utilizados no decorrer desta dissertação foram medidos no Sistema Elétrico da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e são de um consumidor metalúrgico. Esta aquisição foi feita por um equipamento especial que monitorava distúrbios de tensão e freqüência, registrando valores de potência ativa e reativa (além de tensão, corrente e freqüência) nas situações pré e pós-distúrbios.

Foram escolhidos dois modelos para representar a dinâmica da carga, denominados ao longo deste trabalho como australiano e canadense, e mais um, estático, baseado em potência, corrente e impedância constantes, denominado clássico. Este último modelo, apesar de não poder representar a dinâmica da carga, foi introduzido pois diversos programas utilizados pelo setor só dispõe deste tipo de representação.



Foi desenvolvido um pacote computacional (denominado LOADDYN), que contém os modelos mencionados e permite uma fácil manipulação dos dados provenientes do sistema de aquisição de dados. Este foi construído utilizando interfaces amigáveis e menus "pull-down".

De posse do pacote computacional e dos dados da CEMIG, diversas simulações foram realizadas e algumas conclusões obtidas:

- (a) o método escolhido, baseado em medidas realizadas diretamente na entrada de energia do consumidor, possui uma expressiva vantagem sobre aquele que modela cada um dos componentes individuais e depois os agrega; pois nota-se que a composição de cada se altera sem nenhuma relação com os dias da semana ou do mês, o que inviabilizaria tal construção do modelo;
- (b) os registros realizados pelo sistema de aquisição de dados merecem ainda um ajuste mais adequado afim de medir somente perturbações e não falsas variações. Cabe ressaltar, que ajustes só podem ocorrer com o uso intensivo do sistema;
- (c) o modelo clássico tem dificuldade em retratar o transitório ocorrido, bem como, linearizar a parte do regime permanente;
- (d) o modelo canadense para ter um desempenho satisfatório deve se ater simplesmente ao distúrbio não modelando o regime permanente ao mesmo tempo. Isto deve-se ao fato de ser um modelo de ordem reduzida;

---

(e) o modelo australiano possui esta possibilidade (de ter ordem variável), o que possibilita uma melhor representação da carga em alguns casos, cabe ao usuário do sistema definir qual a ordem do sistema que melhor se adapta a representação dinâmica de carga;

(f) os modelos desenvolvidos podem ser utilizados em estudos de fluxo de potência e de estabilidade, o que possibilita o desenvolvimento de análise mais realísticas do sistema, podendo contribuir assim para a diminuição das margens de segurança e para uma maior economia do sistema.

Atualmente, o pacote computacional descrito nesta dissertação encontra-se em utilização pelos engenheiros do planejamento da operação da CEMIG.

\* \* \*

## CAPÍTULO 7

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## CAPÍTULO 7

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sauerbrey, K., Nguyen, C.T. and Robichaud, Y., "Closed Loop Load Response to Random Perturbations", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 1, PAS-98, pp.1591-6, Sep/Oct 1979.
- [2] Sauerbrey, K., Nguyen, C.T. and Robichaud, Y., "On Line Load Behavior Modeling from Natural Variations", Paper A 78-0440, IEEE Winter Power Meeting, 1978.
- [3] Sauerbrey, K., Nguyen, C.T., Robichaud, Y., Penning, J.G. and St-Jacques, R., "Load Characteristics on the Stability of the Hydro-Québec System", IEEE Summer Power Meeting A79438-3.

---

**CAPÍTULO 7****REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Srinivasan, K., Nguyen, C.T., Robichaud, Y., St-Jacques, A. and Rogers, G.J. "Load Response Coefficients Monitoring System: Theory and Field Experience". IEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp.3818-26, n° 8 , August 1981.
- [2] Srinivasan, K., Nguyen, C.T. and Robichaud, Y.. "Closed Loop Load Response to Random Pertubations". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.1 PAS-98, pp.1591-6, Sep/Oct 1979.
- [3] Srinivasan, K., Nguyen, C.T. and Robichaud, Y.. "On Line Load Behavior Modelling from Natural Variations". Paper A 78-0440, IEEE Winter Power Meeting, 1978.
- [4] Srinivasan, K., Nguyen, C.T., Robichaud, Y., Panneton, J.G. and St-Jacques, A.. "Load Characteristics an the Stability of the Hydro-Québec System". IEEE Summer Power Meeting A79438-3.

- [5] Dovan, T., Dillon, T.S., Berger, C.S. and Foward, K.E.. "A Microcomputer Based On-line Identification Approach to Power System Dynamic Load Modelling". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, N°3, August 1987.
- [6] Brereton, D.S., Lewis, D.G. and Young, C.C.. "Representation of Induction - Motor Loads During Power System Stability Studies". AIEE Transactions, Vol.76, pp.451-460, August 1957.
- [7] IEEE Joint Working Group on Load Characteristics. "The effect of frequency and voltage on power system load". IEEE Winter Power Meeting, New York, N. Y., January 30-February 4, 1966.
- [8] Webler, R. M. and Young, C. C.. "A new digital computer program for predicting dynamic performance on electric power systems". PICA Conf. Rec., pp. 21 - 29, Pittsburgh, May 15-17, 1967.
- [9] Southern California Edison Co, "Transient Load Voltage Characteristic Tests", USA, 1967.
- [10] Kent, M.H., Schmus, W.R., McCrackin, F.A. and Wheeler, L.M.. "Dynamic Modelling of Loads in Stability Studies". ASME/IEEE Joint Power Generation Conference, San Francisco, Sept. 15-19, 1968.
- [11] Funk, G.. "The Voltage Dependence of Three-phase Loads". Proceedings of the 3rd Power Systems Computations Conference, Paper NA7, 1969.

- [12] IEEE Tutorial Course. "The Representation of System Load in Stability Studies". Text 70M62-PWR, pp 41-46, 1970.
- [13] Berg, G. J. and Kar, A. K.. "Model Representation of Power System Loads". PICA Conference, Paper 71 C 26-PWR, 1971.
- [14] Dandeno Clairman, P.L., Brown, H.H., Dubé C., Johnston, D.W., Kowlakas, C., Lewis, W.A., Olive, D.W., Shipley, R.B., Skooglund, J.W., Stagg, G.W., Tinney, W.F., Young, C.C. and Watson, W.. "System Load Dynamics - Simulation Effects and Determination of Load Constants". IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, Calif., pp. 600 - 609, July 9-14, 1972.
- [15] Iliceto, F., Ceyhan, A. and Ruckstuhi, G.. "Behavior of Loads During Voltage Dips Encountered in Stability Studies, Field and Laboratory Tests". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 2470-2479, Nov/Dec 1972.
- [16] Mauricio, W. and Semlyen, A.. "Effect of Load Characteristic on the Dynamic Stability of Power Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, N°.6, pp. 2295-2304, Nov/Dec 1972.
- [17] Berg, G.J.. "System and Load Behavior Following Loss of Generation - Experimental Results and Evaluation". Proceedings of IEE, Vol. 119, N° 10, pp. 1483-1486, 1972.

- [18] Berg, G.J.. "Power System Load Characteristics". Canadian Communications and EHV Conference, Montreal, pp. 124-125, November 1972.
- [19] Kar, A.K. and Berg, G.J.. "System Performance Simulation with Improved Load Representation". IEEE-PES Winter Meeting, New York, Paper C72 147-2, 1972.
- [20] IEEE Committee Report. "System Load Dynamics - Simulation Effects and Determination of Load Constants". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, pp.600-609, Mar/Apr 1973.
- [21] Berg, G.J.. "Power System Load Representation". Proceedings of IEE, Vol. 120, N° 3, pp. 344-348, 1973.
- [22] Dandeno, P.L., Hauth, R.L. and Schulz, R.P.. "Effects of Synchronous Machine Modelling in Large Scale System Studies". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, pp. 574-582, Mar/Apr 1973.
- [23] Iliceto, F. and Capasso, A.. "Dynamic Equivalents of Assynchronous Motor Loads in System Stability Studies". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pp. 1650-1659, Sept/Oct 1974.
- [24] Keyhani, A.. "Stochastic Load Modelling and Optimal Dynamic Generation Control in Power System". School of Electrical Engineering, Purdue University, TR-EE 75-11, 1975.

- [25] Price, W. W. and others, "Dynamic Equivalents from On-Line Measurements", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-94, pp. 1349-1357, 1975.
- [26] Srinivasan, K. and Pronovost, R.. "Short-Term Load Forecasting Using Multiple Correlation Models". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 94, pp. 1854, 1975.
- [27] Akutsu, T. and Moroe, U.. "Results of Field Measurement of Load Voltage Dependences". Power Engineering Technical Committee, IEE of Japan, ET-75-15, 1975.
- [28] Ibrahim, M.A.H., Mostafa, O.M. and El-Abiad, A.H.. "Dynamic Equivalents using Operating Data and Stochastic Modeling". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, N° 5, pp. 1713 - 1722, Sept/Oct-1976.
- [29] Alden, R.T.H. and Zein el-Din, H.M.. "Effect of Load Characteristics on Power System Dynamic Stability". IEEE PES Summer Meeting, Paper A76-363-2, Portland, July 1976.
- [30] Schakshaft, G., Symons, O.C. and Hadwick J.G.. "General Purpose Model for Power System Loads". Proceeding IEE, Vol. 124, N° 8, pp. 715-723, August 1977.
- [31] Lee, C.C. and Tan, O.T.. "A Weighted Least Squares Parameter Estimator for Synchronous Machines". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, N° 1, pp. 97-101, Jan/Feb 1977.

- [32] Goto, M., Isono, A. and Okuda, K.. "Analytical Method of Power System Transient Stability Including the Effects of Dynamic Characteristics of Load". IEEE Transactions, Vol. 97-B, N°. 11, pp. 685-692, 1977.
- [33] Takeda, S. and Uemura, K.. "Voltage Stability Condition of Power System and the Effect of Load Characteristics". Electrical Engineering in Japan, Vol. 97, N°. 5, pp. 59-63, 1977.
- [34] Nguyen, C. T., Robichaud, Y., Podesto, B. and Hung, M.. "Determination of Power System Load Characteristics Using a Real Time Digital Data Acquisition System". CIGRE 1978 General Session, September 1978.
- [35] Shackshaft, G. and Ashmole, P.H.. "The Influence of Load Characteristics on Power System Performance - a C.E.G.B. Viewpoint". CIGRE 1978 Session Paper 31-02, 1978.
- [36] Murdoch, A. and Simons, N.W.. "The Effects of Load Characteristics on Power System Stability". American Power Conference, Vol. 40, pp. 1209-1221, 1978.
- [37] Ihara S. and Others. "Report on Load Modelling Methodology". System Eng'for Power V, Interim Report, Henniter N. H., August 1979.
- [38] Chen, M.S. "Determining Load Characteristics for Transient Performance". EPRI Report EI-849, Project RP849-3, Palo Alto, California, May 1979.

- [39] Akutsu, T. and H. Inoh, "Development of Continuous Monitoring Device for Measuring Load Behavior". National Convention of IEE, N°. 789, Japan, 1979.
- [40] Brickell, M.R. "Simulation of Staged Tests in the Ontario Hydro Northwestern Region". Proceedings of the 1979 PICA Conference, Cleveland, pp.357-364, 1979.
- [41] Richards, G.G. and Tan, O.T.. "Induction Motor Load Aggregation for Transients Stability Studies by Constrained Parameter Estimation". IEEE PES Summer Meeting, Paper N°. A79-482-1, Vancouver, July 1979.
- [42] "Real Time Digital Data Acquisition System for Determining Load Characteristics", IREQ - EPRI Report EL- 851, Project 849-2, Palo Alto, California, 1980.
- [43] Broehl, J. H.. "An End Use Approach to Demand Forecasting". Paper 80-SM 503-3, IEEE PES Summer Meeting, July 1980.
- [44] Meyer, F.J.. "Dynamic State Space Power System Load Model". University of Houston, M.S. Thesis, 1980.
- [45] "Standard Industrial Classification - 1980", Statics Canada, 1980.
- [46] Gentili, T., Ihara, S., Murdoch, A. and Simons, N.. "Determining Load Characteristics for Transient Performance". EPRI Report EL-850, Project RP849-1, Palo Alto, California, 1981.



- [47] Kalinowsky, S.A. and Forte, M.N.. "Steady State Load-Voltage Characteristic Field Tests at Area Substations and Fluorescent Lighting Component Characteristics". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, N° 6, pp. 3087 - 3094, June 1981.
- [48] Zabar, Z. and Pinto, J.F.. "Start-up Response of a Secondary Distribution Network". Part I: Dynamic Model of Appliance Start-up", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, N° 6, pp. 3143 - 3146, June 1981.
- [49] Pinto, J.F. and Zabar, Z. "Start-up Response of a Secondary Distribution Network". Part II: Load Analysis, Lab Tests and Start-up Simulation, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, N° 6, pp. 3147 to 3151, June 1981.
- [50] Ihara, S., Paulsen, G.L. and Simons, N.W.. "Bismarck Load Behavior During Field Tests". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, N° 11, pp. 4540 - 4545, November 1981.
- [51] Concordia, C. and Ihara, S.. "Load Representation in Power System Stability Studies". IEEE Paper 81-SW-345-6, IEEE Summer Meeting, 1981.
- [52] Inoh, H., Hirasawa, O. and Nishimura, K. "System for Analyzing Load Characteristics Based Upon Continuous Monitoring". Tokyo Branch Convention of IEE, Japan, N° 115, 1981.

- [53] Frowd, R.J., Podmore, R. and Waldron, M.. "Synthesis of Dynamic Load Models for Stability Studies". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N° 1, pp. 127 to 135, January 1982.
- [54] Concordia, C. and Ilhara, S.. "Load Representation in Power System Stability Studies". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N° 4, pp. 969 to 977, April 1982.
- [55] Ribeiro, J.R. and Lange, F.J.. "A New Aggregation Method for Determining Composite Load Characteristics". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N° 8, pp. 2869 - 2875, August 1982.
- [56] Meyer, F.J. and Lee, K.Y.. "Improved Dynamic Load Model for Power System Stability Studies". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N° 9, pp. 3303 - 3309 (4696), September 1982.
- [57] Kogai, K., Kinouchi, S. and Nishimura, K.. "Investigation on System Load Dynamics Against Voltage Change". 1982 National Convention of IEE, Japan, N° 920, 1982.
- [58] Kogai, K., Kinouchi, S., Nishimura, K. and Tsuruta, S.. "Variations in System Load Characteristics in a Day and in a Year". 1982 National Convention of IEE, Japan, N° 921, 1982.
- [59] Sabir, S.A.Y. and Lee, D.C.. "Dynamic Load Models Derived from Data Acquired During System Transients". IEEE Transaction on Power Systems, Vol. PAS-101, N° 4, pp. 3365-3372, April 1982.

- [60] Wong, D.C. et al. "Dynamic Load Model Synthesis". Proceedings of IEE, Vol. 132, Part C, N° 4, pp. 179-188, 1983.
- [61] Wilson, W. J. and Aplevich, J.D.. "Dynamic Equivalent Power System Models". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, N° 12, pp. 3753 - 3760, December 1983.
- [62] Yamashita, K., Watanabe, M., Kinouchi, S., Nishimura, K. and Tsuruta, S.. "Relation Between Load Model Parameters and Load Compositions". 1983 National Convention of IEE, Japan, N° 875, 1983.
- [63] Craven, R.H. and Michael, M.R.. "Load Characteristic Measurements and Representation of Loads in the Dynamic Simulation of the Queensland Power Systems". 1983 CIGRE and IFAC Symposium, Florence, Paper S39-83, 1983.
- [64] Winter, W.H. and Cowbourne, D.R.. "The Bruce Load and Generation Rejection Scheme". CIGRE and IFAC Symposium, Florence, 1983.
- [65] Abledu, K.O., Ph.D. Thesis, "Equivalent Load Model of Induction Machines Connected to a Common Bus". Iowa State University, 1983.
- [66] Rogers, G.J., Di Manno, J. and Alden, R.T.H.. "An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-103, N° 4, pp.683-690, April 1984.

- [67] Sekine, Y. and Yokoyama, A.. "Dynamic Stability Analysis Taking into Account Load Flow Multisolutions and Load Characteristics". Proceedings of Power System Computation Conference, 1984.
- [68] Frantz, T., Gentile, T., Ihara, S., Simons, N. and Waldron, M.. "Load Behavior Observed in LILCO and RG&E Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, N<sup>o</sup>. 4, pp. 819 - 831, April 1984.
- [69] Ohyama, T., Watanabe, A., Nishimura, K. and Tsuruta, S.. "Voltage Dependence of Composite Loads in Power Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, N<sup>o</sup>. 11, pp. 3064 - 3073, November 1985.
- [70] Dovan, T., Dillon, T.S. and Berger, C.S.. "Model Structure Select for On-line Modelling of Power System Loads". Proceedings of IFAC Symposium on System Identification, July 1985.
- [71] Roelofs, G.P.T., van der Veer, J.H.C. and Wichem, P.H.. "Determination of the Dynamic Model of Electric Power Plants". Kema Scientific & Technical Reports Vol. 3-11, pp. 139-149, November 1985.
- [72] Chu, W.C. Ph.D. Thesis. "Load Model of Power System". University of Texas at Arlington, 1986.

- [73] Vaahedi, E., El-Kady, M.A., Esaine, J.A.L. and Carvalho, V.F.. "Load Models for Large-Scale Stability Studies from End-User Consumption". IEEE PES Summer Meeting, Paper N°. 86SM355-2, Mexico City, July 1986.
- [74] Langevin, M. and Auriol, P.. "Load Response to Voltage Variation and Dynamic Stability". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, N°. 4, pp. 112-118, Nov 1986.
- [75] Chu, T.C., Lee, W.J. and Chen, M.S.. "Load Model for Load Flow Studies". IEEE - IAS 87, pp. 1319 - 1324, 1987.
- [76] Price, W.W. et al., "Load Modelling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies". IEEE PES Winter Meeting, Paper 87WM080-5, New Orleans, 1987.
- [77] Vaahedi, E., Zein El-Din, H.M. and Price, W.W.. "Dynamic Load Modelling in Large Scale Stability Studies". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, N°. 3, PP. 1039 - 1045, August 1988.
- [78] Welfonder, E., Weber, H. and Hall, B.. "Investigations of the Frequency and Voltage Dependence of Load Part Systems using a Digital Self-acting Measuring and Identification System". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, N°. 1, PP. 19 - 25, February 1989.
- [79] Da-Qiang, M. and Ping, J.. "A Novel Approach to Dynamic Load Modelling". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, N°. 2, PP. 396 - 402, May 1989.

- [80] Edithy, K.A. and Choudhry, M.A.. "Effect of Load Models on AC/DC System Stability and Modulation Control Design". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, N° 2, PP. 411 - 418, May 1989.
- [81] Vital, V., Bhatia, N., Fouad, A.A., Maria, G.A., Zein, H.M. and El-Din, "Incorporation of Nonlinear Load Models in the transient Energy Function Method". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, N° 3, PP. 1031 - 1037, August 1989.
- [82] Torres, G.L., Valiquette, B. and Mukhedkar, D.. "Fuzzy Load Modelling in Real Time". NPSC '88: Fifth National Power Systems Conference, Conference Papers Bangalore, India (Central Power Res. Inst. 1988), pp. 59-63, 8-10 Sept. 1988
- [83] Torres, G.L. and Mukhedkar, D.. "Distribution Feeder Load Modelling: An Approach Using Fuzzy Sets". European Conference on Circuit Theory and Design (Conf. Pub. N° 308), pp. 634-643, (London, IEE 1989), Brighton, UK, 5-8 Sept. 1989
- [84] General Electric Company. "Load Modelling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies". EPRI Final Report EL-50003, January 1987 (descrição do programa LOADSYN)
- [85] Mansour, Y.. "Application of Eigenanalysis to the Western North American Power System". IEEE Pub. 90TH0292-3, Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance, 1990.

- [86] CIGRÉ Task Force 38.02.05. "Load Modelling and Dynamics". Electra, May 1990.
- [87] IEEE Task Force Report. "Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience". IEEE Pub. 90TH0358-2 PWR, 1990.
- [88] Chiou, C.Y., Hang, C.H., Liu, A.S., Chen, Y.T., Li, T.H. and Lin, C.J.. "Development and Application of Microprocessor-based Load Transient Data Recording System". IASTED International Conference, Power High Technique 1991, Taiwan, March 1991.
- [89] Srinivasan, K. and Juras, R. "Power System Disturbance Monitoring System". Proc. IEEE T&D Conference, pp. 261-265, Dallas, Sept. 1991.
- [90] Yuan, J.L., Chiang, H.D., Liu, C.J., Li, T.H., Chen, Y.T. and Chiou, C.Y.. "Towards Constructing Optimal Feedforward Neural Networks with Learning and Generalized Capabilities". Proc. of ANNPS, 91TH0374-9, Seattle, pp. 227-231, 1991.
- [91] Lin, C.E. and et al., "Scientific Data Conversion Models for Dynamics Load Modelling". International Journal of Energy Systems, Vol. 10, N° 3, pp. 117-121, 1990.
- [92] Karlsson, D., Lindén, K., Seferqvist, I. and Stenborg, B.. "Temporary Load-Voltage Characteristics for Voltage Stability Studies - Field and Laboratory Measurements". CIGRÉ Paper 38-204, Paris, 1992.

- [93] Karlsson, D. and Hill, D.J.. "Modelling and Identification of Non-Linear Dynamics Loads in Power Systems". IEEE PES Paper #93WM171-9 PWRs, 1993.
- [94] Hill, D.J.. "Nonlinear Dynamics Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, Nº. 1, Feb. 1993.
- [95] Xu, W. and Mansour, Y.. "Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models". IEEE paper #93WM185-9 PWRs, 1993.
- [96] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance - "Load Representation for Dynamic Analysis". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, Nº 2, pp. 472-482, 1993.
- [97] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance - "Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation". IEEE Paper #94SM579-3 PWRs, 1994.
- [98] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance - "Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation". IEEE Paper #94SM580-1 PWRs, 1994.
- [99] Valgas, H. M., Costa Jr., R.A. *et al.*. "Electrical Load Modelling". IV Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, IV SEPOPE, Foz do Iguaçu, 23 a 27 de maio de 1994.

## ANEXO I

## MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

## 1.1 AJUSTAMENTO DE CURVAS

## ANEXO I

## MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Para auxiliar a determinação de uma equação que relacione as variáveis, o primeiro passo consiste em coletar os dados que indiquem os valores correspondentes das variáveis consideradas.

No diagrama de dispersão é possível visualizar uma curva regular que se aproxima dos dados. Esta curva é denominada de ajustamento. Na Figura 1.1 (a), por exemplo, os dados parecem estar bem próximos de uma linha reta, e diz-se que há uma *relação linear* entre as variáveis. Na Figura 1.1 (b), entretanto, embora exista uma relação entre as variáveis, ela não é daquele tipo, e é denominada *relação não-linear*.



## ANEXO I

### MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

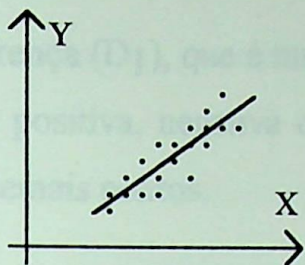
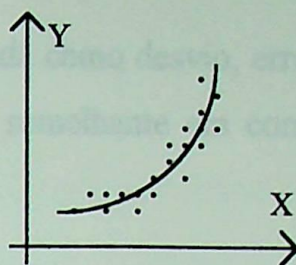
#### I.1. AJUSTAMENTO DE CURVAS

Com muita freqüência, na prática, verifica-se que existe uma relação entre duas ou mais variáveis. Deseja-se então expressar essa relação sob uma forma matemática, por meio do estabelecimento de uma equação que ligue as variáveis.

Para auxiliar a determinação de uma equação que relacione as variáveis, um primeiro passo consiste em colecionar dados que indiquem os valores correspondentes das variáveis consideradas.

No diagrama de dispersão é possível visualizar uma curva regular que se aproxime dos dados. Essa curva é denominada de *ajustamento*. Na Figura I.1 (a), por exemplo, os dados parecem estar bem próximos de uma linha reta, e diz-se que há uma *relação linear* entre as variáveis. Na Figura I.1 (b), entretanto, embora exista uma relação entre as variáveis, ela não é daquele tipo, e é denominada *relação não-linear*.



**Figura I.1 (a) - Curva Linear****Figura I.1 (b) - Curva não-Linear**

Existem vários tipos de curvas de ajustamento e suas equações, e determinar seus parâmetros pode ser realizado de diversas formas ou métodos.

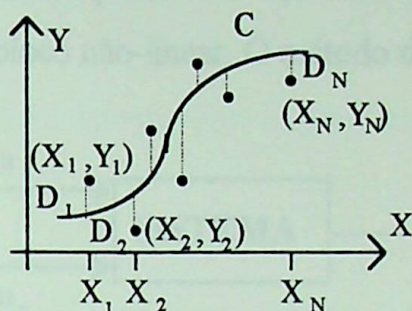
Por exemplo, pode-se usar o critério individual para traçar uma curva de ajustamento que se adapte a um conjunto de dados. É denominado método de ajustamento de curva a mão livre. Se é conhecido o tipo de equação dessa curva, é possível obter suas constantes mediante a escolha de tantos pontos da curva e quantas as constantes da equação. O método tem a desvantagem de observadores diferentes obterem curvas e equações diferentes.

## I.2. DEFINIÇÃO DO MÉTODO

Para evitar o critério individual na construção de retas, parábolas ou outras curvas de ajustamento que se adaptem ao conjunto de dados, é necessário instituir uma definição da "melhor curva de ajustamento".

Para se conseguir uma definição possível deve-se considerar a Figura I.2, na qual os dados estão representados pelos pontos  $(X_1, Y_1)$ ,  $(X_2, Y_2)$ , ...,  $(X_N, Y_N)$ . Para um valor dado de  $X$ , por exemplo  $X_1$ , haverá uma diferença entre  $Y_1$  e o valor correspondente determinado na curva  $C$ . Conforme representado na Figura,

essa diferença ( $D_1$ ), que é muitas vezes designada como desvio, erro ou resíduo, pode ser positiva, negativa ou nula. De modo semelhante em correspondência com os demais pontos.



**Figura L2 - Curva de ajustamento com os desvios**

Uma medida da "qualidade de ajustamento" da curva C aos dados apresentados (aderência) é proporcionada pela quantidade  $D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_N^2$ . Se ela é pequena, o ajustamento é bom; se é grande, o ajustamento é mau. Portanto pode-se adotar a seguinte definição:

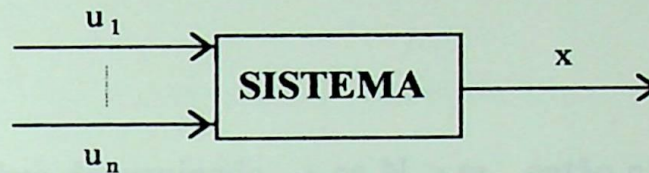
**DEFINIÇÃO:** De todas as curvas que se ajustam a um conjunto de pontos, a que tem propriedade de apresentar o mínimo valor de  $D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_N^2$  é denominada a *melhor curva de ajustamento*.

Diz-se que uma curva que apresenta essa propriedade ajusta os dados no *sentido dos mínimos quadrados* e é denominada *curva de mínimos quadrados*.

Caso existam "N" conjuntos de dados podem-se ter "N" equações apresentando o menor desvio dos mínimos quadrados.

### I.2.1 Relações não-Lineares

As relações não-lineares podem, às vezes, ser transformadas em lineares, mediante a transformação adequada das variáveis. O diagrama da Figura I.3 apresenta um sistema de bloco não-linear. O método dos mínimos quadrados



**Figura I.3 - Diagrama de Bloco do Sistema**

$$\text{Modelo: } x = \theta_0 + \theta_1 \cdot u_1 + \dots + \theta_m \cdot u_m$$

Para reescrever a equação acima em forma vetorial, escreve-se o primeiro termo como  $\theta_0 \cdot u_0$  sendo  $u_0$  igual a 1, ou elimina-se  $\theta_0$  subtraindo-se as medidas de uma referência.

$$x = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_m] \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_m \end{bmatrix} = \underline{U}^t \cdot \underline{A} \quad (\text{I.1})$$

Caso existam "N" conjuntos de medidas, então:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{m1} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{1N} & \dots & u_{mN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad \therefore \underline{X} = \underline{U}^* \underline{A} \quad (\text{I.2})$$

### I.2.2 Condições para a Solução do Sistema de Equações

1) Sistema sub-determinado  $\rightarrow$  se  $N < m$  então existem infinitas combinações de  $\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_m$  que satisfazem ao sistema de equações;

2) Solução única  $\rightarrow$  se existem  $N = m$  conjuntos de dados independentes então  $\hat{\underline{A}} = \underline{\underline{U}}^{-1} \cdot \underline{\underline{X}}$ ; e

3) Sistema sobre-determinado  $\rightarrow$  se  $N > m$ , então não existe solução que satisfaça a todos os dados. Introduce-se então um requisito adicional: minimizar uma função custo em termos de  $\theta_1, \dots, \theta_m$ .

### I.2.3 Função-Custo

Define-se o vetor de erro

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - \tilde{x}_1 \\ \vdots \\ x_N - \tilde{x}_N \end{bmatrix} = \underline{\underline{X}} - \underline{\underline{U}} \cdot \hat{\underline{A}} \quad (\text{I.3})$$

onde  $\tilde{x}_i = \hat{\theta}_1 \cdot u_{i1} + \dots + \hat{\theta}_m \cdot u_{im}$ , isto é, a saída do modelo.

Define-se a função custo como:

$$F = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 = \underline{\underline{\varepsilon}}^t \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} = (\underline{\underline{X}} - \underline{\underline{U}} \cdot \hat{\underline{A}})^t \cdot (\underline{\underline{X}} - \underline{\underline{U}} \cdot \hat{\underline{A}}) \quad (\text{I.4})$$

Minimizando a função custo, tem-se:

$$\frac{\partial F}{\partial \underline{A}} = \frac{\partial [\underline{X}^t \cdot \underline{X} - \underline{X}^t \cdot \underline{U} \cdot \underline{A} - \underline{A}^t \cdot \underline{U}^t \cdot \underline{X} + \underline{A}^t \cdot \underline{U}^t \cdot \underline{U} \cdot \underline{A}]}{\partial \underline{A}} = \underline{0} \quad (1.5)$$

$$-\underline{U}^t \cdot \underline{X} - \underline{U}^t \cdot \underline{X} + 2 \cdot \underline{U}^t \cdot \underline{U} \cdot \underline{A} = \underline{0} \quad (1.6)$$

$$\underline{A}^* = (\underline{U}^t \cdot \underline{U})^{-1} \cdot \underline{U}^t \cdot \underline{X} \quad (1.7)$$

O termo  $(\underline{U}^t \cdot \underline{U})^{-1} \cdot \underline{U}^t$  é denominado pseudo-inversa.

Se o modelo linear for o modelo exato do sistema, e  $\underline{A}$  for o vetor de parâmetros corretos, então as medidas podem ser escritas como:

$$x_i = \underline{U}_i^t \cdot \underline{A} + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, r \quad (1.8)$$

onde  $\varepsilon_i$  representa os resíduos das medidas. Os resíduos podem ser considerados como ruído adicionado às saídas verdadeiras. Se o modelo linear não for um modelo exato para o sistema, então os resíduos podem representar também erros de modelagem. Se as características estatísticas do ruído não se alteram durante o período de medição, então o estimador baseado no critério de mínimos quadrados é um estimador "BLUE" (Best Unbiased Linear Estimator).

#### 1.2.4 Séries Temporais

Se a variável independente corresponder ao tempo, os dados representarão os valores da variável dependente em diversos momentos. Os dados ordenados em relação ao tempo são denominados séries temporais. A curva de regressão, neste caso, é denominada de tendência e é normalmente empregada para as finalidade de avaliação, predição ou previsão.

**ANEXO II**  
**COVARIÂNCIA**

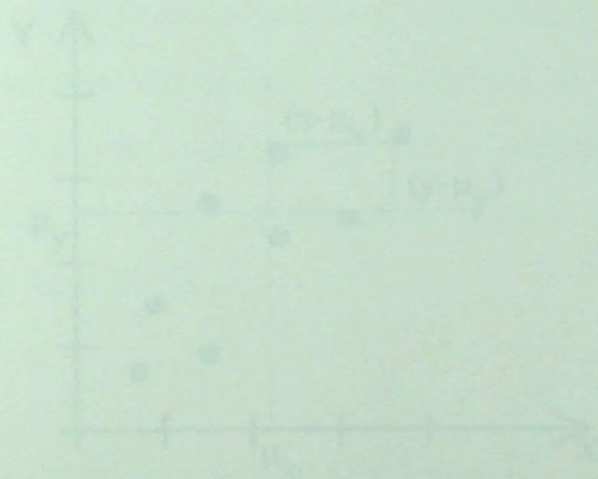


FIGURA II.1 - Gráfico de pontos colineares definindo os eixos médios  $(\bar{X}, \bar{Y})$  que traduzem as médias para a nova posição de referência.

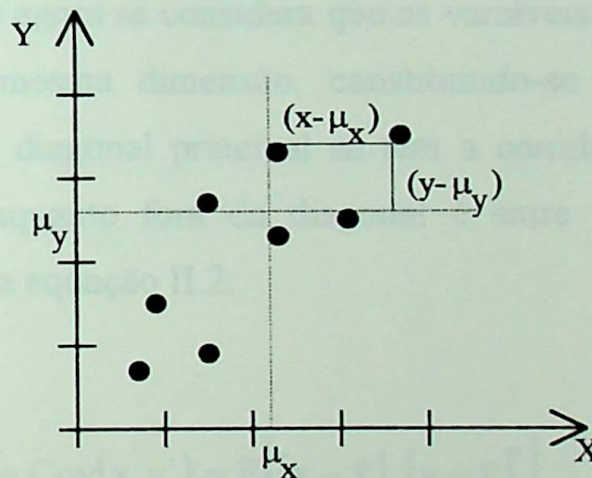
A interpretação geométrica da figura é a translação dos eixos médios. É possível observar que se o valor da covariância for positivo é porque os pontos se movem mais próximos das extremidades (1º e 3º quadrantes), já se for negativo eles tendem a se mover-se ao centro (2º e 4º quadrantes). Multiplicando então os

## ANEXO II

## COVARIÂNCIA

## II.1 APRESENTAÇÃO

Covariância pode ser definida como sendo a tendência de duas variáveis de se moverem em um plano em direções independentes. Para isto, devemos considerar os desvios a contar da média, conforme a Figura II.1.



**FIGURA II.1** - Gráfico de  $p(x,y)$  exibindo a definição de novas variáveis  $(X - \mu_x)$  e  $(Y - \mu_y)$  que transladam os eixos para a nova posição (tracejada)

A interpretação geométrica da figura é a translação dos eixos médios. E pode-se observar que se o valor da covariância for positivo é porque os pontos se movem mais próximos das extremidades (1º e 3º quadrantes); já se for negativo os pontos irão mover-se no centro (2º e 4º quadrantes). Multiplicando então os

desvios, obtém-se o produto  $(X - \mu_x) \cdot (Y - \mu_y)$ . Com isto, tem-se uma boa medida de como X e Y variam conjuntamente somando-se esses produtos. Isto é a covariância das duas variáveis.

$$\text{cov} = \sigma_{xy} = \sum_x \sum_y (X - \mu_x) \cdot (Y - \mu_y) \quad (\text{II.1})$$

E, para combinar mais de duas variáveis, constrói-se uma matriz de covariância, onde se pode adotar o mesmo processo anterior.

## II.2 MONTAGEM DAS MATRIZES DE COVARIÂNCIA

As matrizes de covariância possuem os mesmos conceitos dados anteriormente, só que agora se considera que as variáveis x e y serão vetores  $\underline{X}$  e  $\underline{Y}$ , apresentando a mesma dimensão, constituindo-se então uma matriz de covariância, onde na diagonal principal se tem a correlação existente entre as variáveis  $x_i$  e  $y_i$ , enquanto fora da diagonal é entre as variáveis de índice diferentes, conforme a equação II.2.

$$\underline{\underline{C}} = \text{Cov}(x, y') = E \left\{ [\underline{x} - \bar{\underline{x}}] \cdot [\underline{y} - \bar{\underline{y}}]' \right\} \quad (\text{II.2})$$

que pode ser escrita como:

$$\underline{\underline{C}} = \frac{\sum [\underline{x}(t) - \bar{\underline{x}}(t)] \cdot [\underline{x}(t-1) - \bar{\underline{x}}(t-1)]'}{\text{NA}} \quad (\text{II.3})$$

ou:

$$\underline{\underline{C}} = \frac{\sum \left[ \begin{matrix} x_1 - \bar{x}_1 & x_2 - \bar{x}_2 & \dots & x_i - \bar{x}_i \end{matrix} \right] \cdot \begin{bmatrix} y_1 - \bar{y}_1 \\ y_2 - \bar{y}_2 \\ \vdots \\ y_i - \bar{y}_i \end{bmatrix}}{NA} \quad (\text{II.4})$$

**OBSERVAÇÃO:** NA é o número de amostras do intervalo.

Obtendo a matriz:

$$\underline{\underline{C}} = \begin{bmatrix} (x_1 - \bar{x}_1) \cdot (y_1 - \bar{y}_1) & (x_1 - \bar{x}_1) \cdot (y_2 - \bar{y}_2) & \dots & (x_1 - \bar{x}_1) \cdot (y_i - \bar{y}_i) \\ (x_2 - \bar{x}_2) \cdot (y_1 - \bar{y}_1) & (x_2 - \bar{x}_2) \cdot (y_2 - \bar{y}_2) & \dots & (x_2 - \bar{x}_2) \cdot (y_i - \bar{y}_i) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (x_i - \bar{x}_i) \cdot (y_1 - \bar{y}_1) & (x_i - \bar{x}_i) \cdot (y_2 - \bar{y}_2) & \dots & (x_i - \bar{x}_i) \cdot (y_i - \bar{y}_i) \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

E mantendo uma correlação entre todas as variáveis do sistema e tendo a aplicação demonstrada no capítulo 4.

ANEXO III

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Este Anexo apresenta as principais características do Sistema de Aquisição

**ANEXO III**

**CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS**

As principais características deste sistema são:

Microcomputador:	microprocessador 80286
	clock de 12 MHz
	co-processador matemático 80287
	disco rígido de 60 MBytes
	leitor de disco flexível de 360 K
	memória convencional de 1 MB
	memória expandida de 14 MB



### ANEXO III

## CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Este Anexo apresenta as principais características do Sistema de Aquisição de Dados AT.CON, pertencente à CEMIG, que foi utilizado para registrar os dados obtidos no Anexo V.

O sistema mede e digitaliza sinais de tensão e corrente no ramal em que está ligado, calculando em seguida os valores de potência ativa e reativa. A frequência é medida por uma carta digital especificamente dedicada a esta finalidade.

As principais características deste sistema são:

Microcomputador:	microprocessador 80286
	clock de 12 MHz
	co-processador matemático 80287
	disco rígido de 60 MBytes
	leitor de disco flexível de 360 KBytes
	memória convencional de 640 KBytes
	memória expandida de 1,4 MBytes

Conversores rápidos A/D:	resolução de 12 bits
	tempo de conversão de 25 $\mu$ s
	25 entradas analógicas

Cartão de freqüência:	sinal de entrada de 0 a 10 Vac
	variação de freqüência de 50 à 70 Hz

O microcomputador é conectado a transformadores de potencial e de corrente por uma interface construída especialmente para este propósito. O programa de aquisição de dados permite o começo do registro de perturbações com disparos por:

- sobretensão ou subtensão;
- sobrefreqüência ou subfreqüência;
- valores acima da referência de potência ativa ou reativa

O intervalo de amostra é de 1750 (vezes por segundo) por canal (em um total de 8 canais em paralelo).



## ELECTRICAL LOAD MODELLING

Hélio Moreira Valgas  
Roberto del Guidice R. Pinto  
Carlos França

Germano Lambert-Torres  
Alexandre P. Alves da Silva  
Robson Celso Pires  
Roberto Affonso Costa Jr.

CEMIG

EFEI

### ABSTRACT

Accurate dynamic load models allow more precise calculations of power system controls and stability limits, which are critical mainly in the operation planning of power systems. This paper describes the development of a computer program (software) for static and dynamic load model studies using the measurement approach for the CEMIG system. Two dynamic load model structures are developed and tested. A procedure for applying a set of measured data from an on-line transient recording system to develop load models is described.

**Keywords:** Load models, composite load-voltage characteristics, voltage stability, voltage collapse, dynamics.

### 1. INTRODUCTION

The behavior of loads (i.e. their active and reactive power consumption) connected to low voltage (LV) and high voltage (HV) substations is often poorly represented in programs simulating the system dynamics. However, this behavior can be decisive in numerous studies of the electrical system. Evaluation of the voltage stability of a system, the perfecting of a load-shedding strategy in the event of serious incidents, and the evaluation of primary reserves are typical examples of investigations particularly sensitive to load models. When developing a satisfactory system of load modelling, the main difficulty is associated with the diversity of electrical equipment connected to the system, their geographical distribution and the stochastic aspect of their closure and tripping. In practice, there is no single accurate model of the load, but series of models for different sectors, representing the load seen at LV or HV level, which are valid particularly with regard to statistics.

Two complementary approaches are usually adopted to build these models: component-based approach and measurement-based approach. The first approach aims to establish theoretical models knowledge by aggregating up the models of elementary loads (motors, converters, lighting, heating, etc.). The second approach is experimental. It aims to develop models for behavior by parametric identification of the measurement results obtained from the system.

In 1992, CEMIG (Utility of Minas Gerais State) launched studies in the second direction, jointly with EFEI (Federal School of Engineering at Itajuba). The results of the second approach are presented in this paper.

Also, this paper presents a computer program which allows the evaluation of the electrical load dynamic behavior. Later, new load models will be inserted into the load flow and stability programs.

### 2. CEMIG - EFEI PROJECT MOTIVATION

The exploration of the electrical power system aiming at the supply of an increasingly demanding market from the standpoint of quality and reliability, in addition to the fact that the system is often operated at risk condition, near its static or dynamic limit, has required the companies of the Brazilian Electrical Sector, specially in terms of the operation planning, to incorporate new methodological and technological solutions. Among the latest advancements, at CEMIG, we may quote the one associated with load modelling.

At CEMIG, the planning of electrical operation is currently responsible for operating studies covering a system with an installed generating capacity of 4,500 MW and a transmission net work comprising 20,000 km of lines. This

consists of EHV (500 and 345 kV) lines, with reflections at the level of the Brazilian South-Southeast Interconnected system, and HV (230, 139 and 69 kV) subtransmission lines which provide the interface with the 13.8 kV distribution network (responsible for serving some 3,800,000 consumers of the residential, commercial, industrial and rural classes).

Subtransmission networks also feed the important complex of big industrial consumers (fed in 230, 138, 69 and 34.5kV), currently accounting for 57 per cent (about one hundred great demand consumers) of the total market of the company, with steel-making, mining, ferroalloys, and chemicals being the major sectors.

This fact alone points out the strong need for the development of accurate load models. Another aspect is that load characteristics are known to have a significant effect on system dynamics (for example, voltage collapse studies). It has become clear that the chosen load modelling can impact predicted system performance as significantly as the models chosen (validated) for excitation and speed controls and synchronous machines, which have received special attention at CEMIG. In this regard, generator control system models of all CEMIG Power Plants (capacity above 50MVA) have already been developed by field tests. As standard models, four generator (at least), four excitation system, and two turbine-governor models have also been developed. The load data acquisition system, installed at CEMIG substations, do not employ analog transducers for real and reactive power measurements. It has been recognized that analog transducers have some disadvantages for this kind of data identification. Current technology allows direct digitization of voltage and current measurements with the real and reactive power calculation functions implemented by software in the office computer or into the recording system. The frequency is measured by a specific digital card. The main characteristics of this acquisition system (hardware) are as follows:

- microcomputer: microprocessor (80286 CPU)  
12 MHz clock  
mathematical co-processor (80287)  
60 Mbytes hard disk  
2 flexible disks (360 Kbytes)  
640 Kbytes conventional memory  
1.4 Mbytes expanded memory
- fast A/D converters: 12 bits resolution  
25  $\mu$ s conversion time  
16 analog inputs
- frequency card for PC: 0 to 10 Vac input signal  
50 to 70 Hz frequency variation.

The microcomputer is connected to potential (PT) and current (CT) transformers by an interface specially built for this purpose. The data acquisition software allows automatic firing, in the event of disturbance, by means of:

- under and overvoltage;
- under and overfrequency; and
- real and reactive power above reference value.

The sampling rate of load data recorder system is about 1,750 (times per second) per channel (with 8 channels in parallel).

### 3. PRESENTATION OF LOAD MODELLING METHODS

Firstly, two methods were selected to represent the dynamic load modelling. These models using by Hydro-Quebec (Canada) [1] and State Electricity Commission of Victoria (Australia) [2] were selected due to important characteristics, such as simplicity, flexibility and robustness. Other factor is the similarity between the Brazilian Power System and the Canadian and Australian Systems, namely remote generation centers, long transmission lines, and radial net configuration.

The classical approach using static models was also considered. It cannot accurately model the dynamics of most power system load, however many programs using by the industries cannot receive another kind of model.

So, three model (two dynamics and one static) will be used in this program, and will be presented briefly below.

#### 3.1 Static Model

The static model used can be expressed by (1), and is also known by constant impedance, constant current and constant power model.

$$\begin{aligned} P(\Delta v) &= P_0(a + b \cdot \Delta v + c \cdot \Delta v^2) \\ Q(\Delta v) &= Q_0(d + e \cdot \Delta v + f \cdot \Delta v^2) \end{aligned} \quad (1)$$

where:

- constants  $a$  and  $d$  specify the per unit change in real and reactive load that behaves as constant power,
- constants  $b$  and  $e$  specify the per unit change in real and reactive load that behaves as constant current, and
- constants  $c$  and  $f$  specify the per unit change in real and reactive load that behaves as constant impedance.

#### 3.2 Quebec Model

This method was developed in [1] and tries to model the behavior of the load using an existence of feed-back in power system. This model includes first order dynamics and expresses as in (2).

$$\begin{aligned} \Delta P(t) &= a \cdot \Delta P(t-1) + b \cdot \Delta Q(t-1) + c \cdot \Delta v(t) + d \cdot \Delta f(t) \\ \Delta Q(t) &= e \cdot \Delta P(t-1) + g \cdot \Delta Q(t-1) + h \cdot \Delta v(t) + i \cdot \Delta f(t) \end{aligned} \quad (2)$$

The constants  $a$  to  $i$  are calculated using a covariance matrix defined by:

$$[\text{cov}(x(t), x(s))] = E \{ [x(t) - \bar{x}(t)][x(s) - \bar{x}(s)]^T \}$$

and are members of the matrix  $H$  expressed by:

$$H = [\text{cov}(x(t), x(t-1))] [\text{cov}(x(t-1), x(t-1))]^{-1}$$

### 3.3 Australian Model

This method is based on a variable composition of a power system load, and a consequent variable model structure [2]. The method allows to promote the selection of the load model structure as well as the estimation of the model parameters (constants). The general form of load model is described by (3).

$$\begin{aligned}\Delta P(t) &= \sum_{i=1}^m a_i \cdot \Delta P(t-i) + \sum_{i=0}^n b_i \cdot \Delta v(t-i) + \sum_{i=0}^p c_i \cdot \Delta f(t-i) \\ \Delta Q(t) &= \sum_{i=1}^m d_i \cdot \Delta Q(t-i) + \sum_{i=0}^n e_i \cdot \Delta v(t-i) + \sum_{i=0}^p g_i \cdot \Delta f(t-i)\end{aligned}\quad (3)$$

The constants  $a$  and  $g$  are calculated using Least Squares method, while the values of  $nk$  ( $np$ ,  $nv$ , ...,  $nff$ ) define the structure of the model and are estimated according to the kind of the load.

The cost function which make the evaluation of the models is defined by:

$$J = \frac{N}{N-n} \sum_{k=1}^N (p(k) - \tilde{p}(k))^2 \quad (4)$$

where  $\tilde{p}(k)$  is the output of the model and given by:

$$\tilde{p}(k) = \sum_{i=1}^{n_p} \hat{a}_i \cdot p_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} \hat{b}_i \cdot v_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_f} \hat{c}_i \cdot f_{k-i} \quad (5)$$

and  $p_{k-i}$  is the actual load and the constants  $\hat{a}_i$ ,  $\hat{b}_i$  and  $\hat{c}_i$  are estimated by the least squares method.

## 4. APPLICATION OF LOAD MODELS IN THE OPERATION PLANNING

Digital programs, currently being used in the Brazilian Electrical Sector for electromechanical transient simulations, make use of static load models in polynomial, quadratic and exponential functions. Bus load may be represented by constant impedance, constant current and constant power or a combination of these three. The majority of the models do not represent the effect of undervoltage-tripped-loads and their reconnection after bus voltage returns to normal operation range values. Those digital programs do not allow load representation as a function of apparent power (VA) and power factor (PF); a formulation which is more consistent when PF is near 1.0 (load very compensated). The induction motor is the only load in which dynamic behavior is simulated. This load model may be represented by five differential equations corresponding to d and q axes. The load representation level, static and dynamic, ready for use in those programs, is limited when load data captured through the measurement approach is available. Item 3 showed two models more complex and complete than the ones actually being used in operation planning studies at Brazil. On the other hand, they require investments in computer programming with the aim of preparing and adjusting electromechanical transient simulation programs to allow their influence in power system dynamics [3,4]. These

new programs should be sufficiently flexible and allow the engineer (user) to model bus loads according to his necessity. The man-machine interface should be as friendly as possible. Naturally, the benefits gained from a reliable load representation should be compared with computer costs coming from memory expansion and CPU time [5,6].

The definition of standard load models, representing manufacturing process such as steel-making, mining, ferroalloys, chemicals, is a great challenge for engineers in the coming years. At CEMIG, in particular, this question is very weighty because its consumer market is predominantly industrial (about 60% of total load). With new load models, implemented and validated in simulation programs of electromechanical transients, operation planning studies will have increased their quality and reliability. Emergency schemes, load-shedding, disturbance analysis, stability limits, control system parameters and voltage collapse studies will be more successfully carried out.

## 5. PRESENTATION OF COMPUTER PROGRAM

This section presents the interfaces of the computer program for load modelling called LOADDYN. These user-friendly interfaces have been developed in Basic and the model programs in Fortran. A Main Program makes the general administration of the package and calls the model programs through specific batch files.

Figure 1 presents an example of how files can be selected by the user (option A - "Carrega arquivo"). The interface was written in Portuguese, and a system of pull-down menus have been developed.

Figure 2 presents what kind of model program the user wish (option B - "Processa o Programa"). Figure 3 shows the results of the simulation and a menu defines what curve must be plotted. For example, option A presents calculated and measurement real power, and F, calculated and measurement reactive power and the error.

## 6. SIMULATIONS PERFORMED

Initially, the acquisition system read data from a specific bus of CEMIG system. Time, voltage, frequency, real and reactive power were saved. Then, a data base was built with these data. Some disturbances were used in the training set while other disturbances composed the test set. The sensitivity studies of varying the model structures were made. This section presents two examples of models provided to LOADDYN. Comparison between the actual load (from the test set - continuous line) and the calculated load (obtained from the model and the training set - broken line) are presented with maximum and average error of the model.

### 6.1 Example 1

Three models obtained by the program are presented below with their equations. Figure 4 presents the Static Model.

<b>LOADDYN</b>		
S imulação	Arquivo a ser Plotado	F im
<b>Funções Disponíveis</b>	<b>Tecla &lt;ESC&gt; p/ Sair</b>	
A - Carrega Arquivo B - Processa o Programa C - Resultados  D - Fim	Nome dos Programas a serem Convertidos  Exemplo:      06NOV93.024	

Figure 1 - Loading File Menu

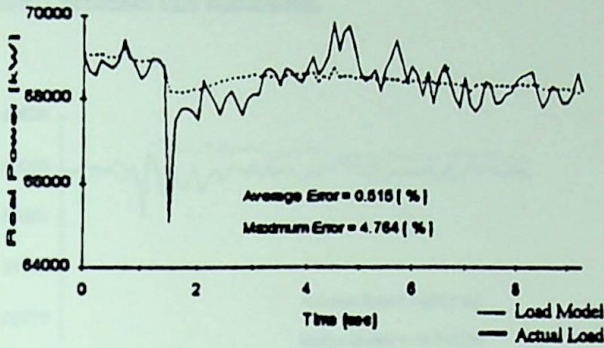
<b>LOADDYN</b>		
S imulação	Arquivo a ser Plotado	F im
<b>Funções Disponíveis</b>	<b>Programas \ Disponíveis</b>	
A - Carrega Arquivo B - Processa o Programa C - Resultados  D - Fim	A - Modelo ZIP B - Modelo HQ C - Modelo Austral  D - Fim	

Figure 2 - Selection Model Program Menu

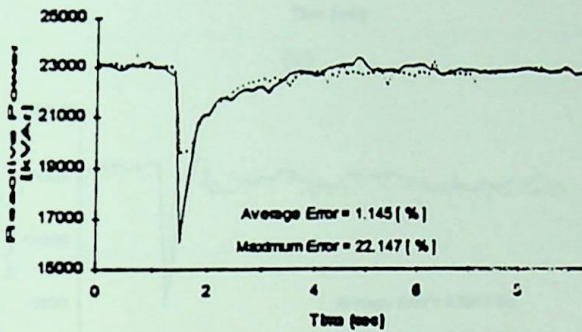
<b>LOADDYN</b>		
S imulação	Arqu	Curva a Ser Plotada
<b>Funções Disponíveis</b>		
A - Carrega Arquivo B - Processa o Programa C - Resultados  D - Fim	A - Pot. Ativa Cal. e Med. B - Pot. Ativa Cal., Med. e Erro C - Pot. Ativa Cal., Med. e Tensão D - Pot. Ativa Cal., Med. e Frequência E - Pot. Reativa Cal. e Med. F - Pot. Reativa Cal., Med. e Erro G - Pot. Reativa Cal., Med. e Tensão H - Pot. Reativa Cal., Med. e Frequência I - Equação do Modelo J - Fim	

Figure 3 - Result Menu

This model was calculated using a reduced training set, because the model found with full training set can not represented the load. This reduced set was obtained selecting the disturbance range close of this example.



(a)



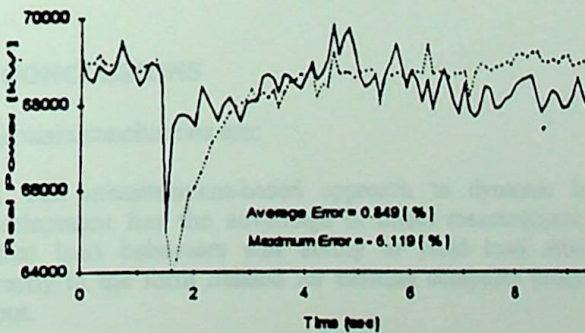
(b)

$$\Delta P(t) = 13.8020 - 27.6978 \cdot \Delta v(t) + 14.6196 \cdot \Delta v^2(t)$$

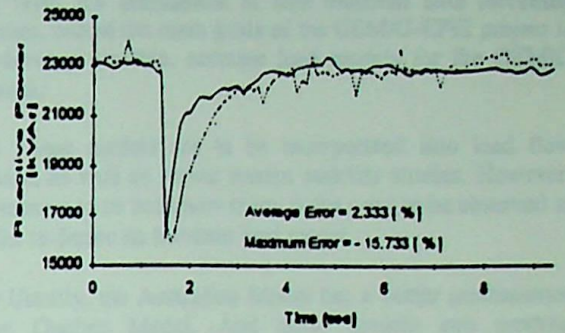
$$\Delta Q(t) = -7.3319 + 12.7369 \cdot \Delta v(t) - 4.8451 \cdot \Delta v^2(t)$$

Figure 4 - Static Model - Example 1

Figures 5 and 6 presents the Quebec and Australian Models, respectively. These models were obtained using a complete training set.



(a)

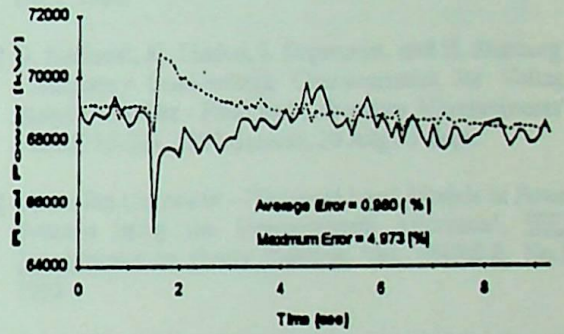


(b)

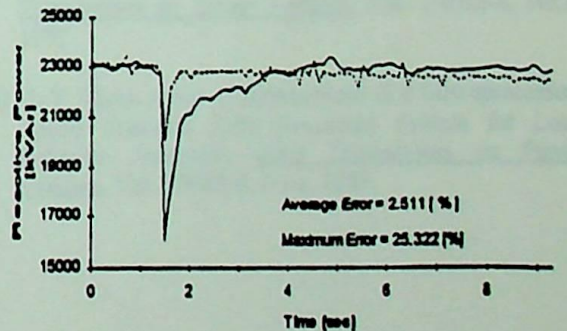
$$\Delta P(t) = -0.0468 \cdot \Delta P(t-1) + 0.0351 \cdot \Delta Q(t-1) + 2.0978 \cdot \Delta v(t) + 1.2820 \cdot \Delta f(t)$$

$$\Delta Q(t) = -0.8072 \cdot \Delta P(t-1) + 0.3569 \cdot \Delta Q(t-1) + 9.1670 \cdot \Delta v(t) - 0.0925 \cdot \Delta f(t)$$

Figure 5 - Quebec Model - Example 1



(a)



(b)

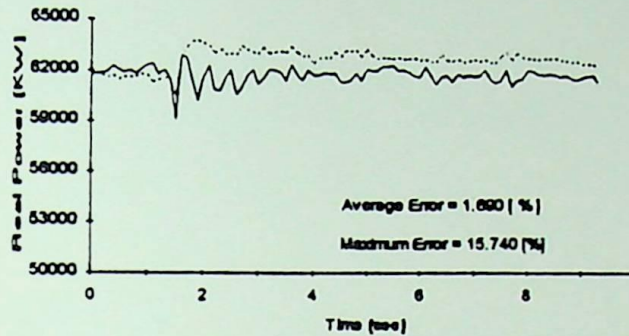
$$\Delta P(t) = 0.4979 \cdot \Delta v(t) - 1.3279 \cdot \Delta v(t-1) + 0.4828 \cdot \Delta f(t) + 0.5766 \cdot \Delta f(t-1)$$

$$\Delta Q(t) = 2.4810 \cdot \Delta v(t) - 1.8594 \cdot \Delta v(t-1) + 0.1173 \cdot \Delta f(t) - 0.4362 \cdot \Delta f(t-1)$$

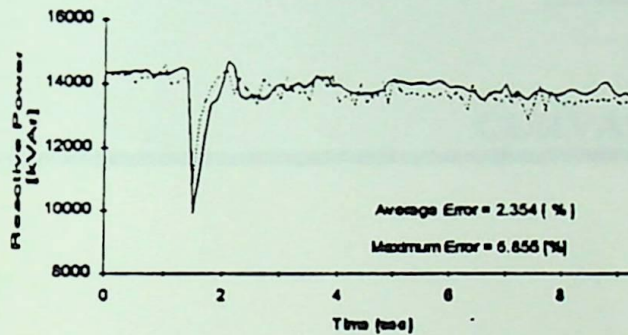
Figure 6 - Australian Model - Example 1

## 6.2 Example 2

For this example, only the Australian model can be able to obtain a good model. Reduced training set was tested for Static and Quebec Models but the product was not good. Figure 7 presents this simulation.



(a)



(b)

$$\begin{aligned} \Delta P(t) &= 0.5297 * \Delta v(t) - 1.3473 * \Delta v(t-1) - \\ &\quad - 0.0831 * \Delta v(t-2) + 0.8369 * \Delta f(t) + \\ &\quad + 0.7136 * \Delta f(t-1) - 0.4346 * \Delta f(t-2) \\ \Delta Q(t) &= 2.6383 * \Delta v(t) - 2.0009 * \Delta v(t-1) - \\ &\quad - 0.4727 * \Delta v(t-2) + 0.7646 * \Delta f(t) - \\ &\quad - 0.2449 * \Delta f(t-1) - 0.4739 * \Delta f(t-2) \end{aligned}$$

Figure 7 - Australian Model - Example 2

## 7. CONCLUSIONS

The main conclusions are:

(a) The measurement-based approach to dynamic load development has the advantage of direct measurement of actual load behaviors and ability to yield load models directly in the form needed for existing computer program input.

(b) A procedure for applying a set of measured data from an on-line transient recording system to develop dynamic load models for the CEMIG system has been described.

(c) With the installment of this transient data recording system, one of the main goals of the CEMIG-EFEI project is to develop sensible, accurate load models for the CEMIG system.

(d) These models are to be incorporated into load flow studies as well as power system stability studies. However, it remains to be seen how many faults need to be observed in order to derive an accurate load model.

(e) Usually, the Australian Model has a better performance than Quebec Model. And these models can produce significantly better results than Static Models.

## 8. REFERENCES

- [1] K. Srinivasan, C.T. Nguyen, and Y. Robichaud - "Closed Loop Response to Random Perturbations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 5, 1979.
- [2] T. Dovan, T.S. Dillon, C.S. Berger, and K.E. Forward - "A Microcomputer Based On-line Identification Approach to Power System Dynamic Load Modelling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWR-2, No.3, 1987.
- [3] D. Karlsson, K. Lindem, J. Segerqvist, and B. Stenborg - "Temporary Load-voltage Characteristics for Voltage Stability Studies - Field and Laboratory Measurements", CIGRÉ 38-204, 1992 Session, 30 Aug / 5 Sept.
- [4] Chain-Jen Lin *et alii* - "Dynamic Load Models in Power Systems using the Measurements Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWR-8, No.1, 1993.
- [5] D.J. Hill - "Non-linear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWR-8, No.1, 1993.
- [6] C.-Y. Chiou *et alii* - "Development of a Microprocessor-based Transient Data Recording System for Load Behavior Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWR-8, No.1, 1993.



ANEXO V  
CURVAS CEMIG

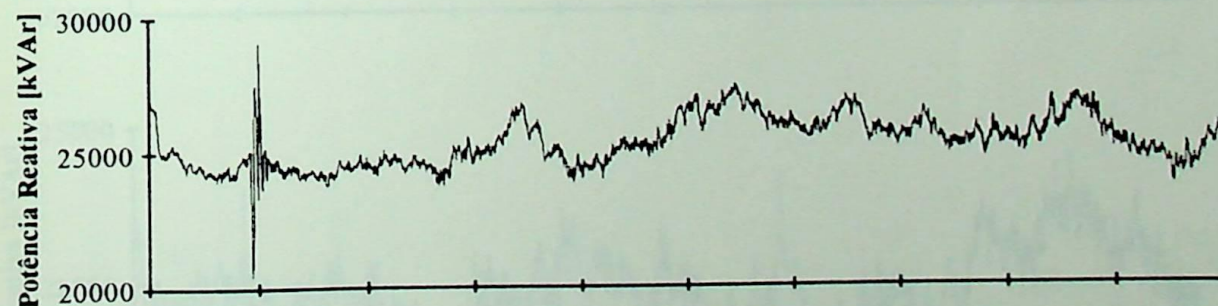
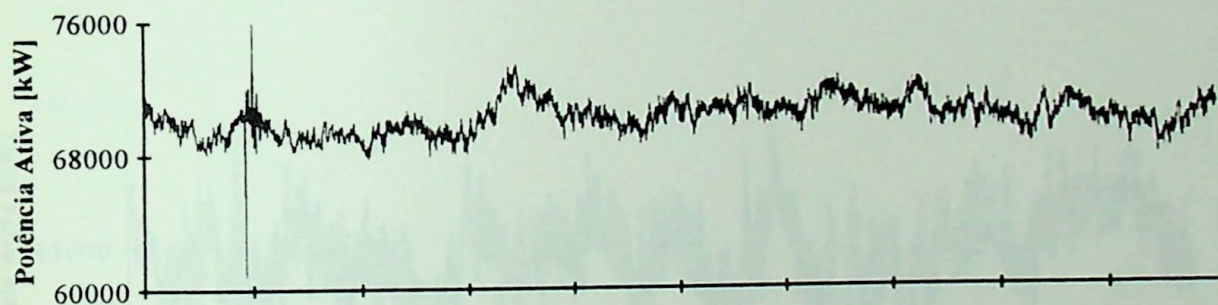
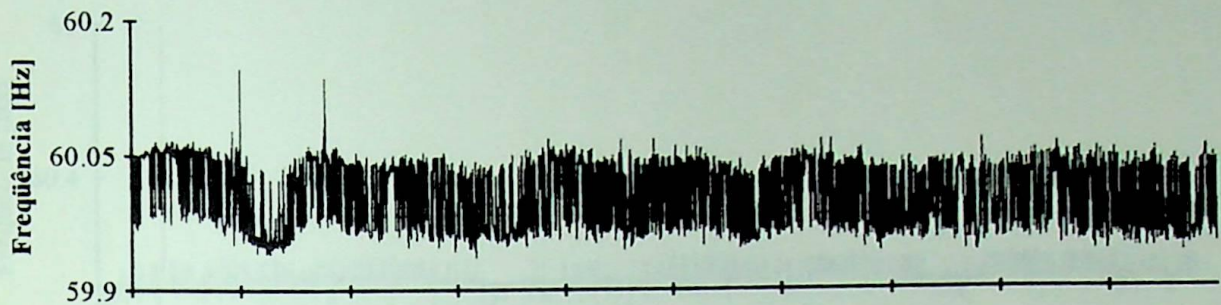
**ANEXO V**  
**CURVAS CEMIG**

**ANEXO V**

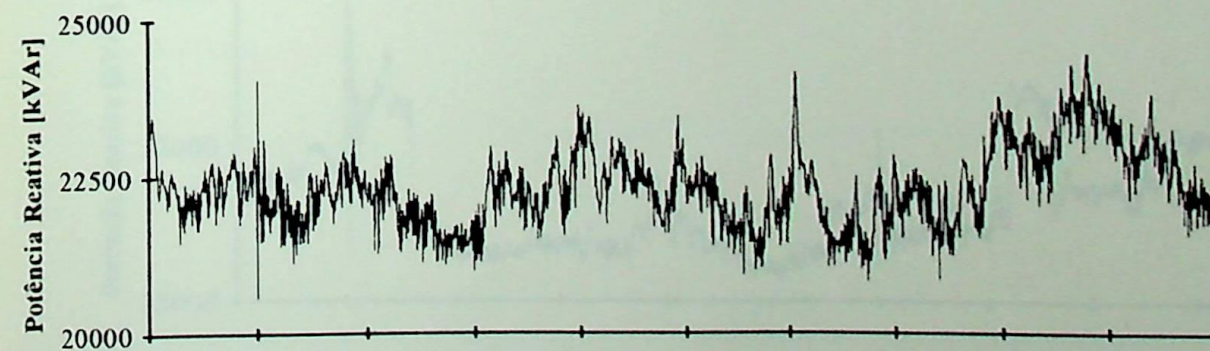
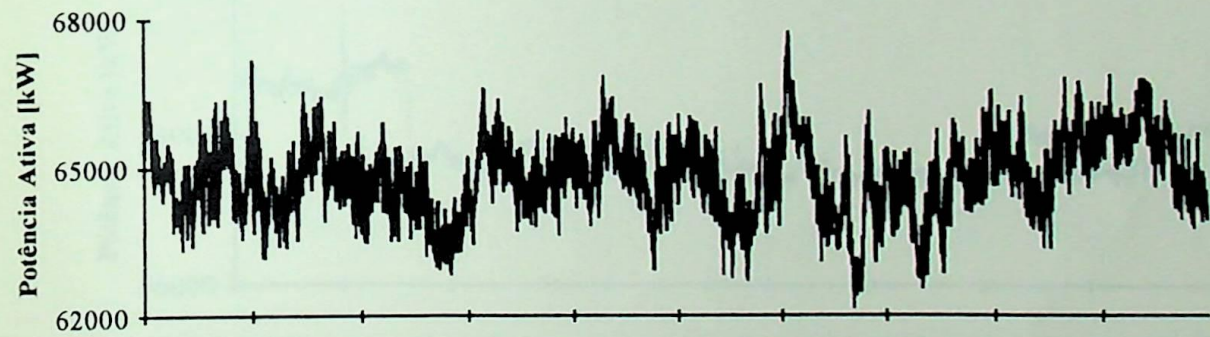
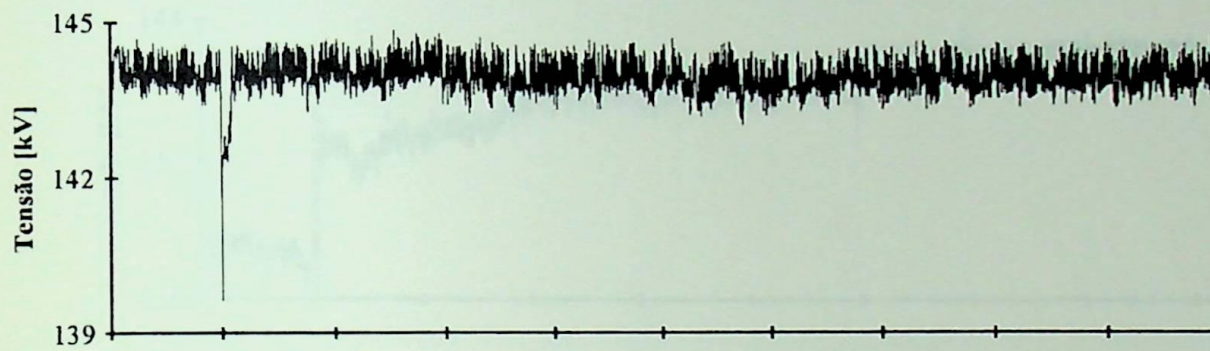
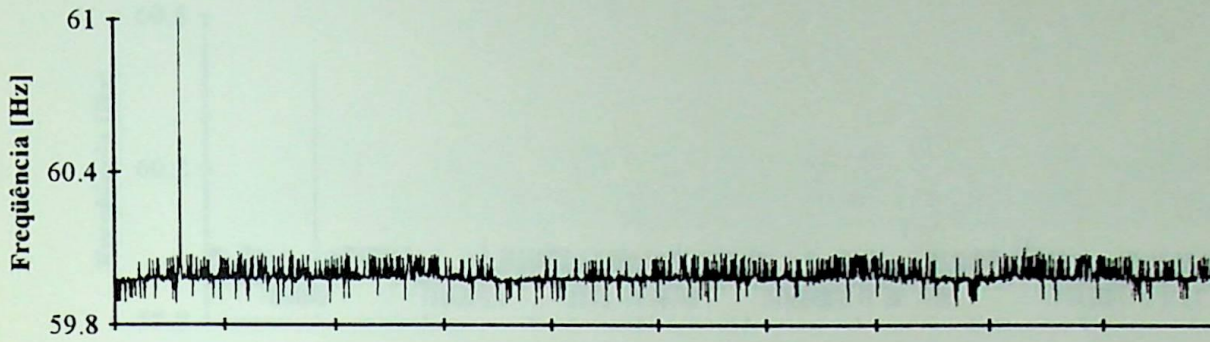
**CURVAS CEMIG**

**V.1 CURVAS**

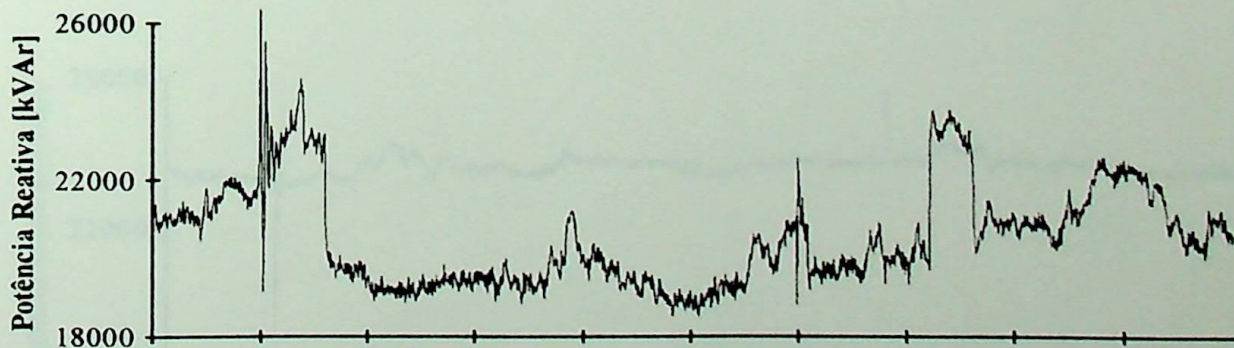
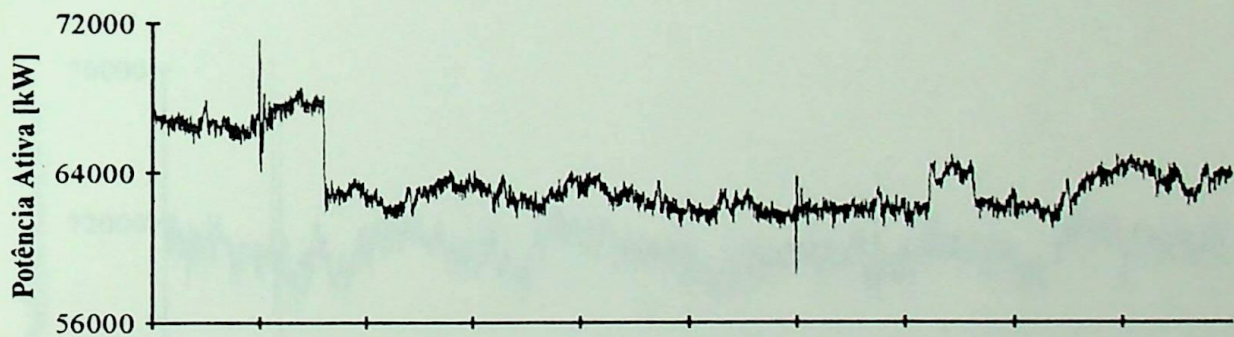
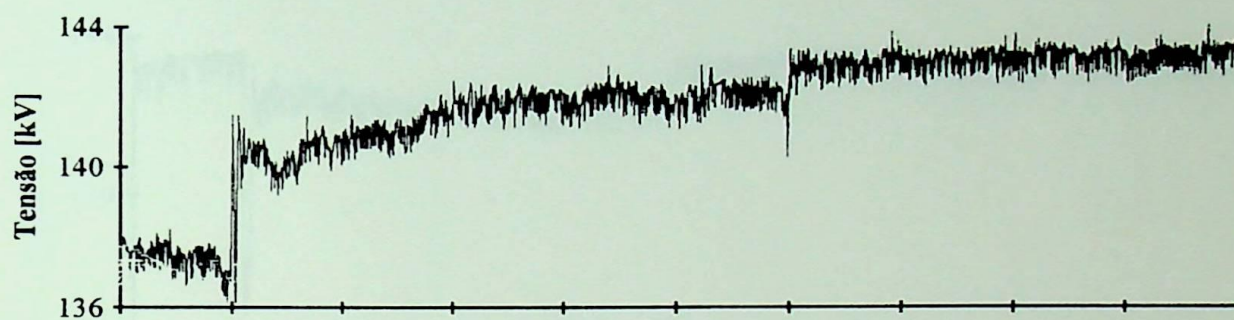
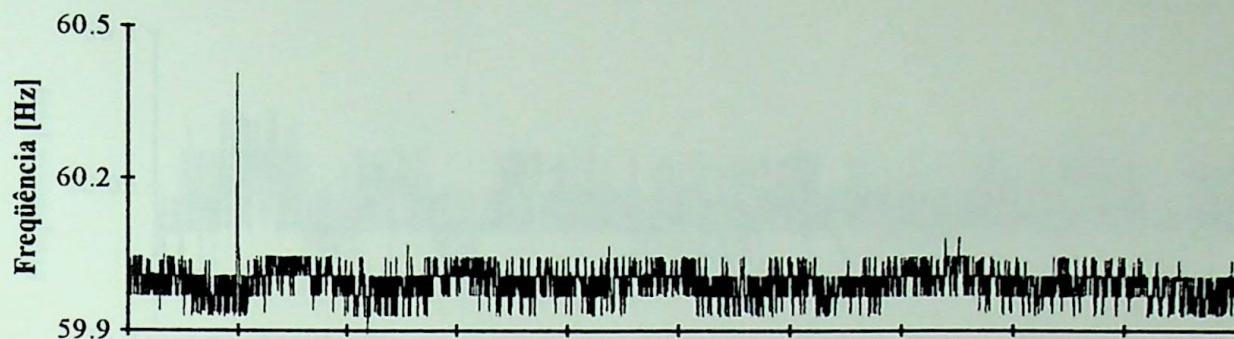
Curva 4: 02/SET/93



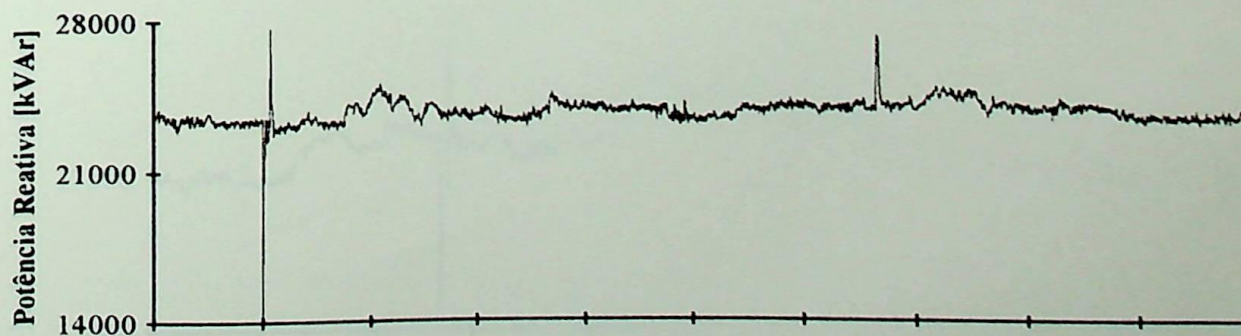
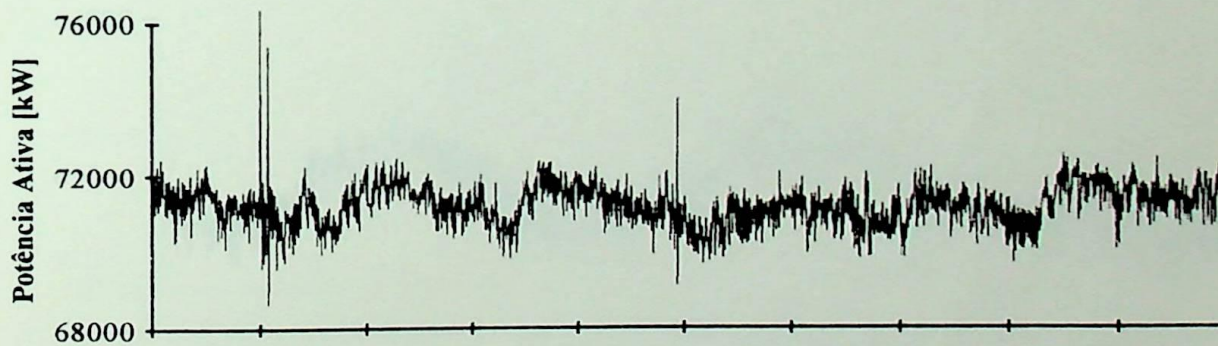
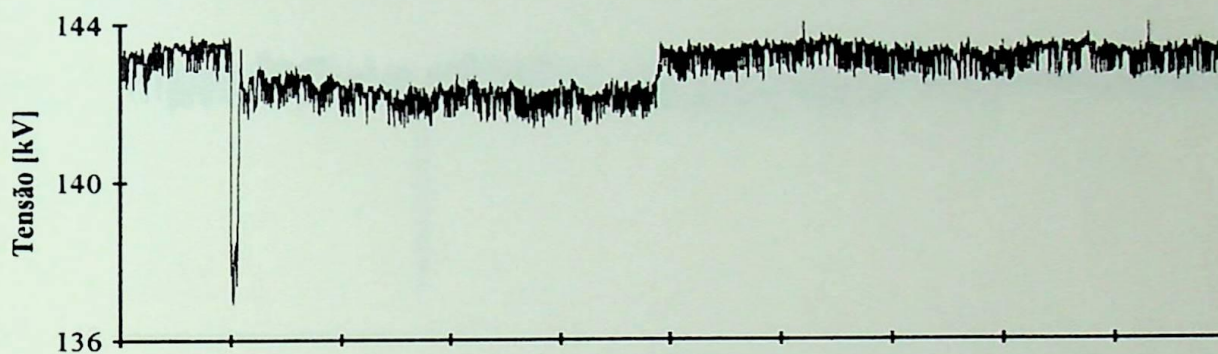
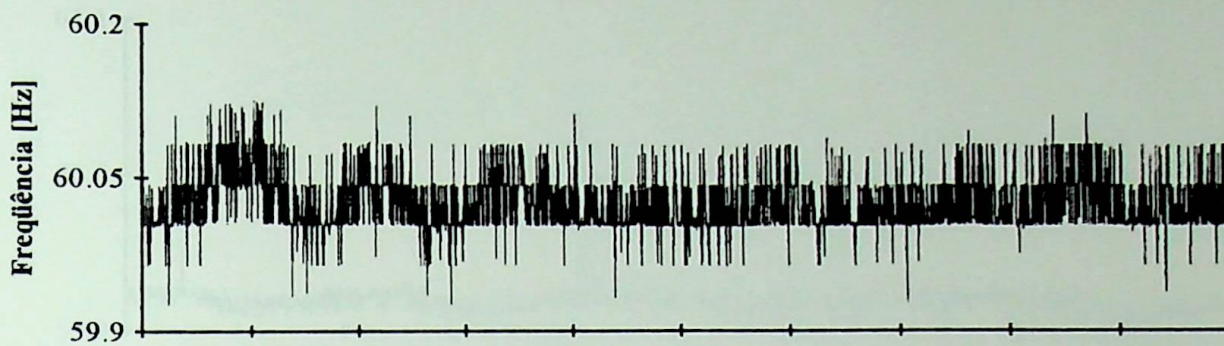
Curva 5: 06/SET/93



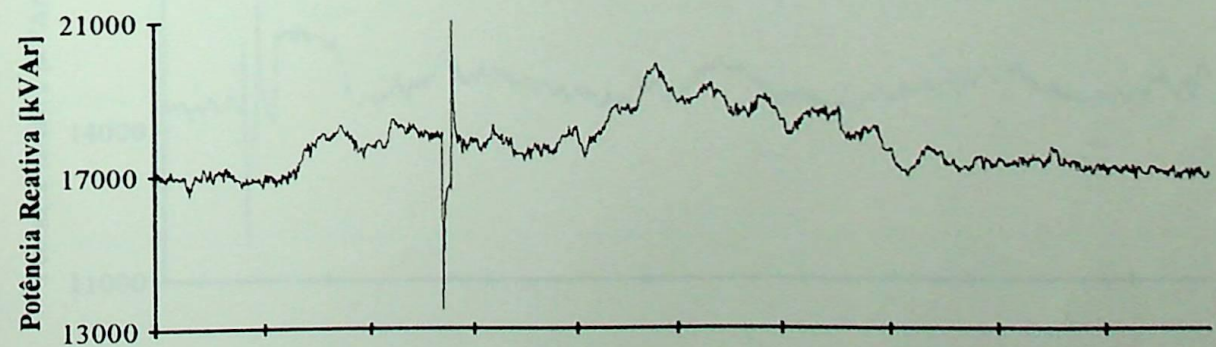
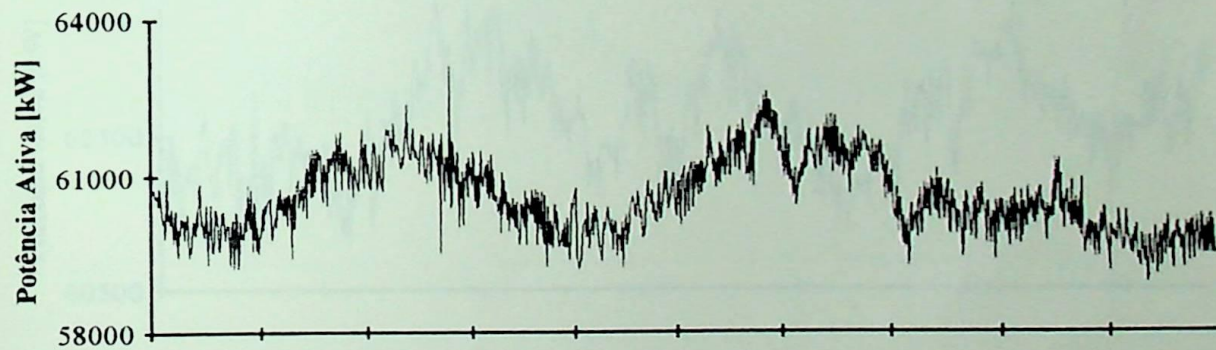
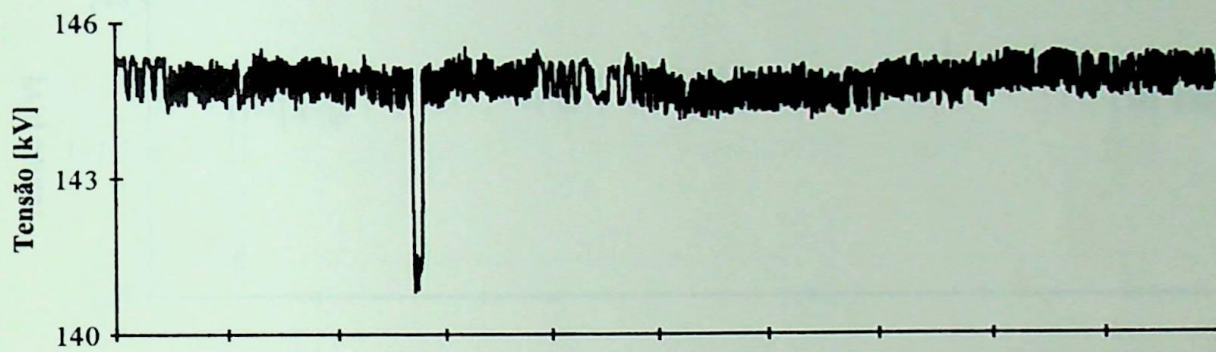
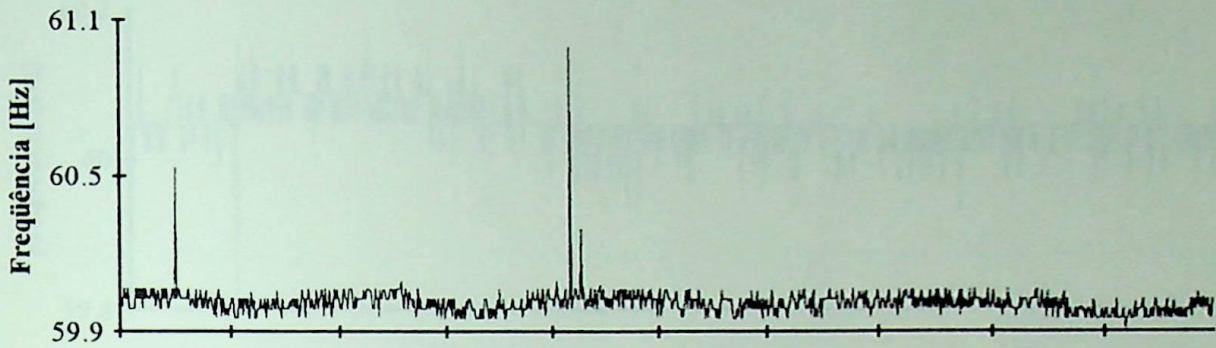
Curva 6: 21/SET/93



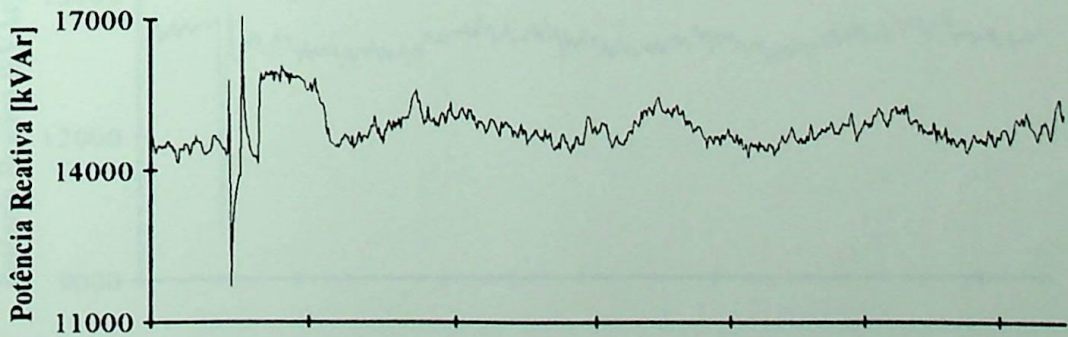
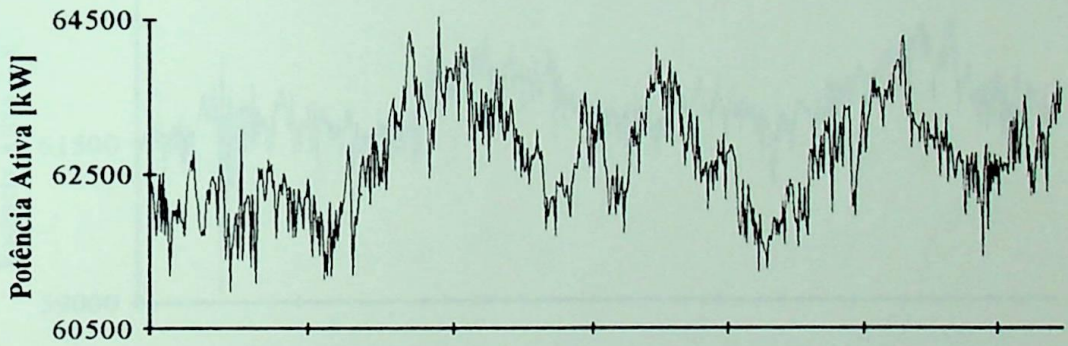
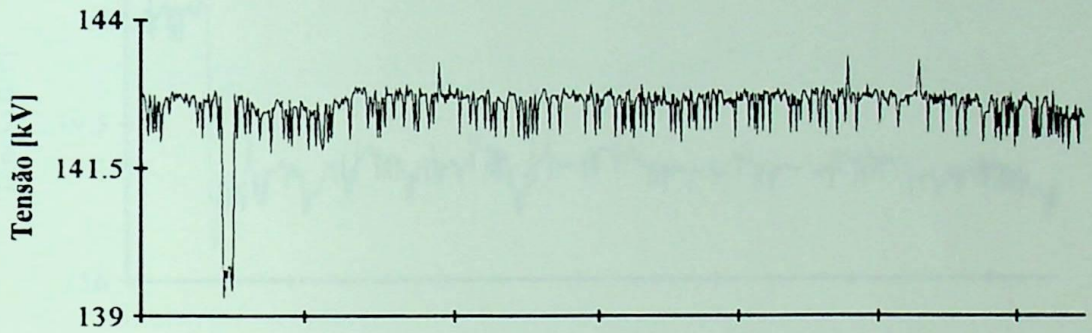
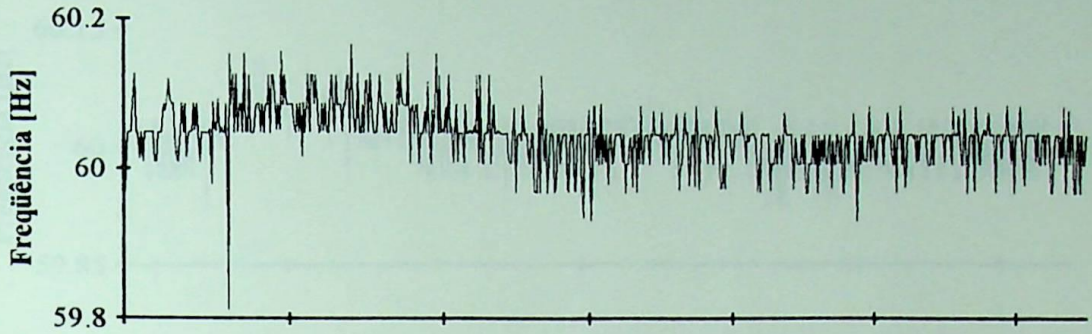
## Curva 7: 21/SET/93



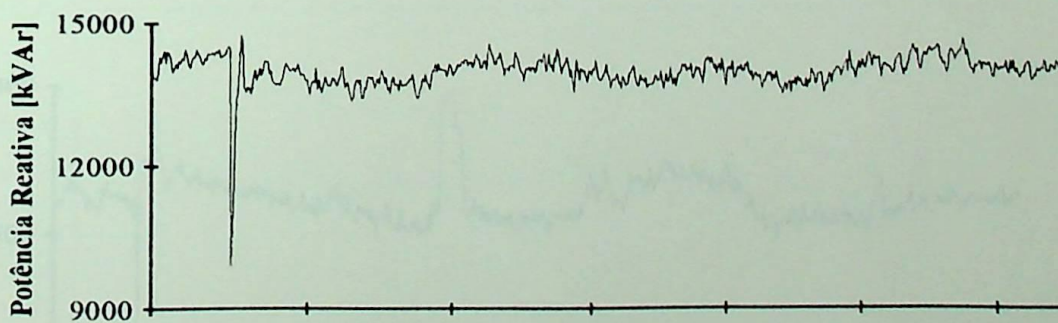
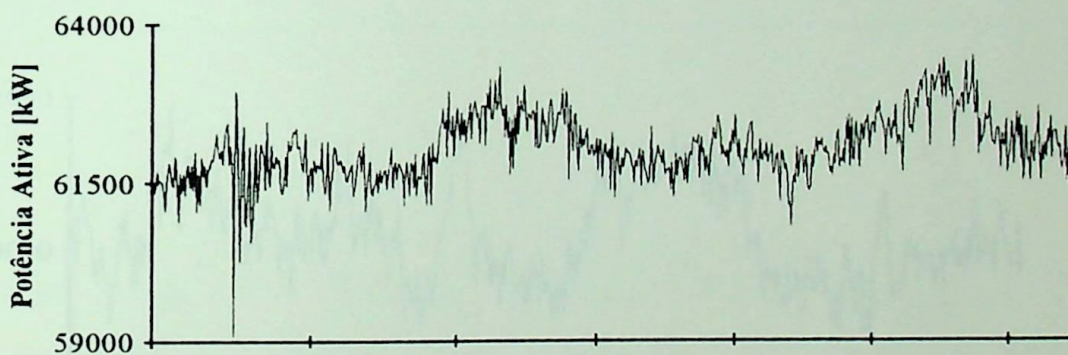
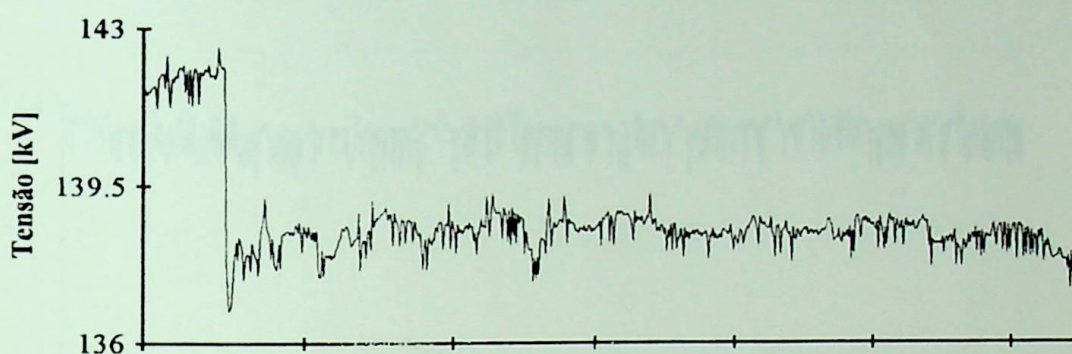
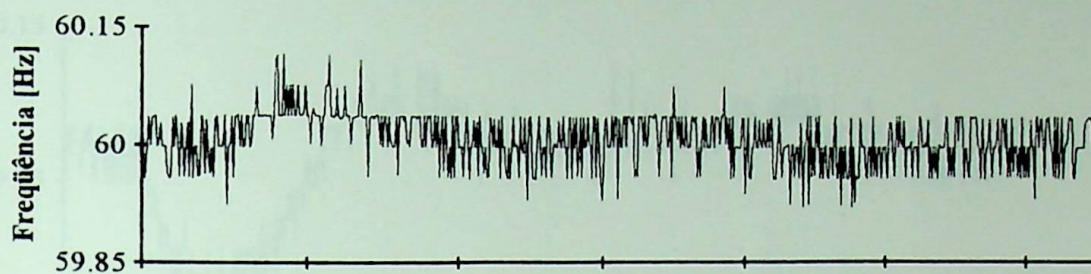
Curva 9: 02/OUT/93



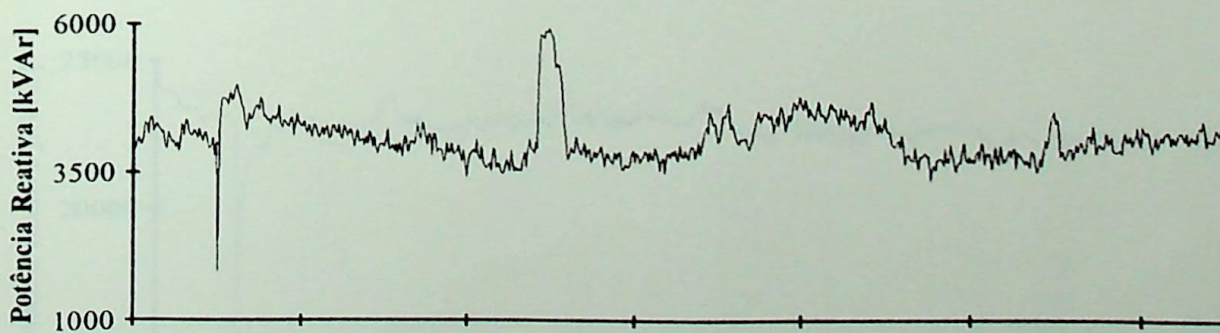
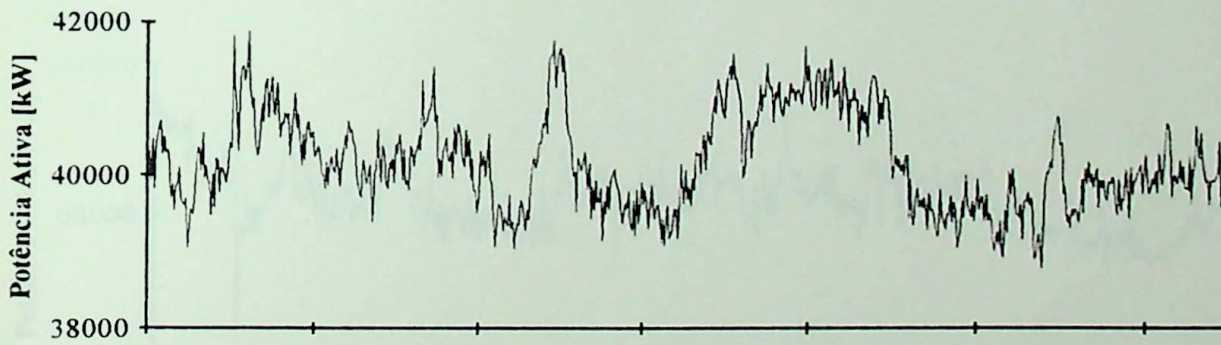
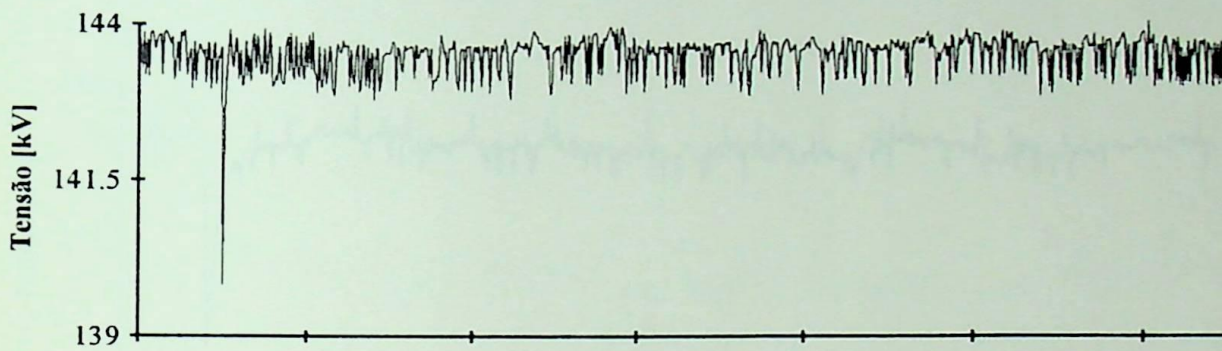
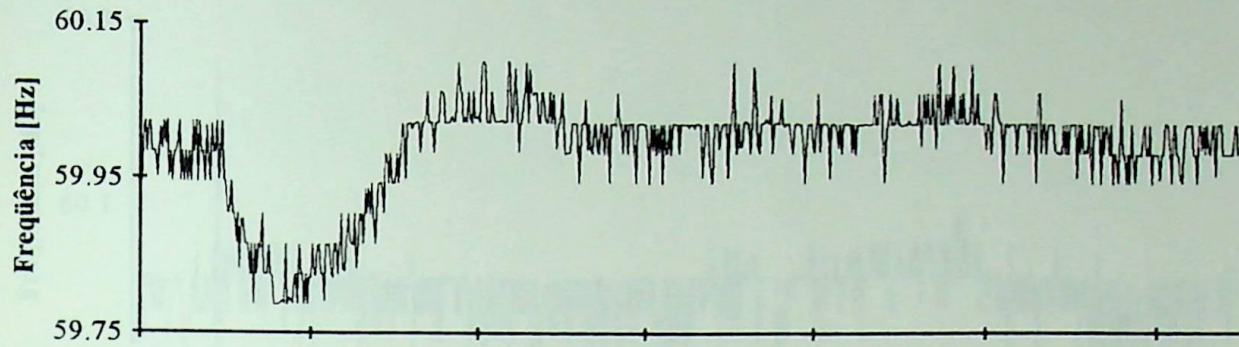
CURVA 10: 10/OUT/93



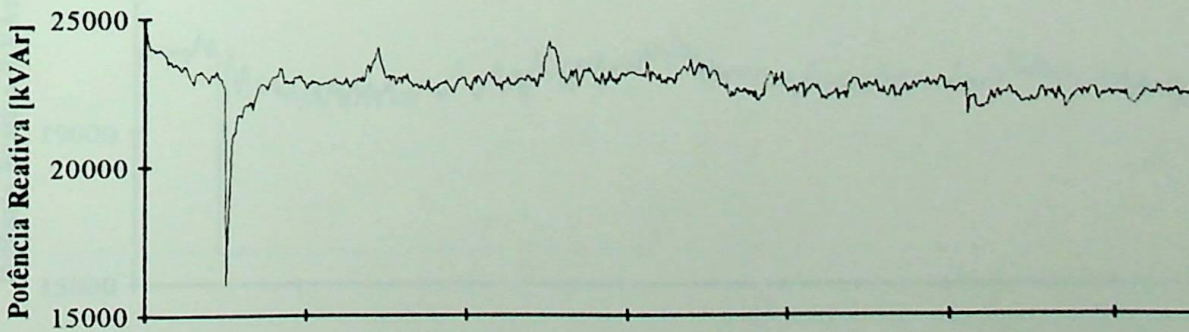
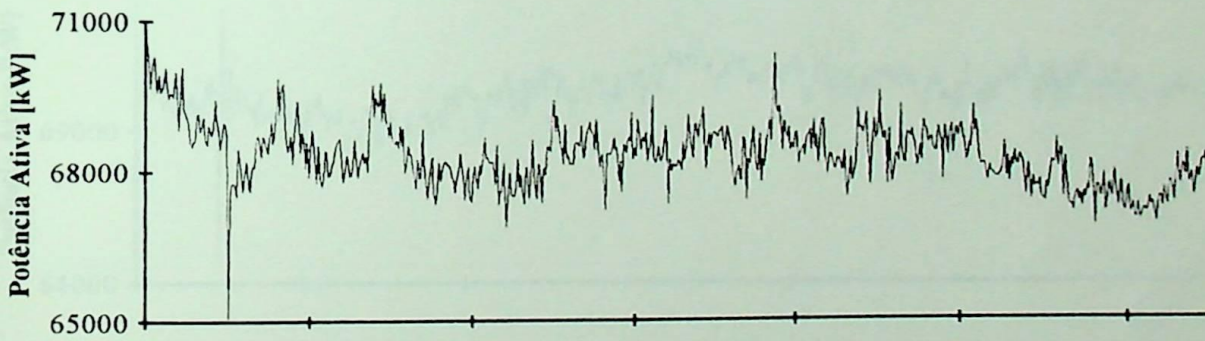
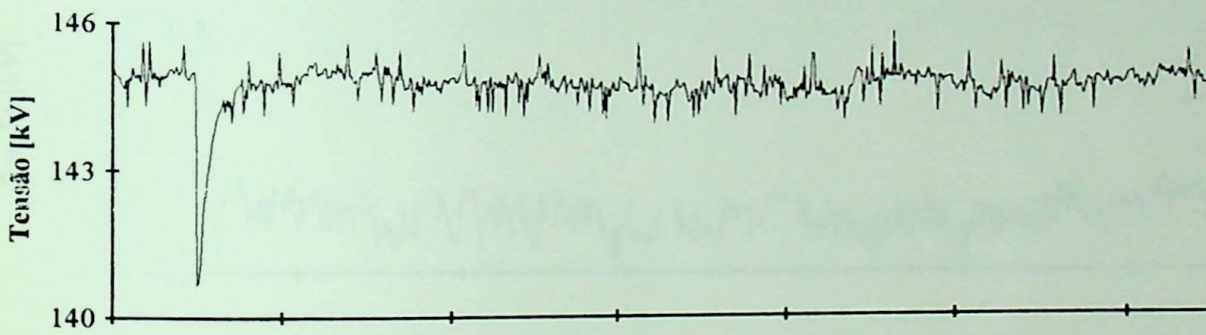
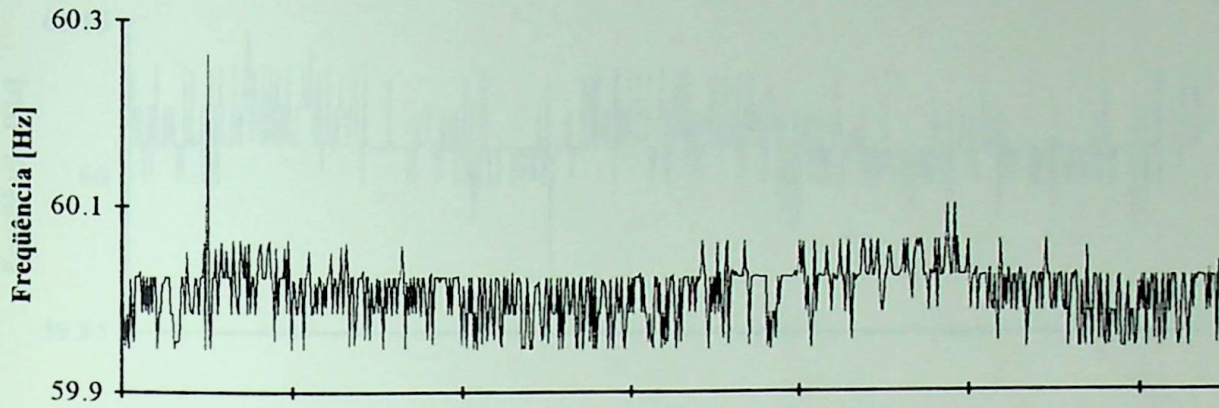
## CURVA 11: 10/OUT/93



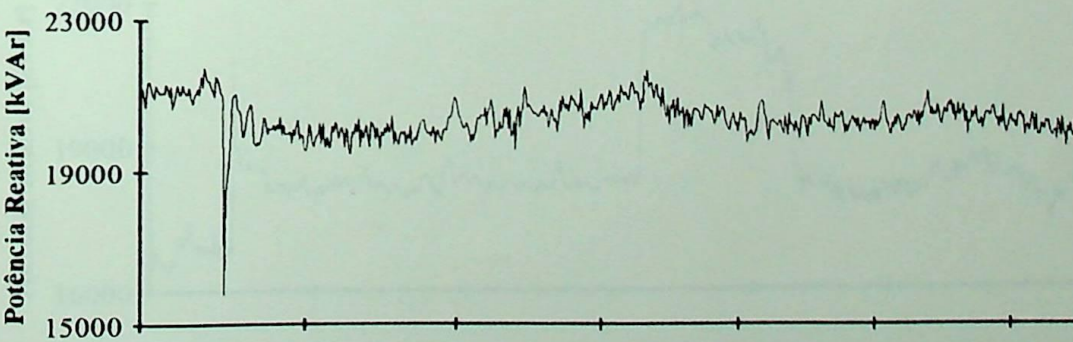
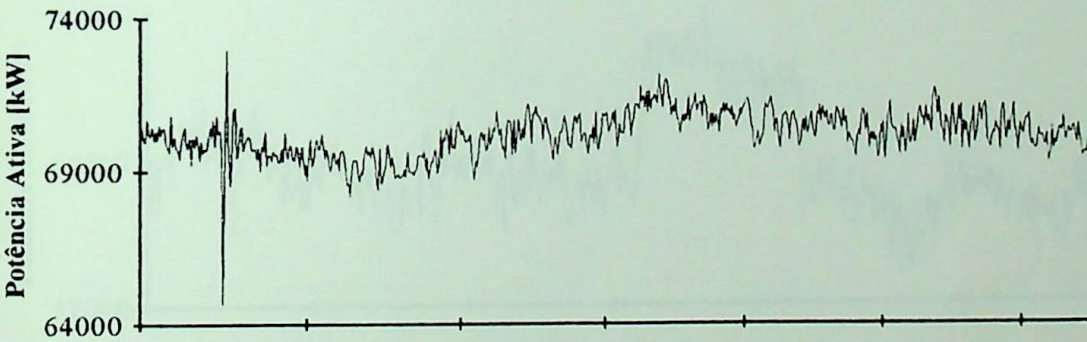
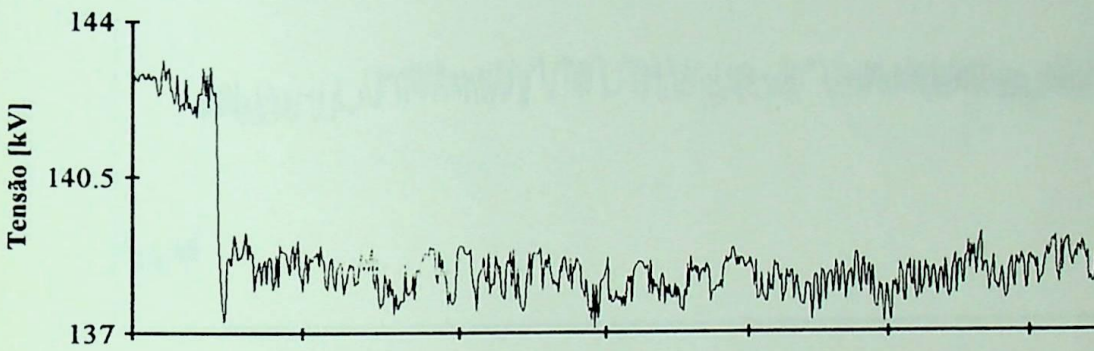
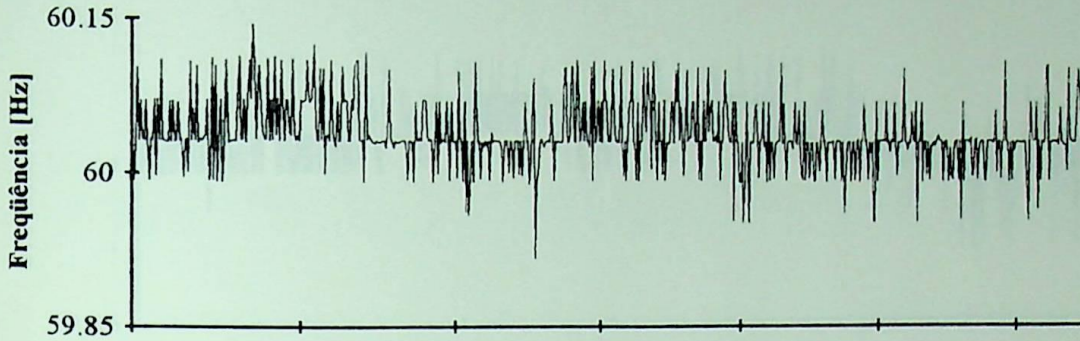
Curva 12: 11/OUT/93



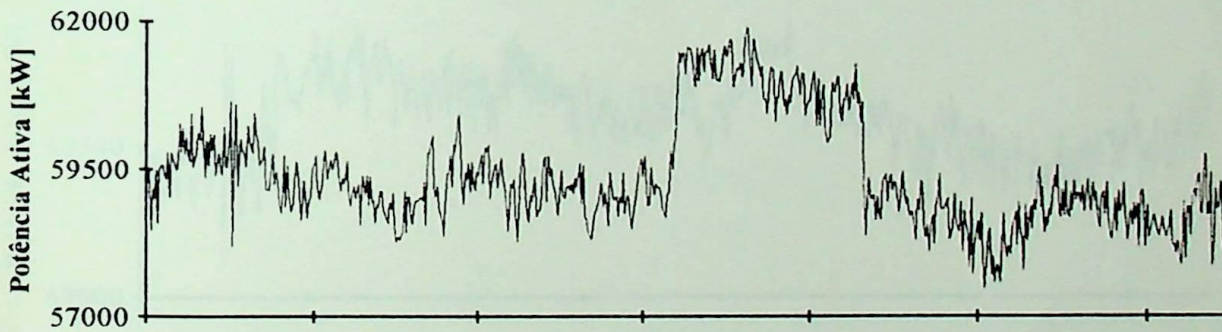
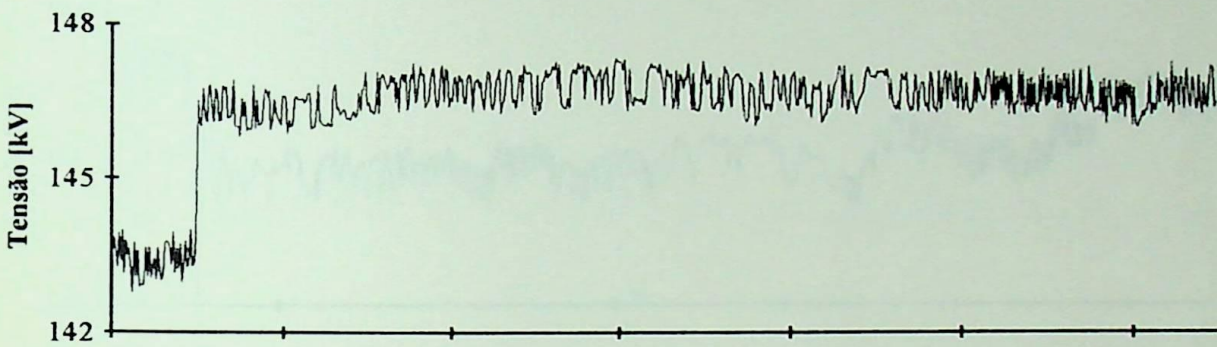
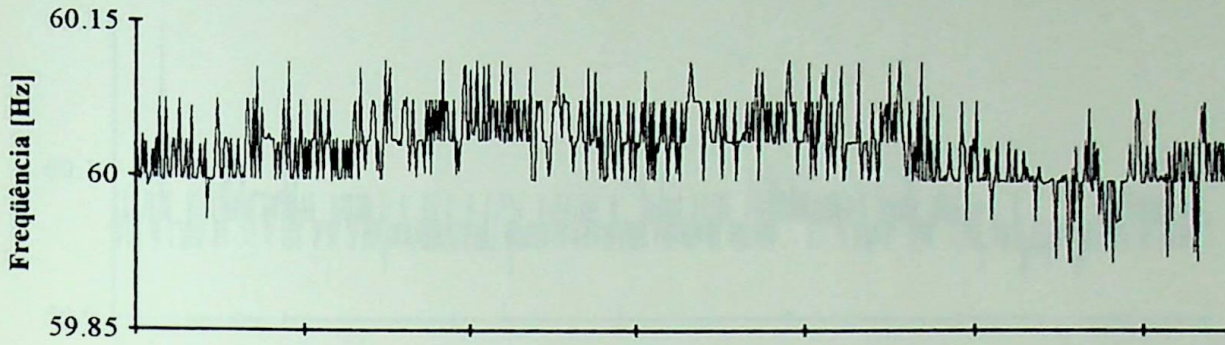
Curva 13: 16/OUT/93



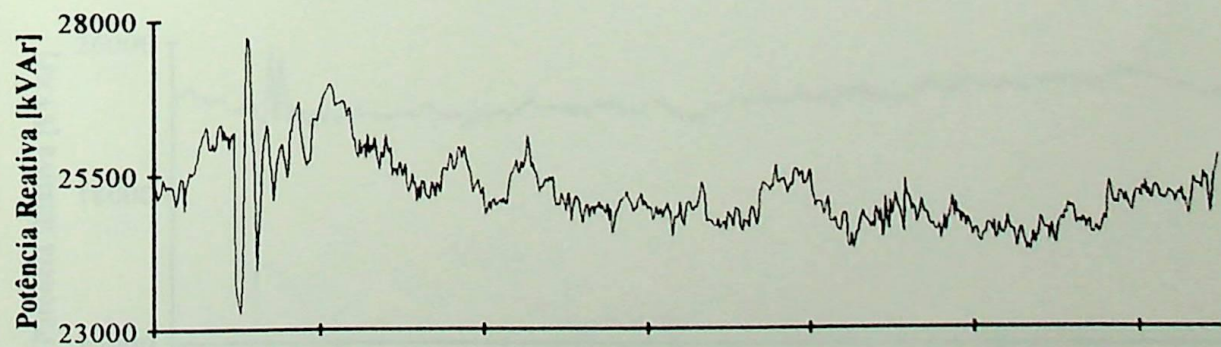
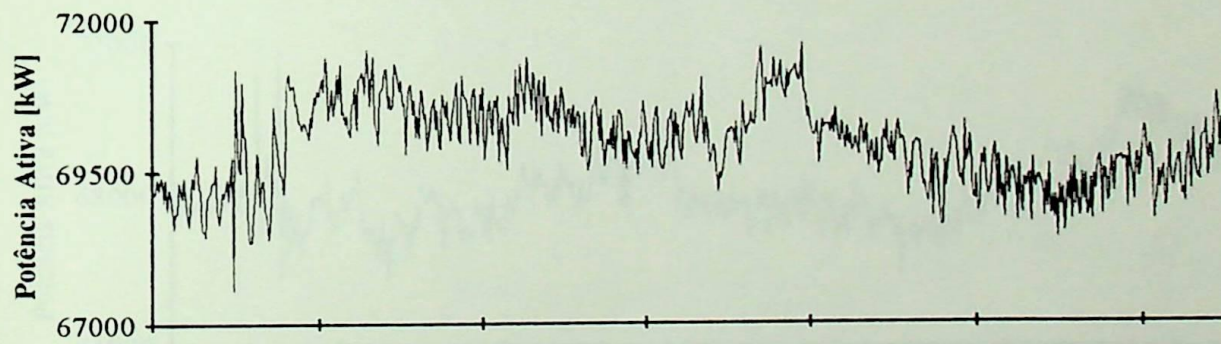
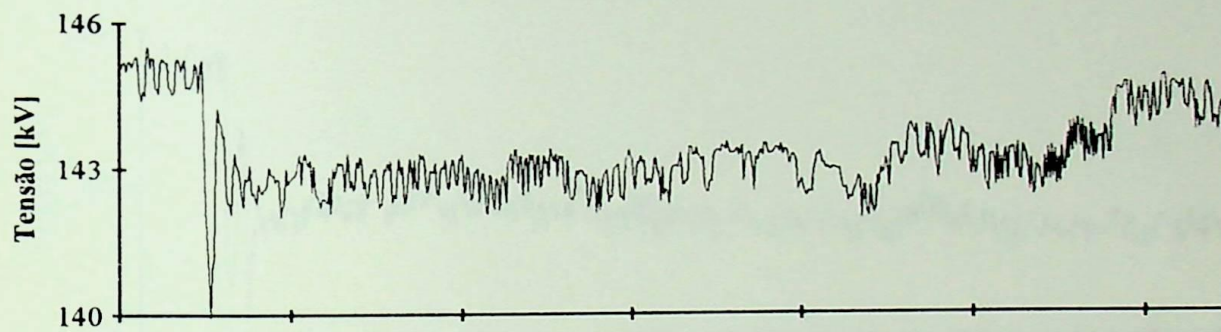
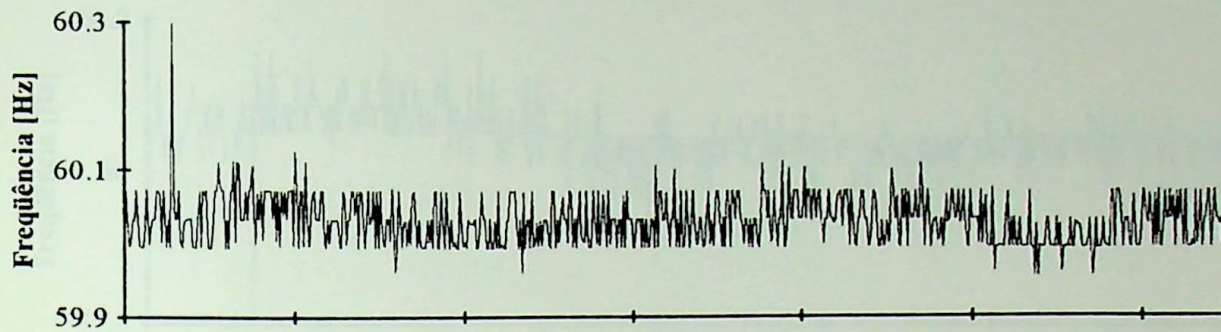
Curva 14: 19/OUT/93



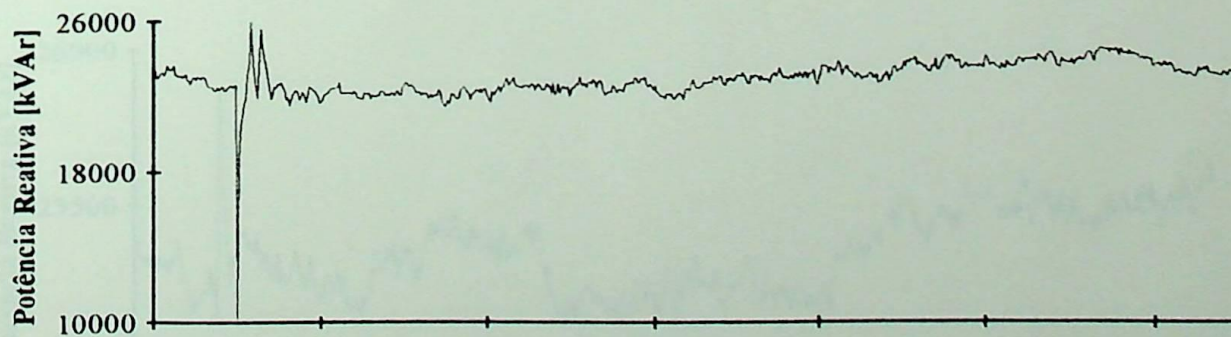
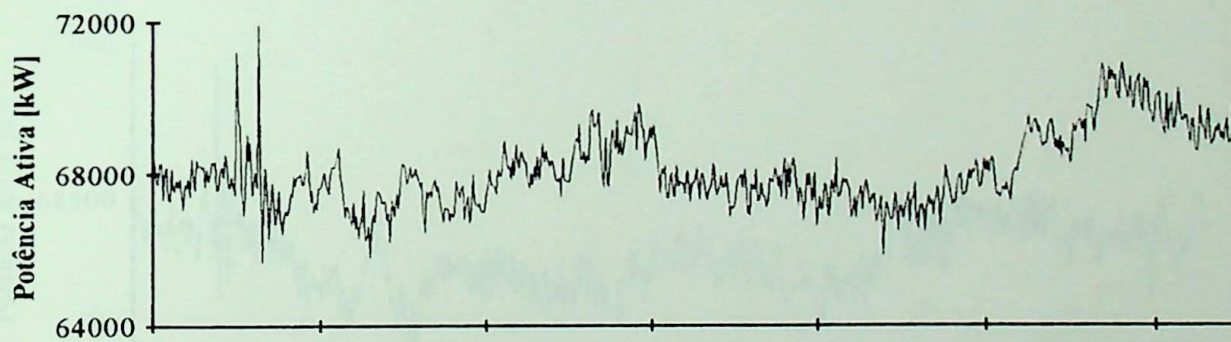
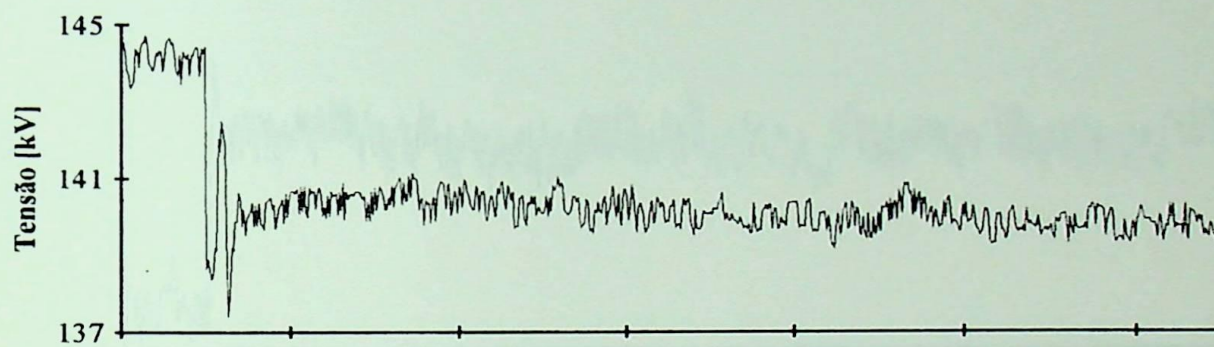
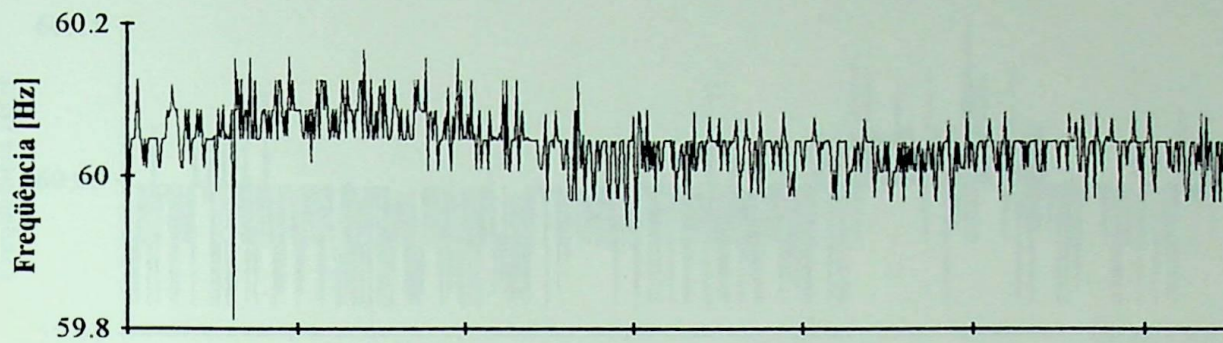
Curva 15: 19/OUT/93



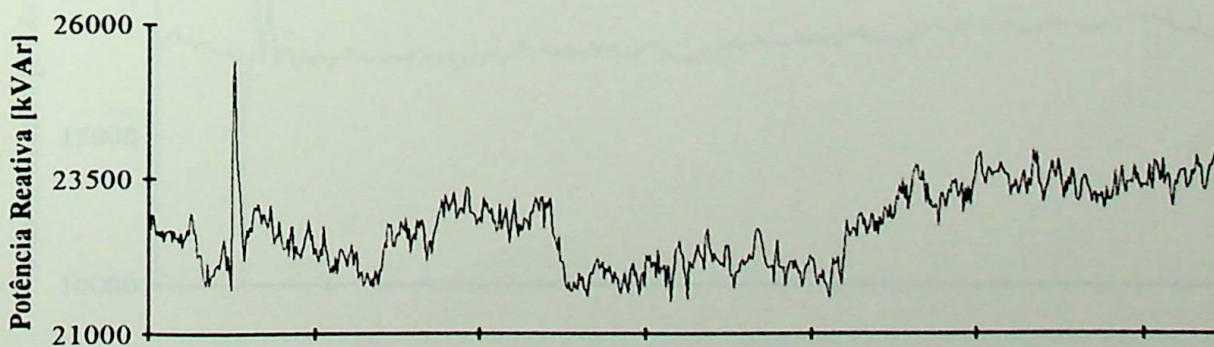
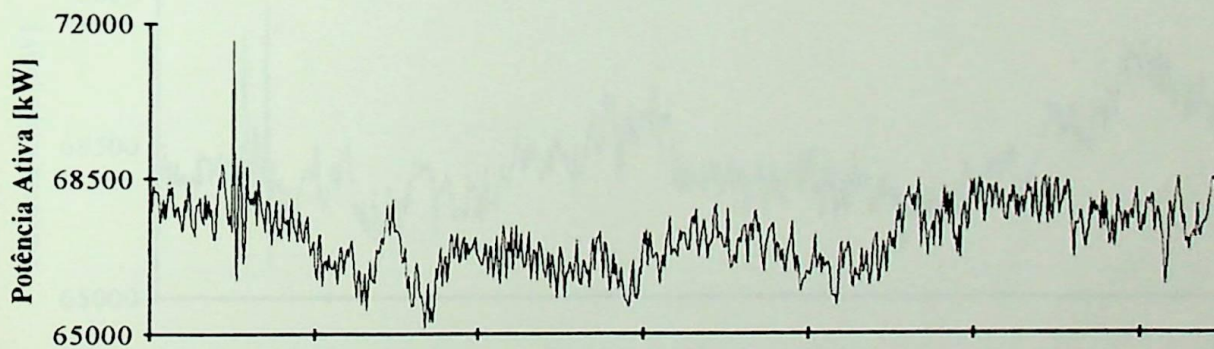
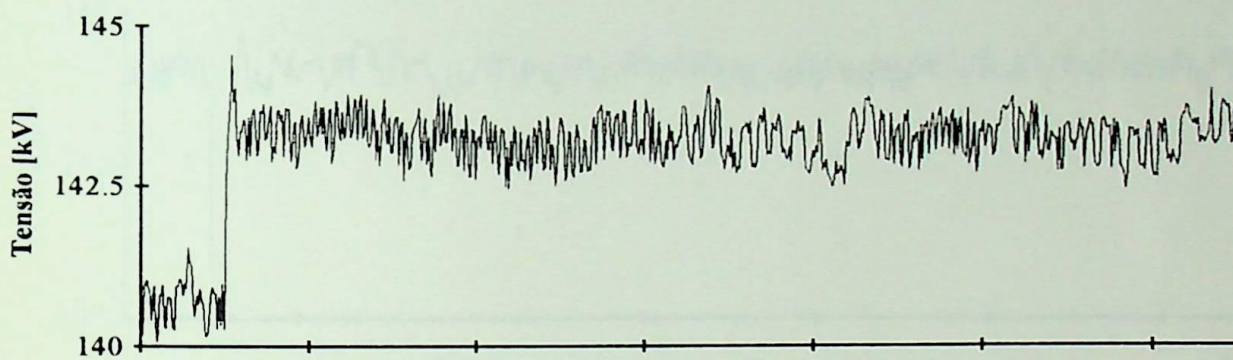
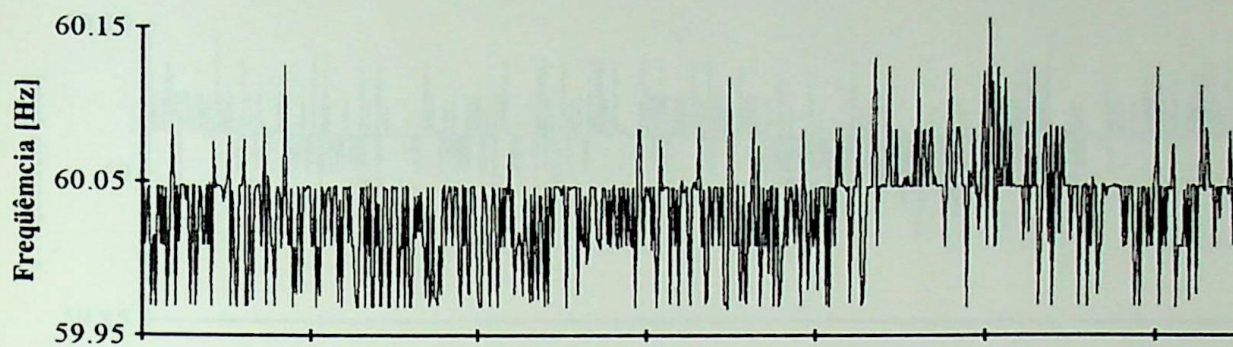
Curva 16: 20/OUT/93



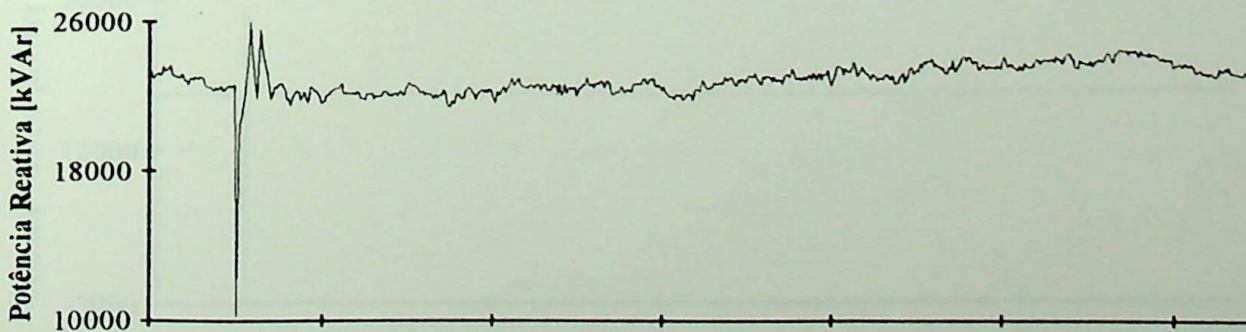
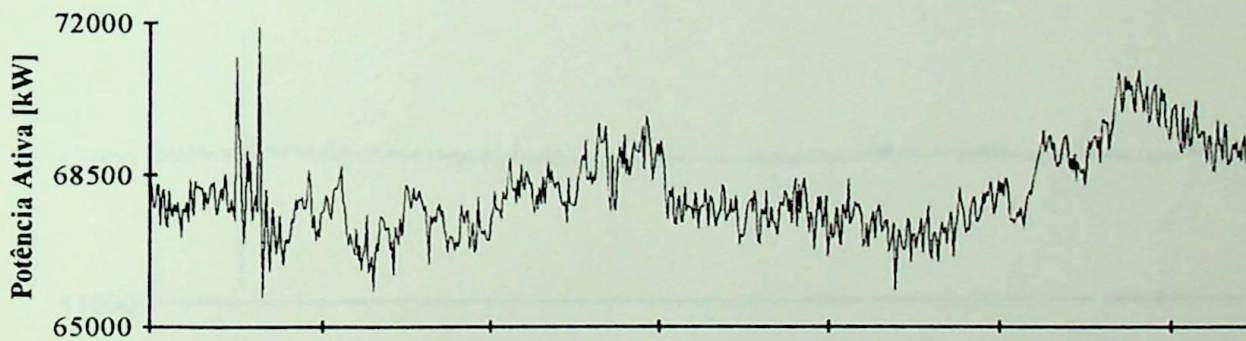
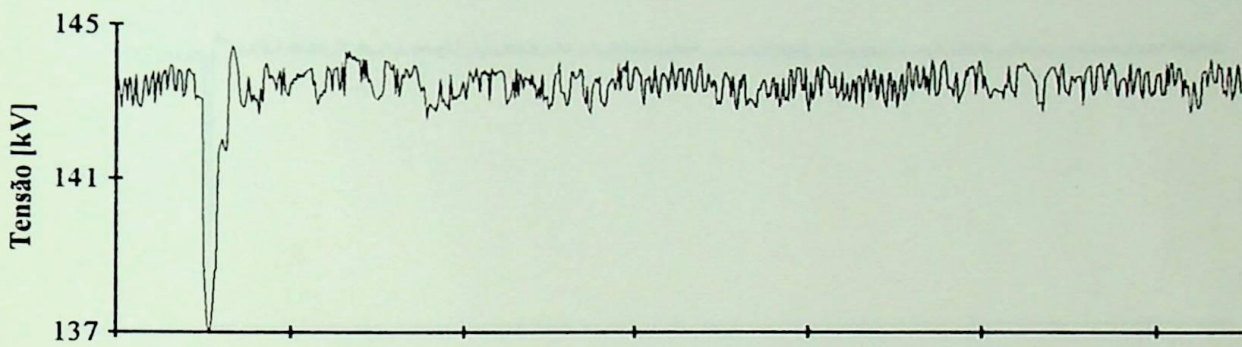
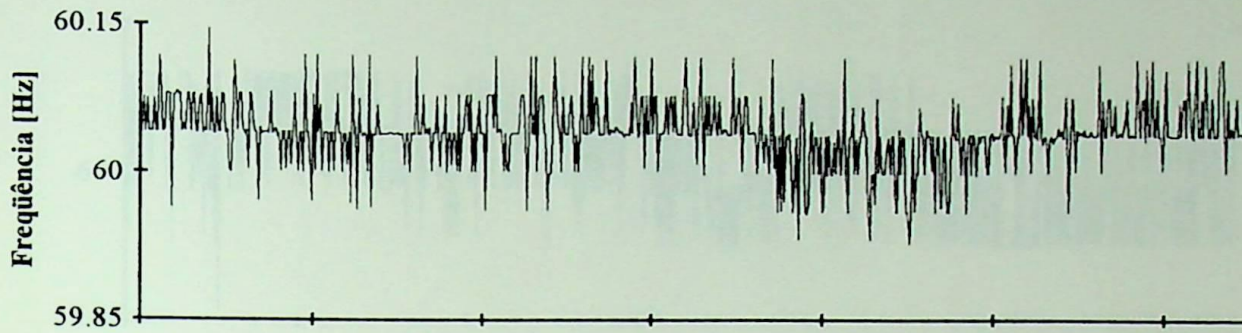
## Curva 17: 20/OUT/93



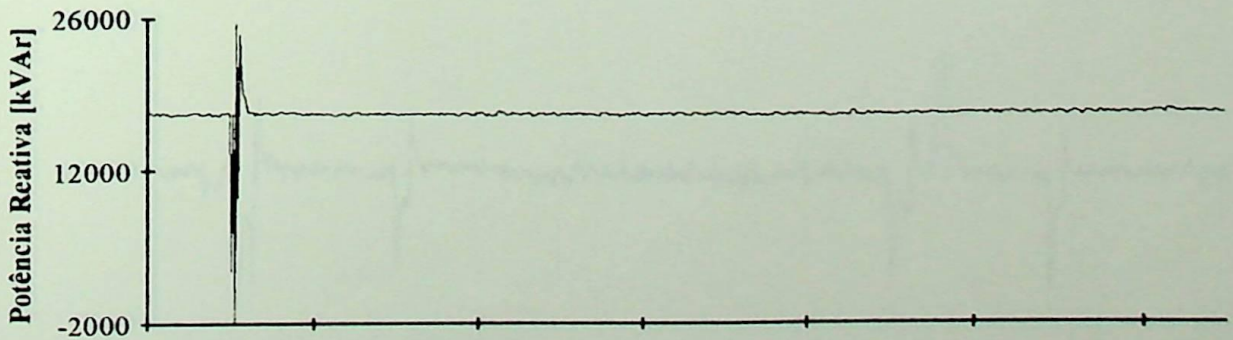
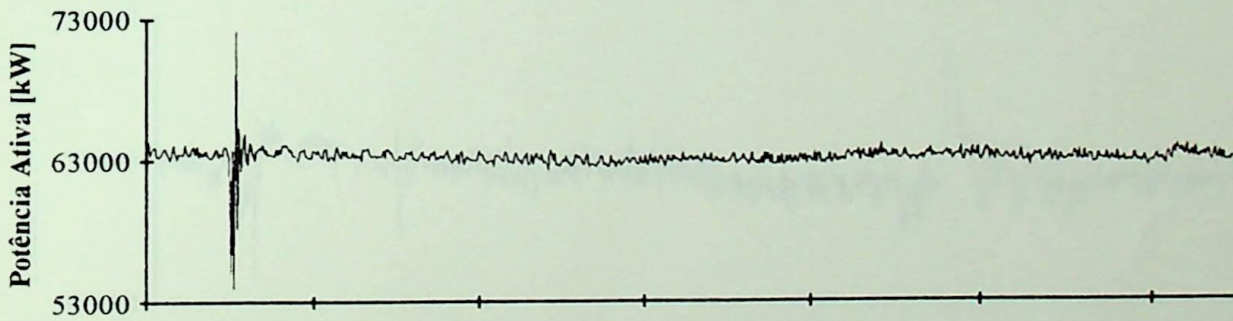
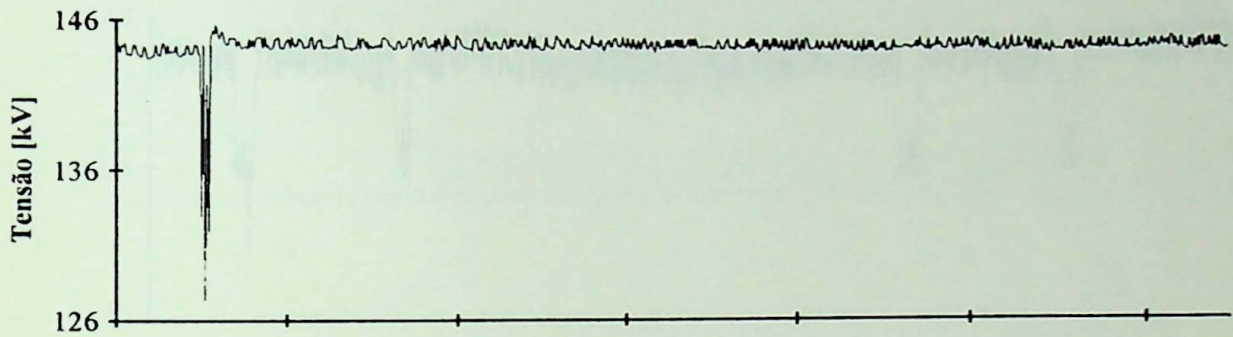
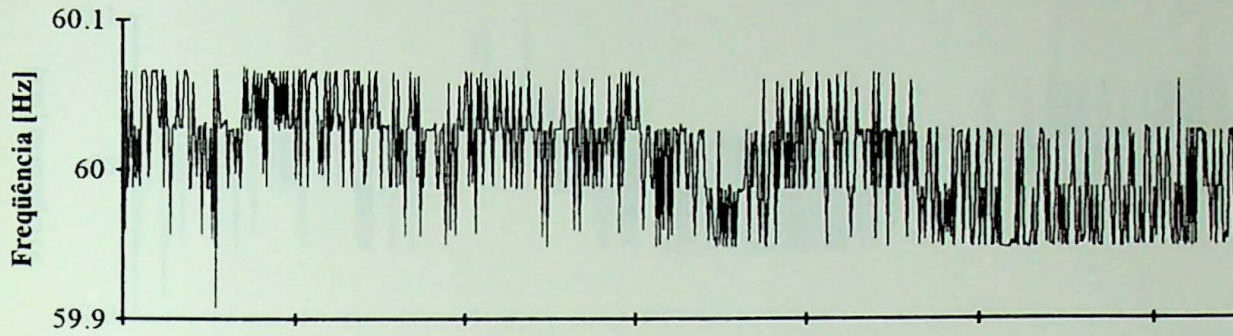
## Curva 18: 20/OUT/93



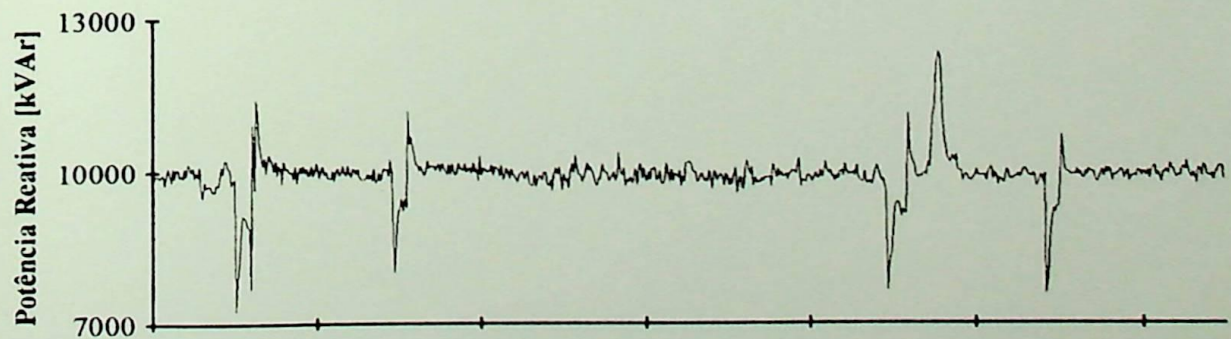
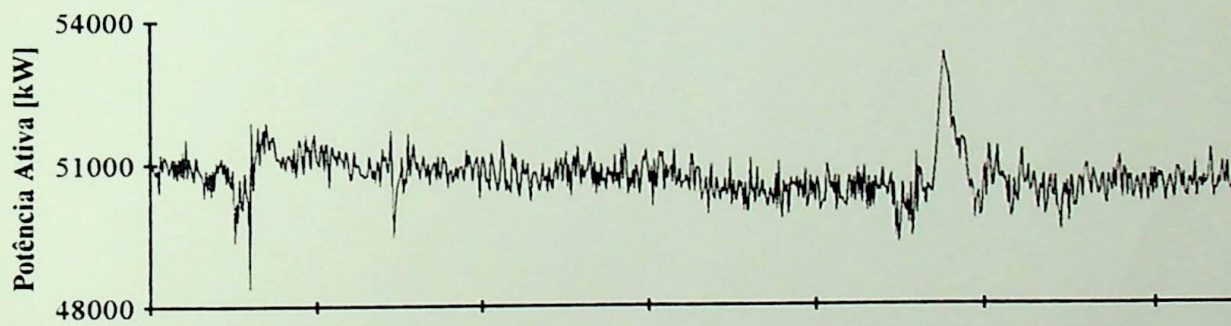
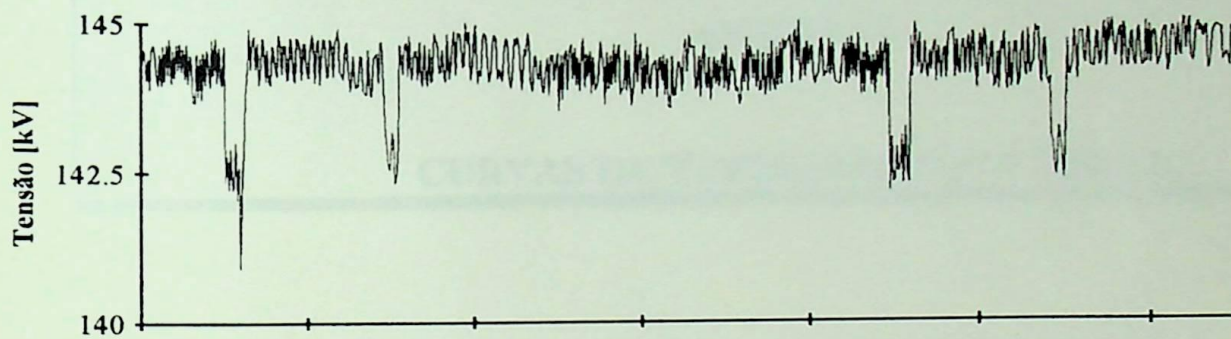
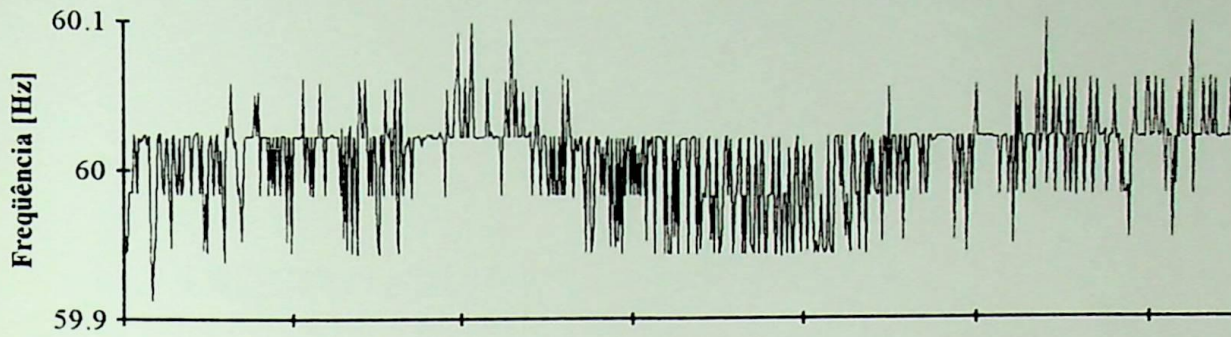
Curva 19: 20/OUT/93



Curva 20: 24/OUT/93



Curva 21: 24/OUT/93



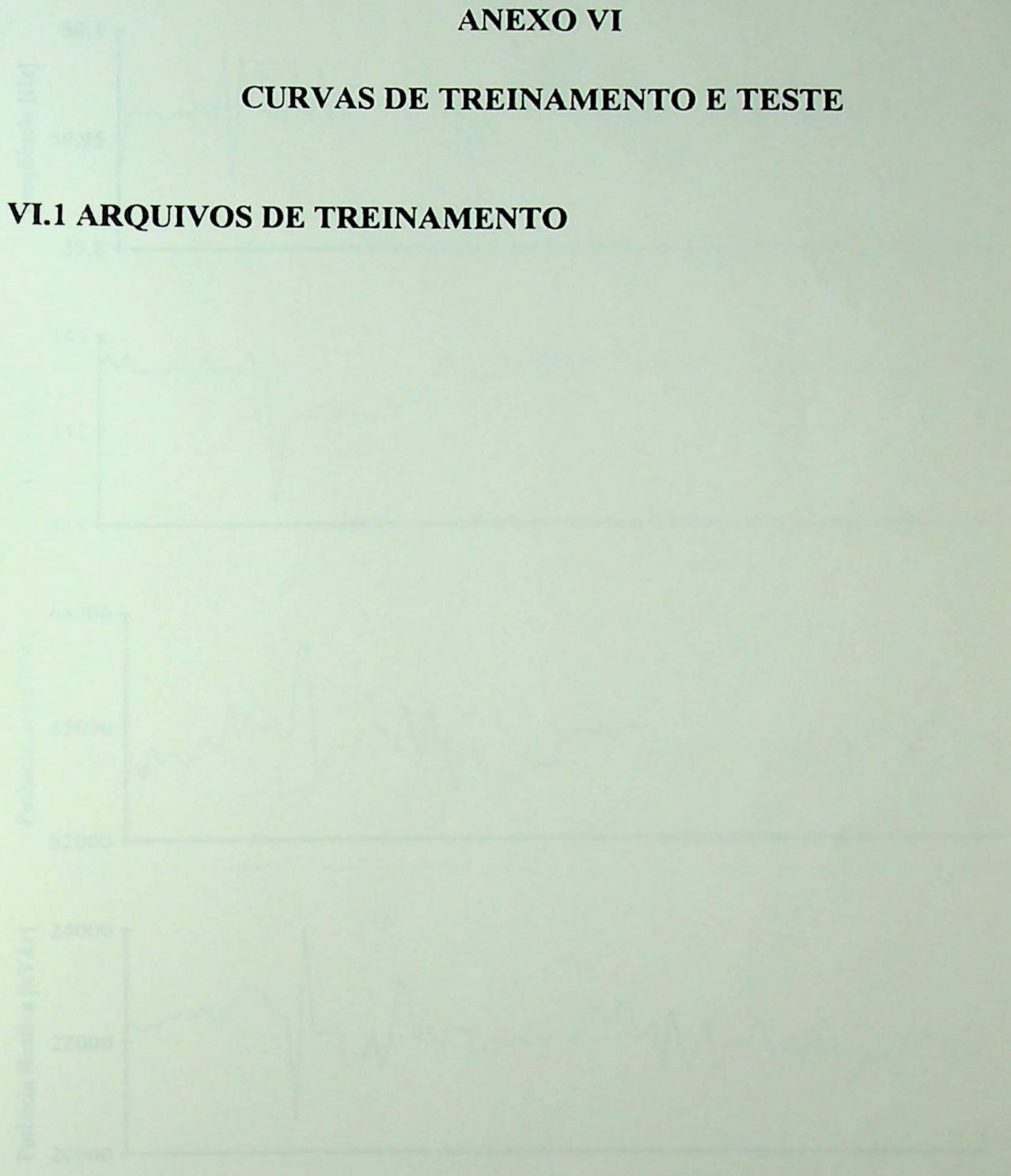
**ANEXO VI**

**CURVAS DE TREINAMENTO E TESTE**

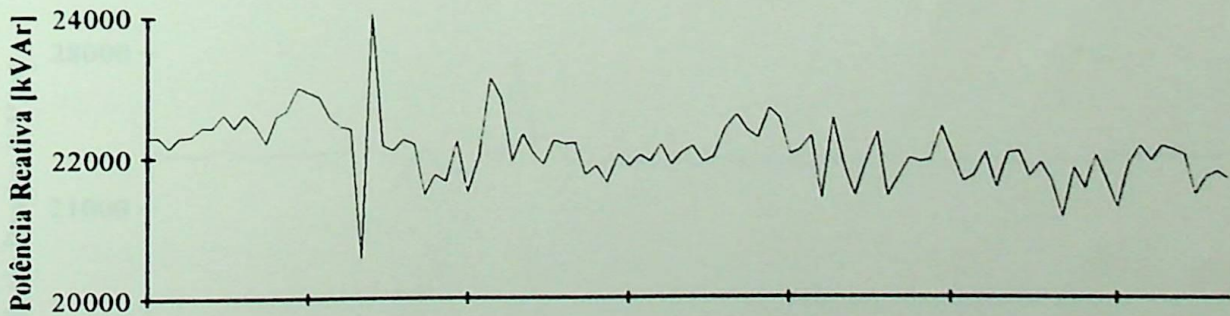
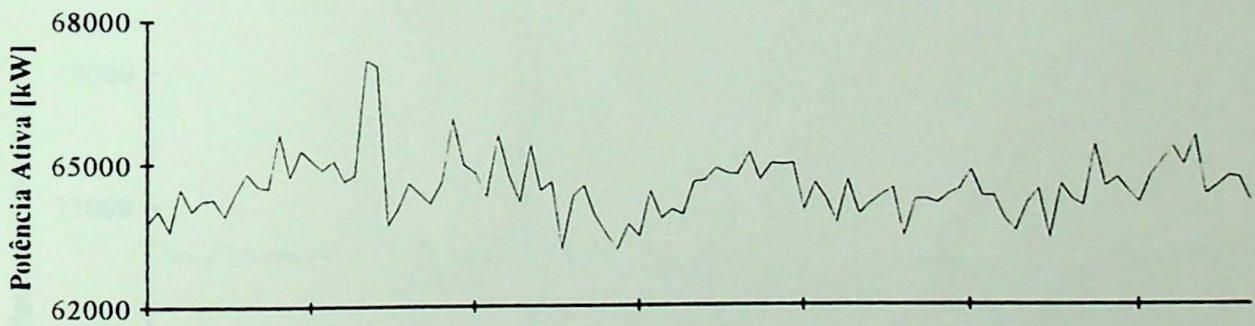
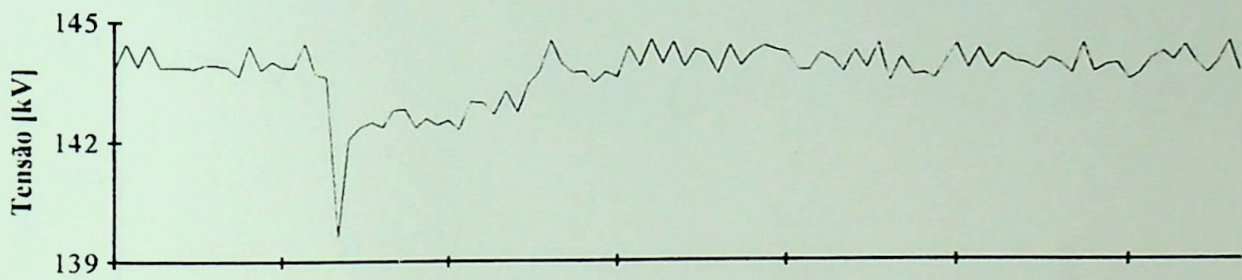
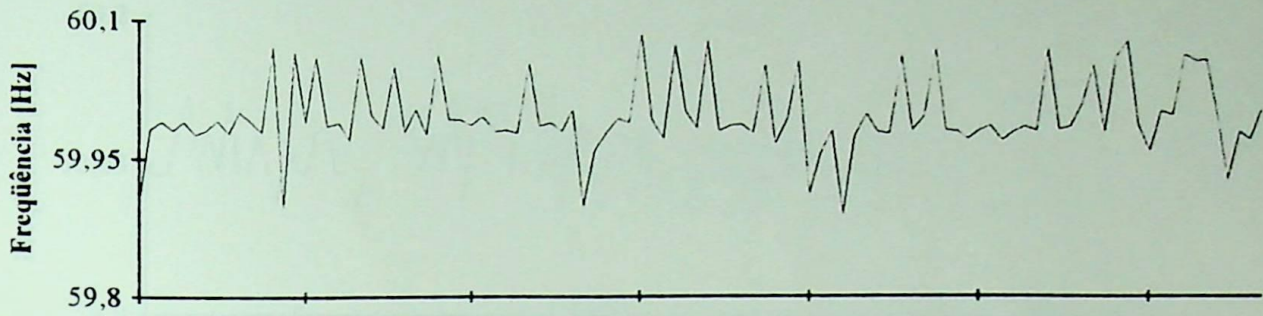
## ANEXO VI

### CURVAS DE TREINAMENTO E TESTE

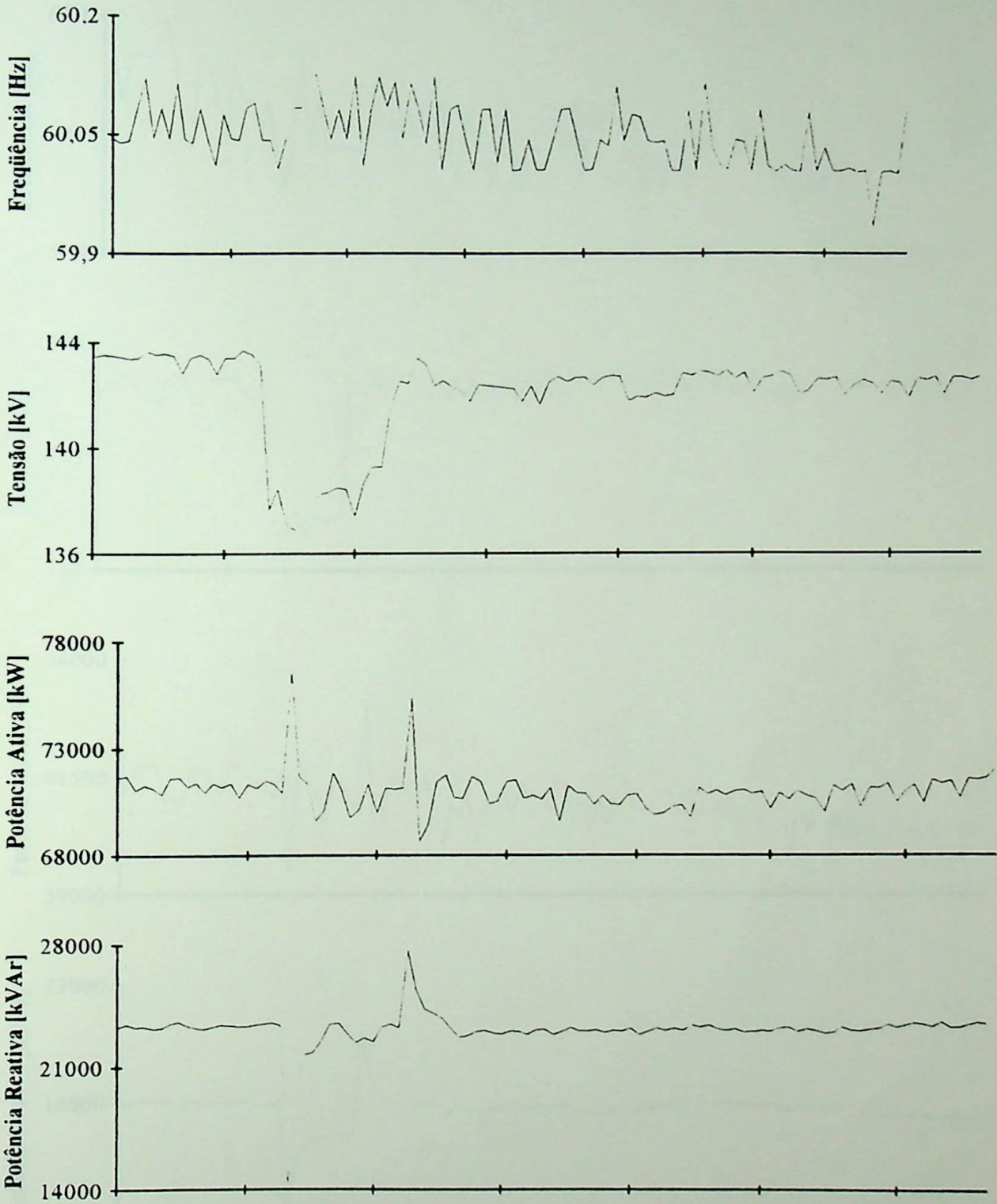
#### VI.1 ARQUIVOS DE TREINAMENTO



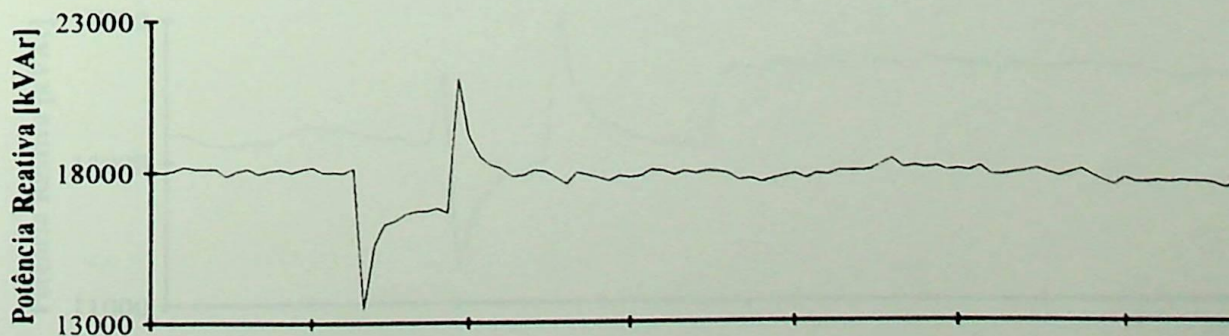
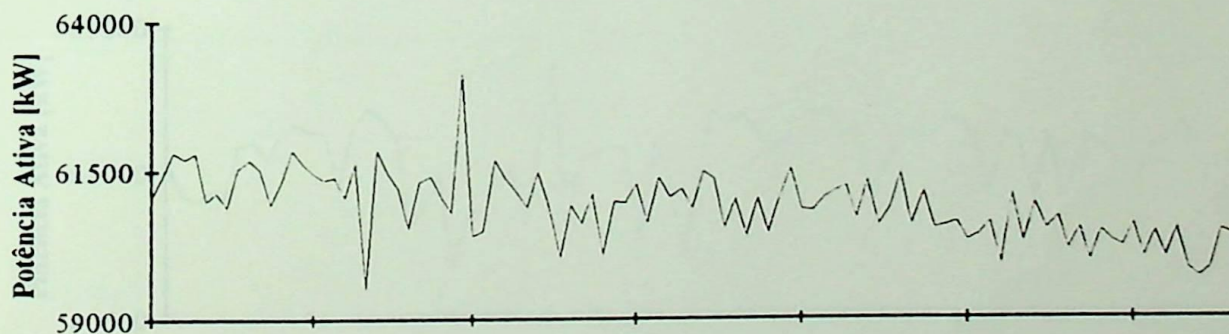
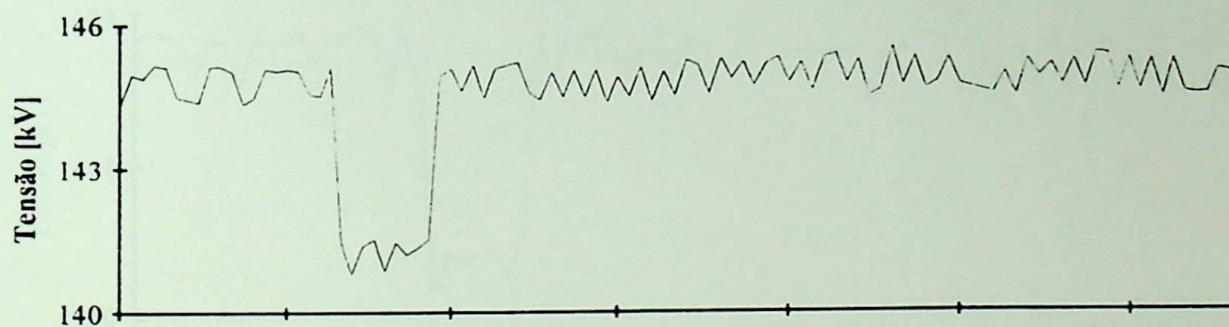
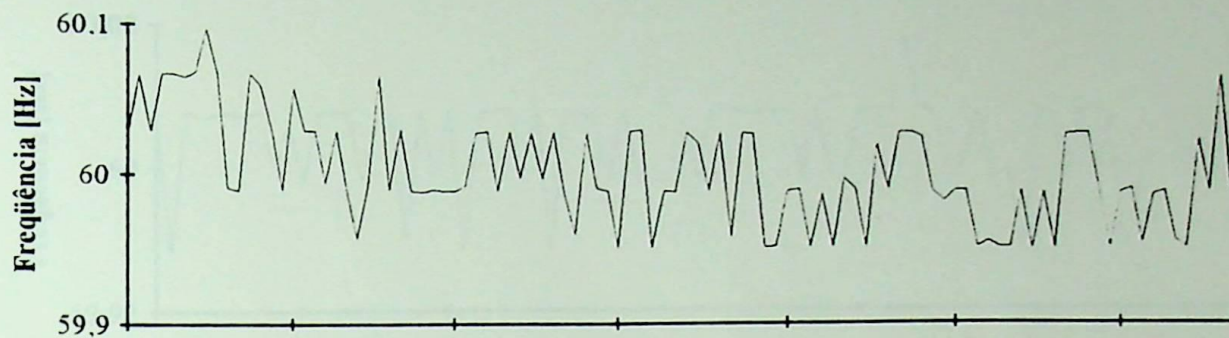
### CURVA 5



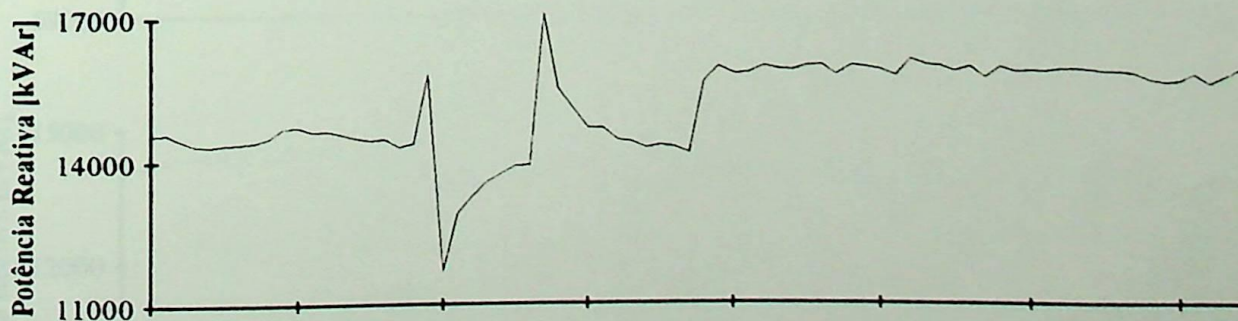
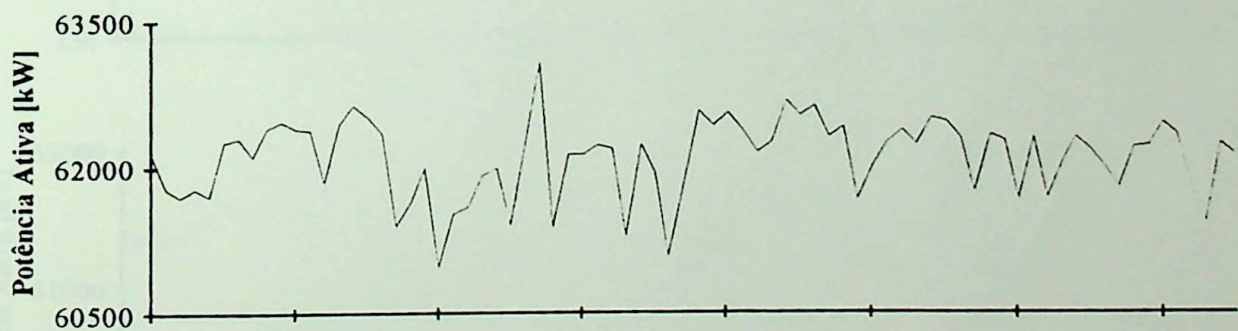
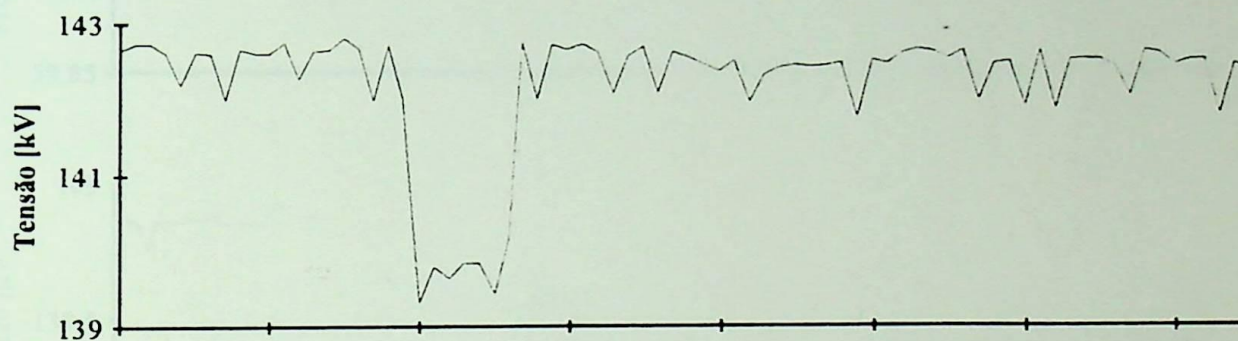
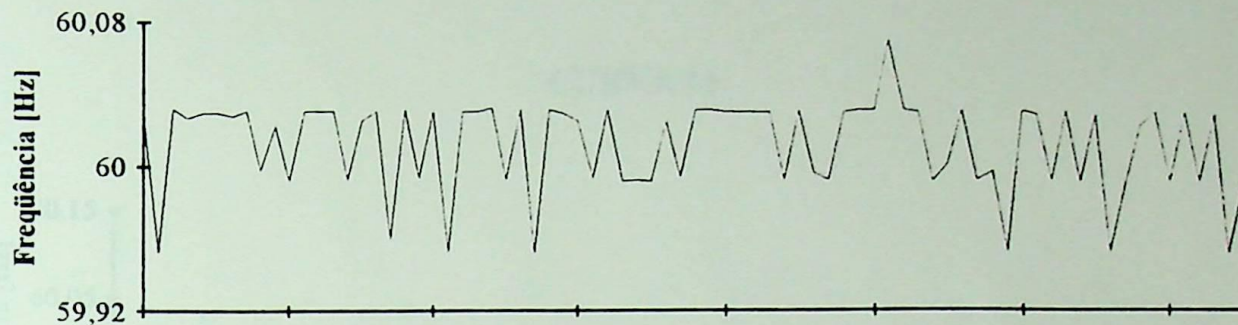
CURVA 7



### CURVA 9

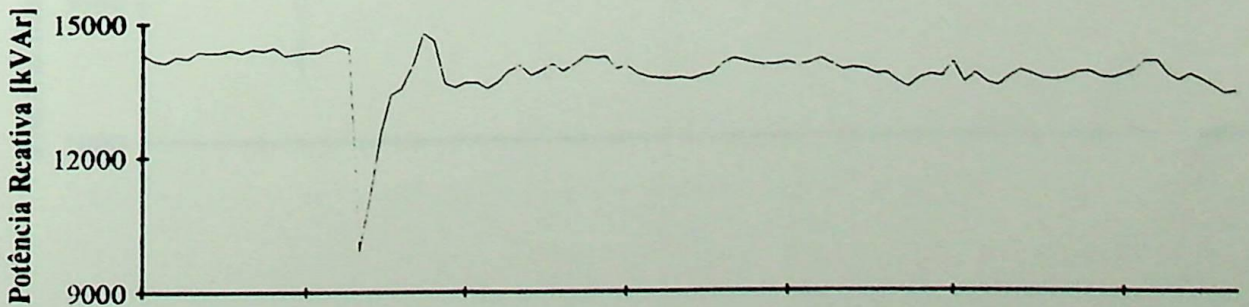
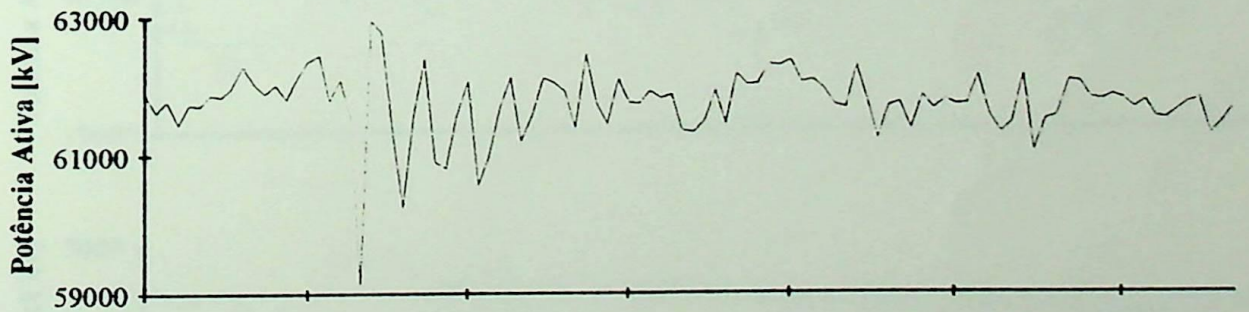
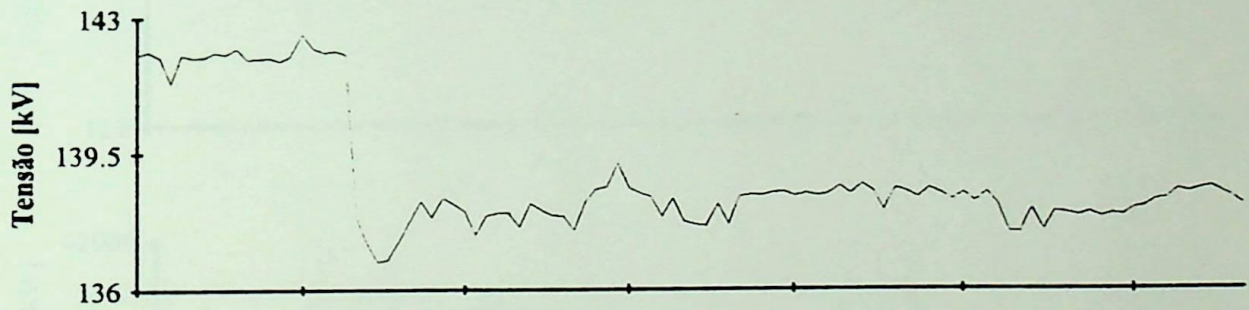
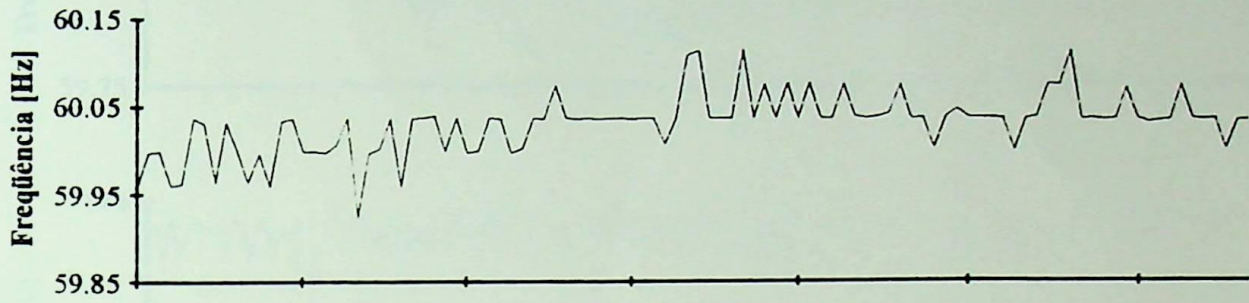


### CURVA 10

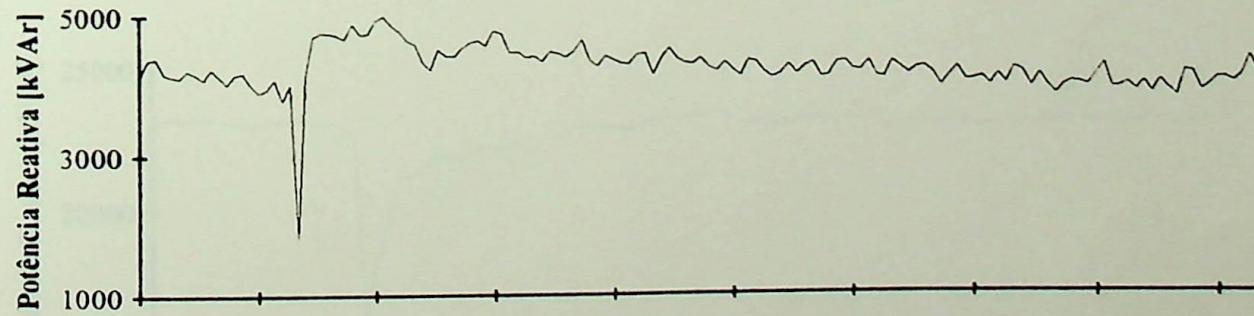
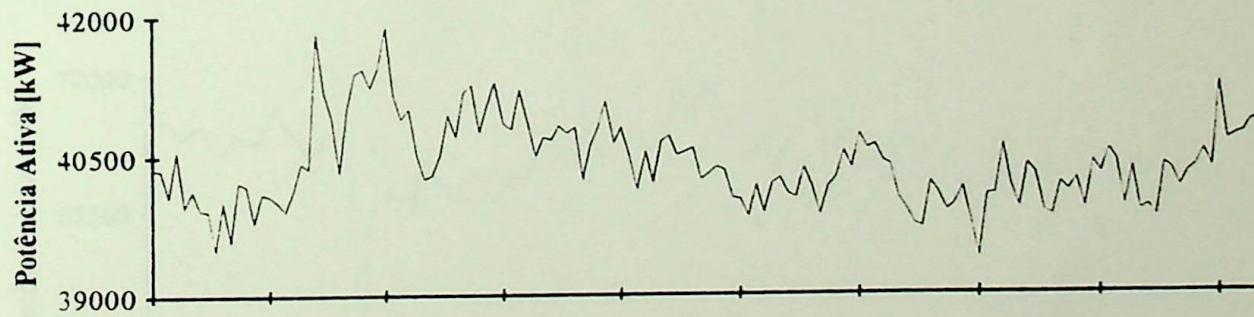
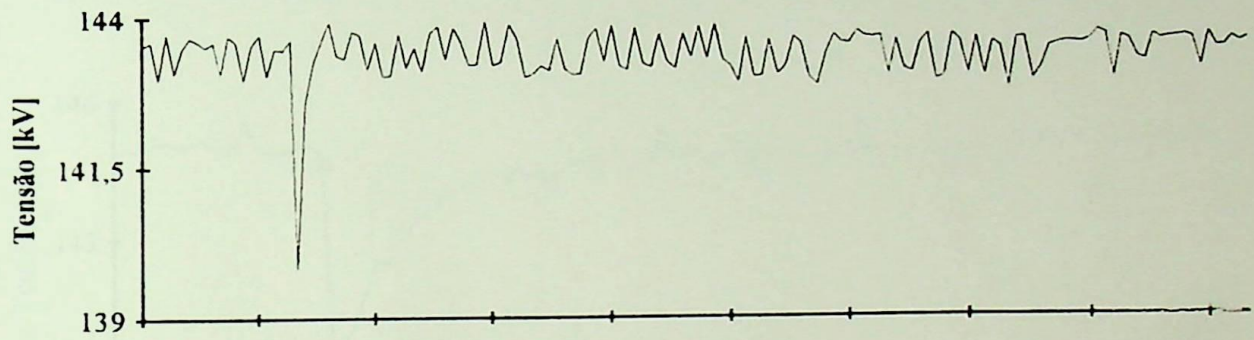
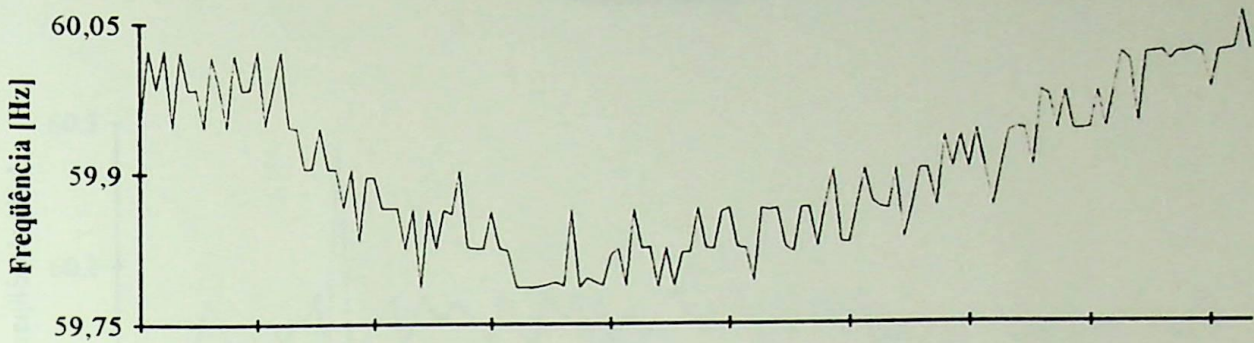


VL2 ARQUIVOS DE TESTE

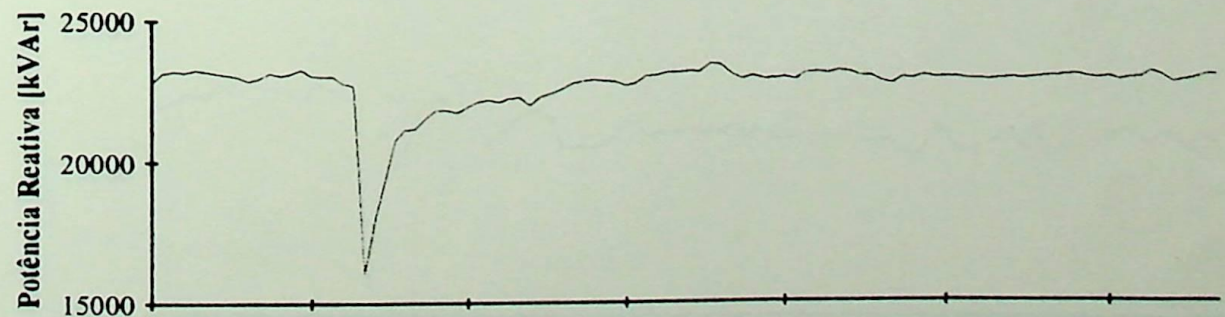
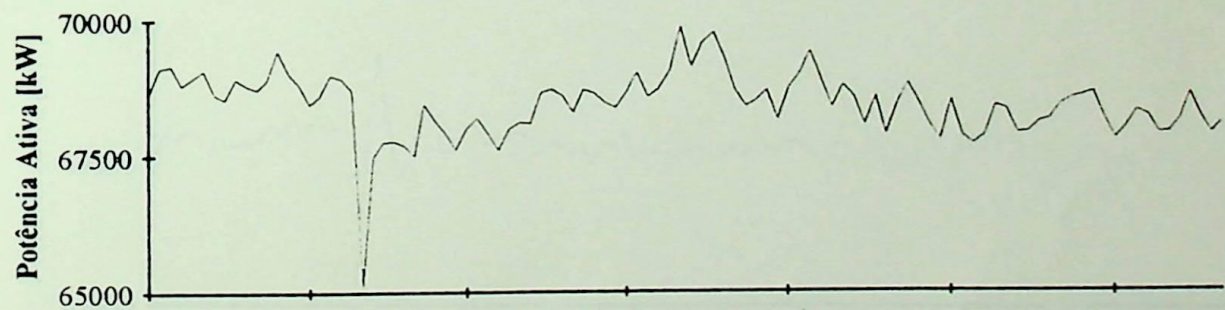
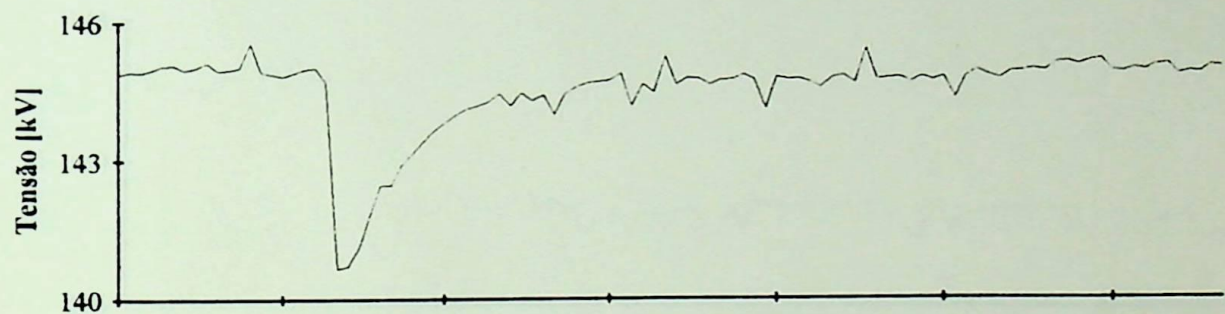
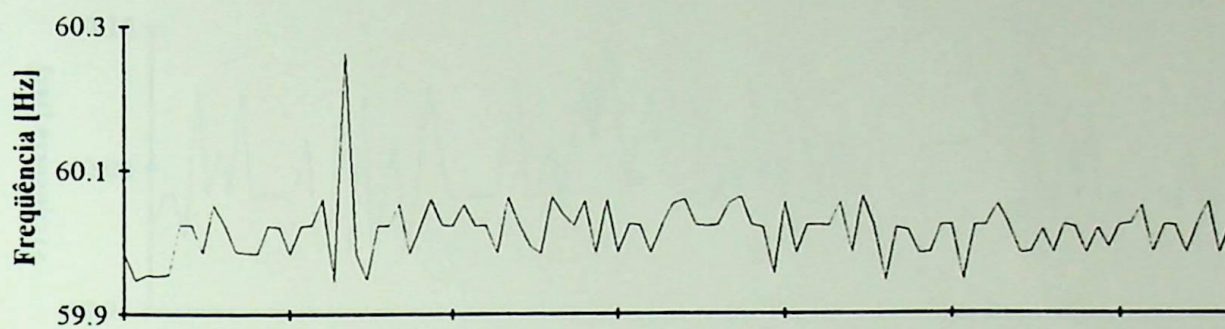
CURVA 11



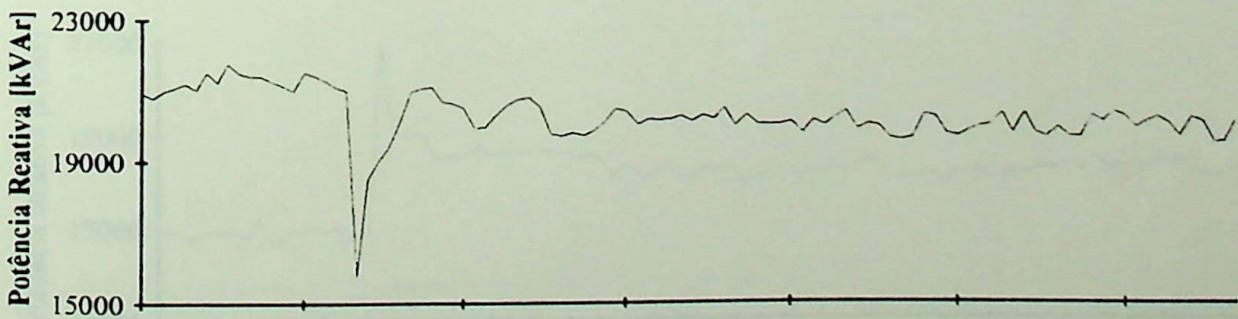
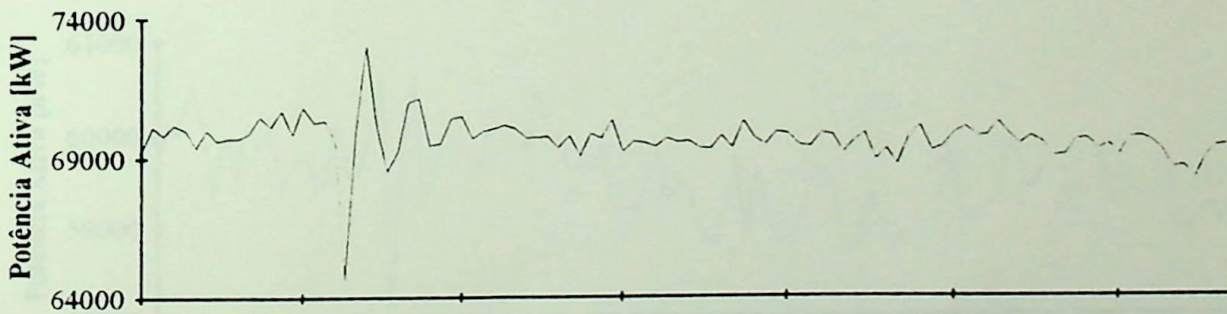
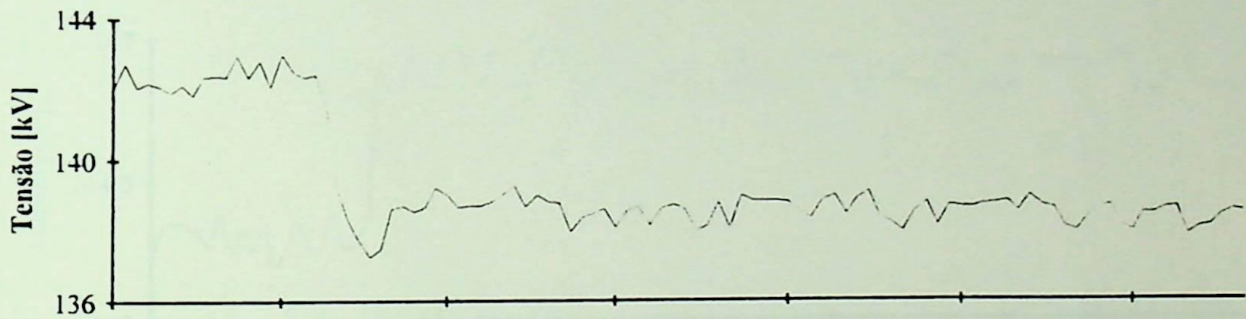
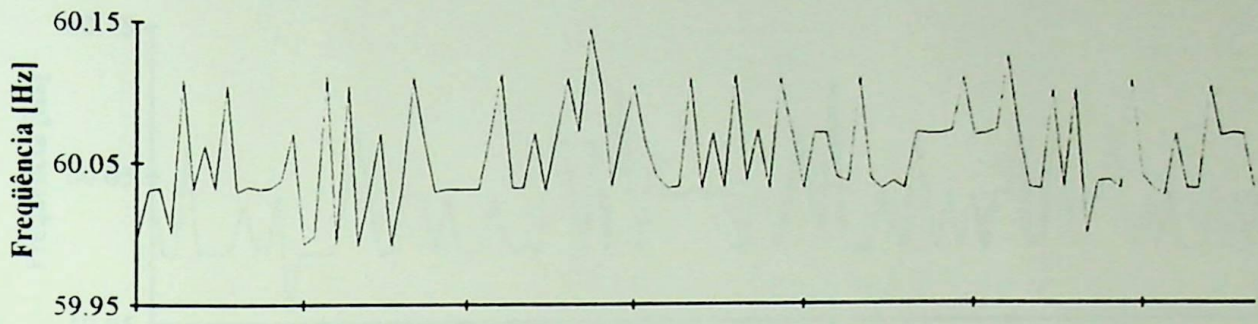
**CURVA 12**



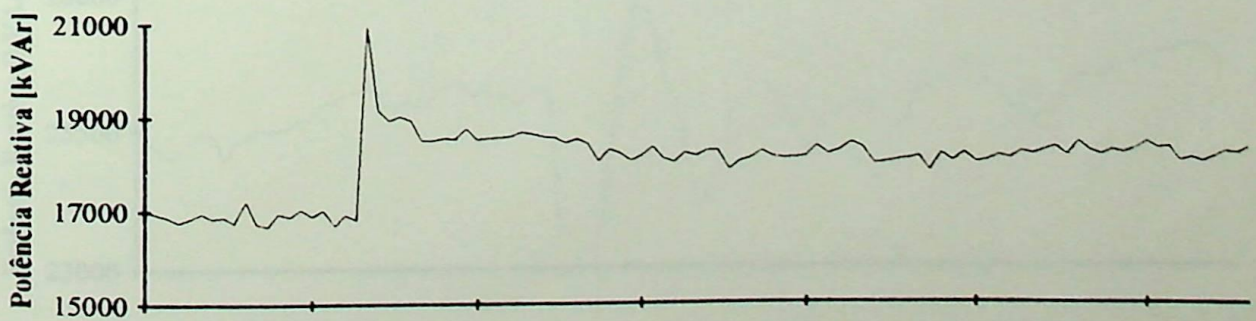
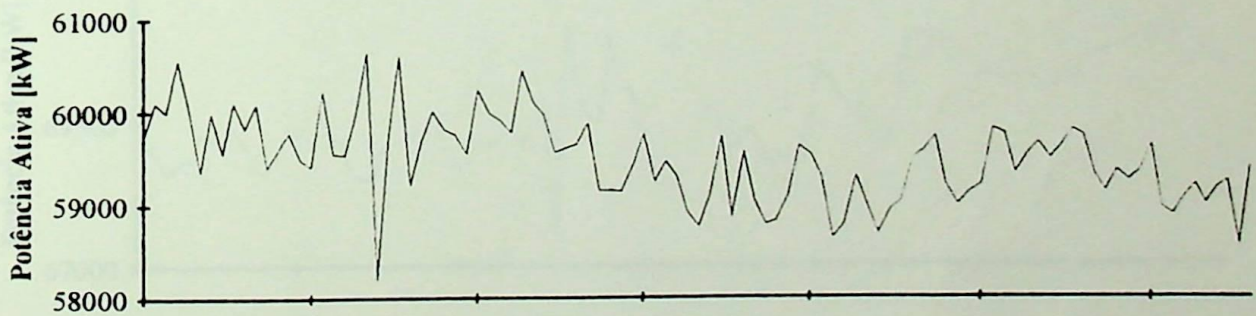
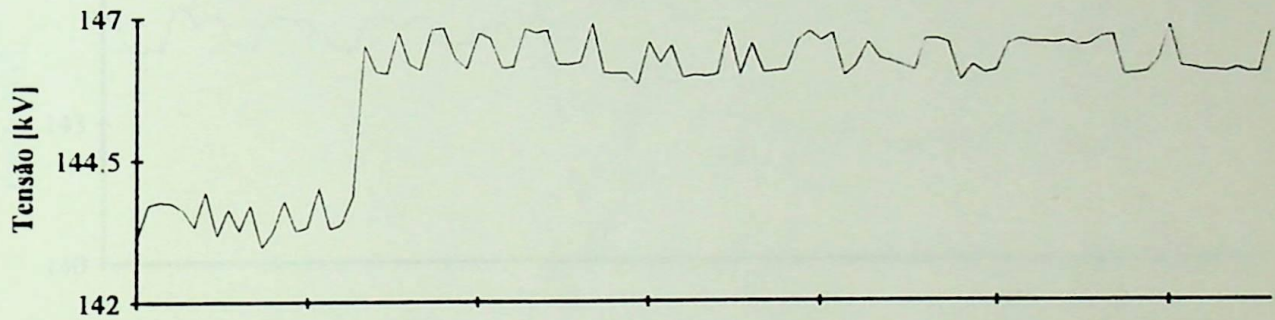
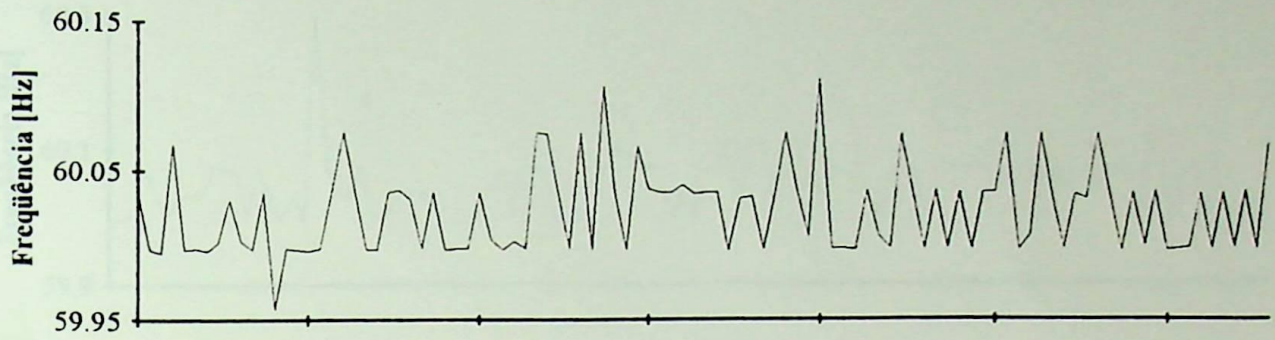
## CURVA 13



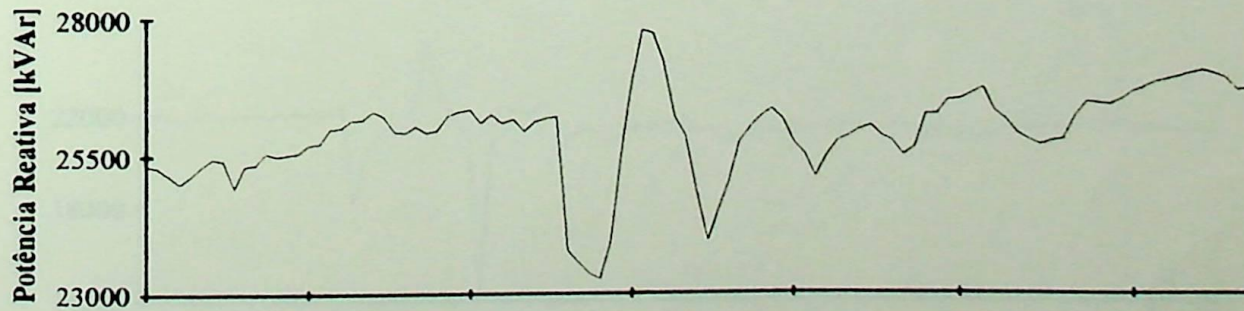
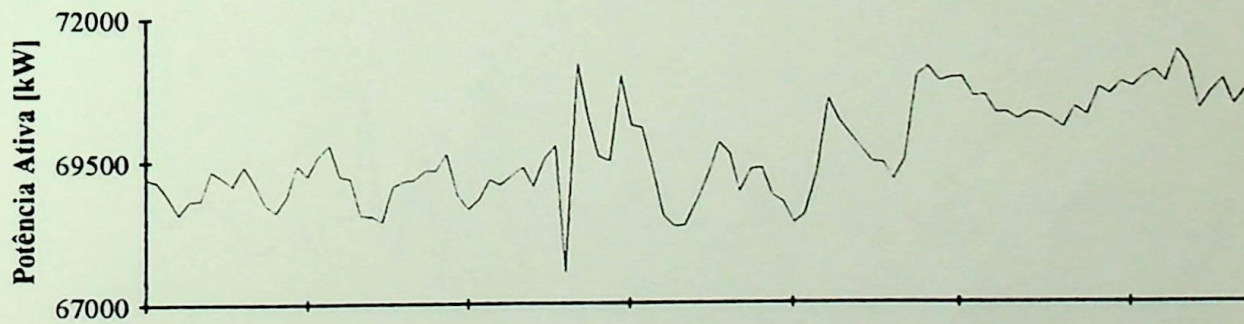
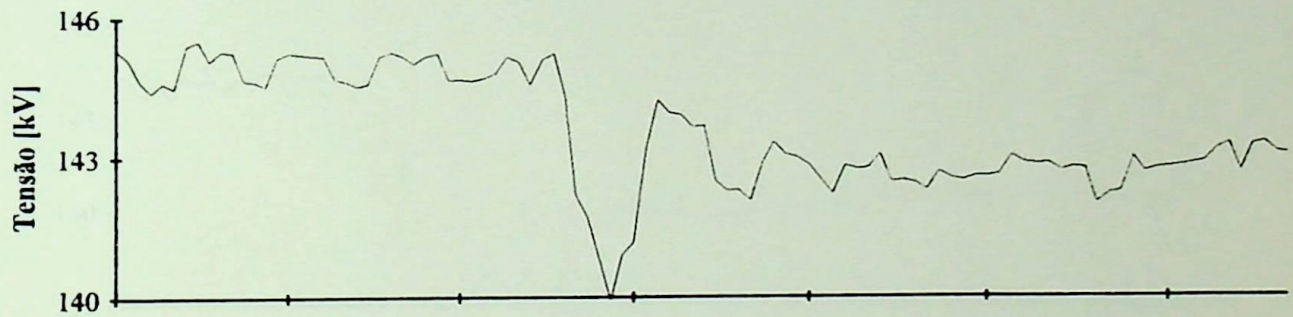
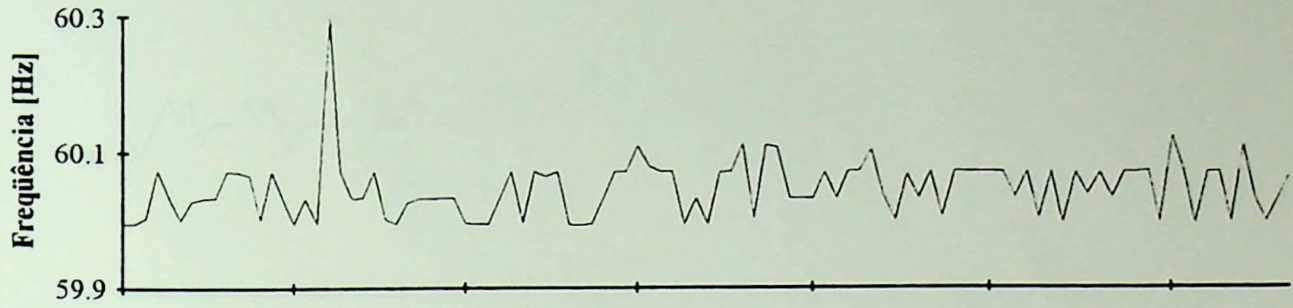
**CURVA 14**



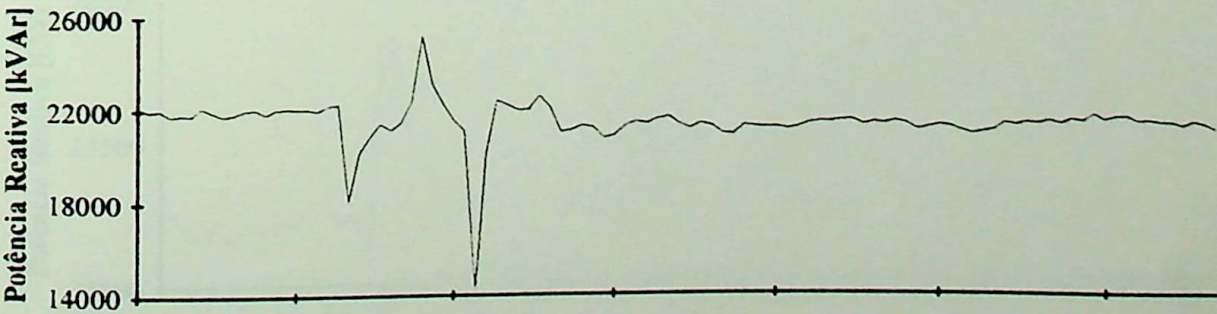
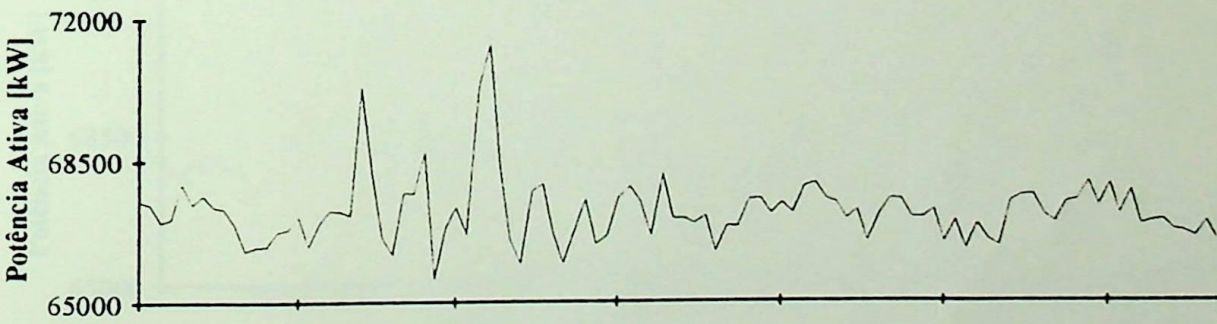
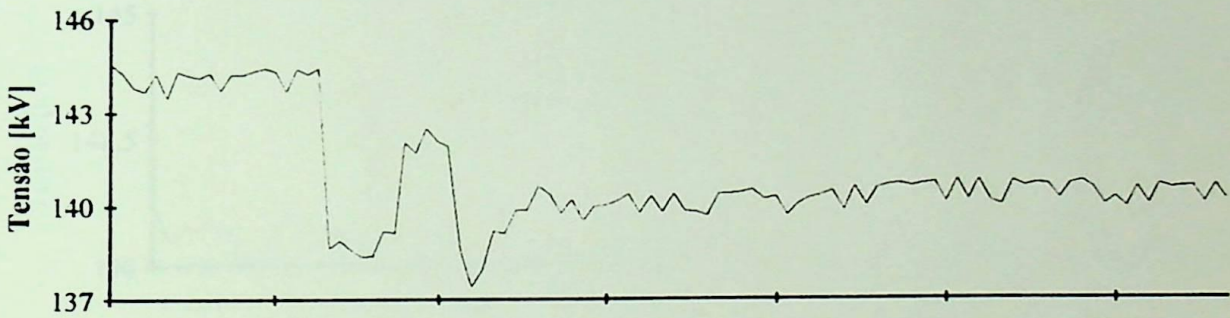
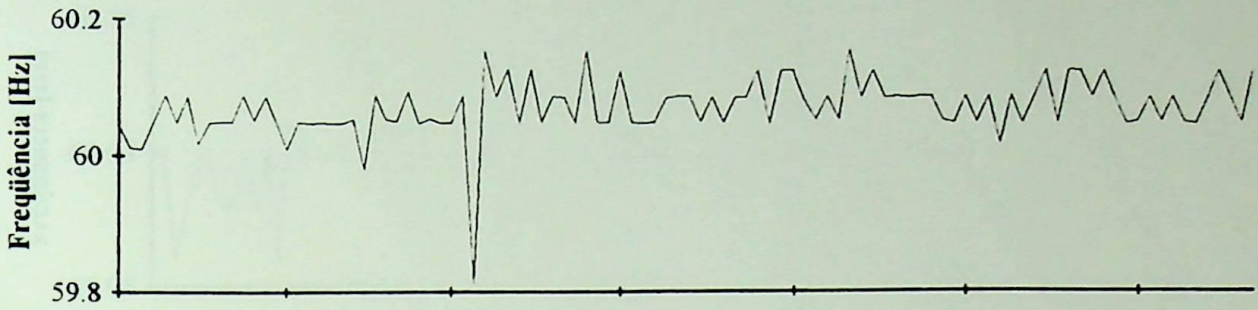
**CURVA 15**



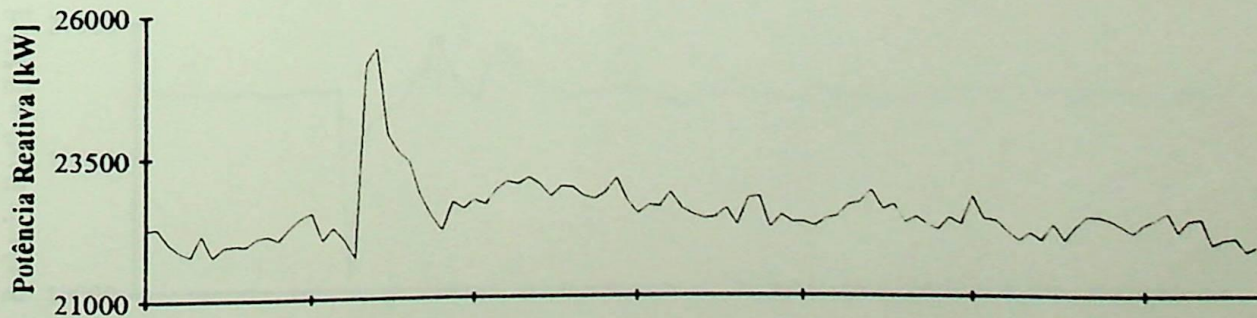
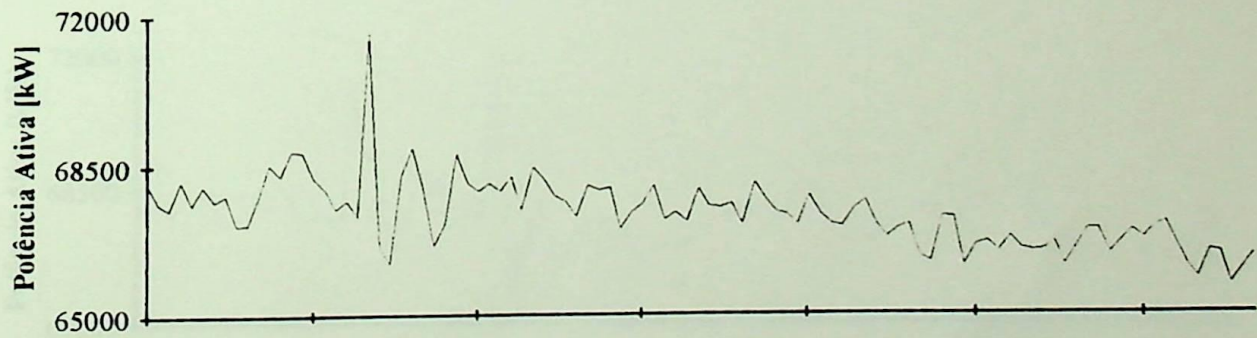
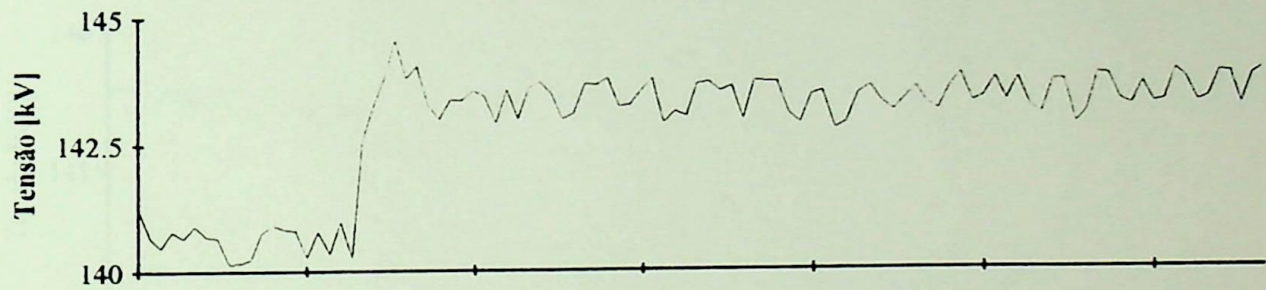
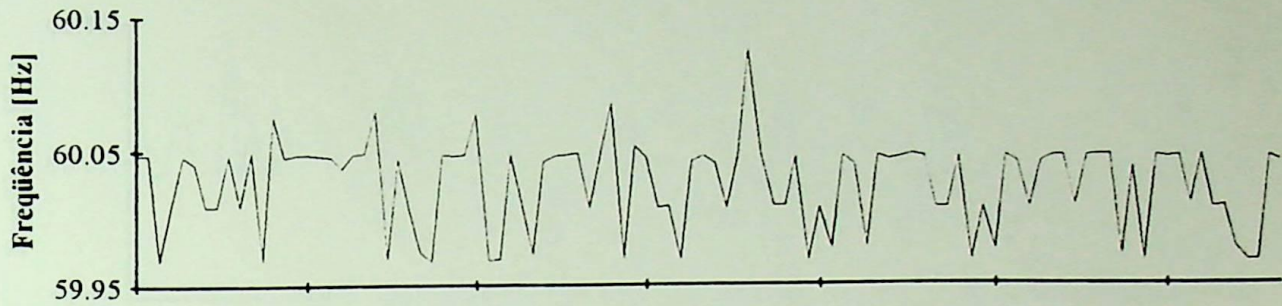
**CURVA 16**



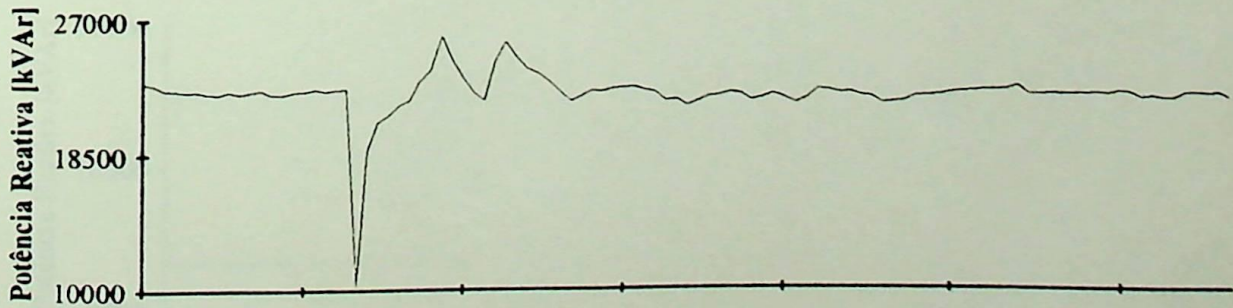
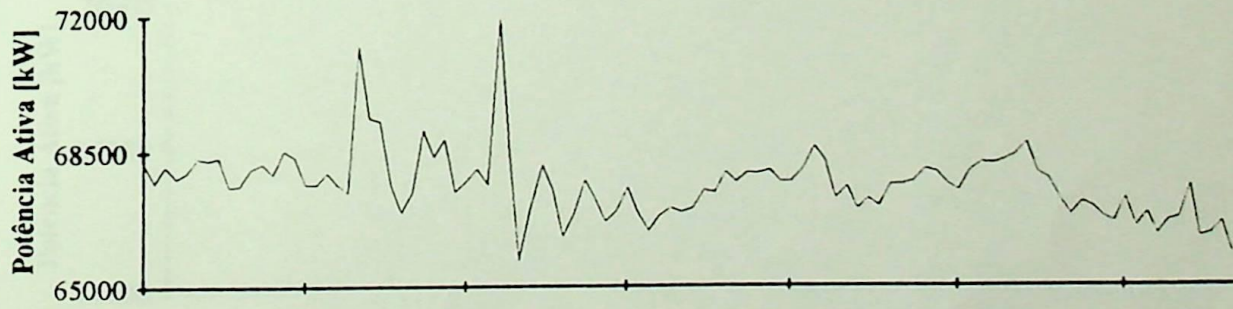
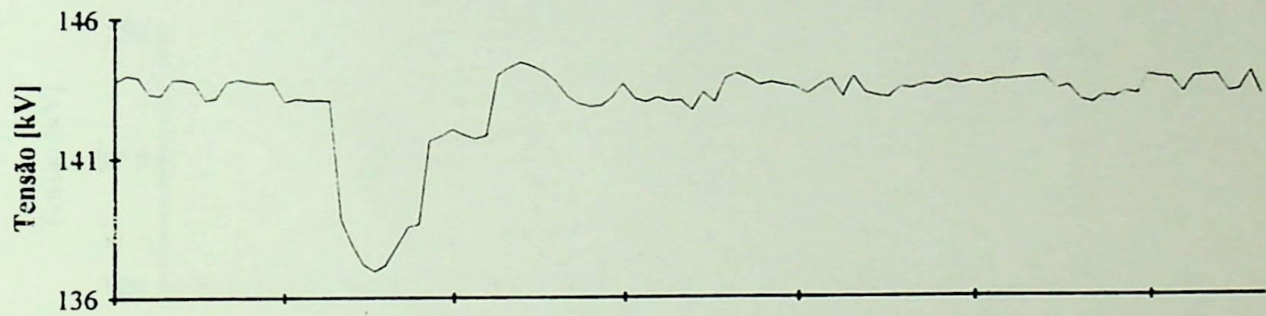
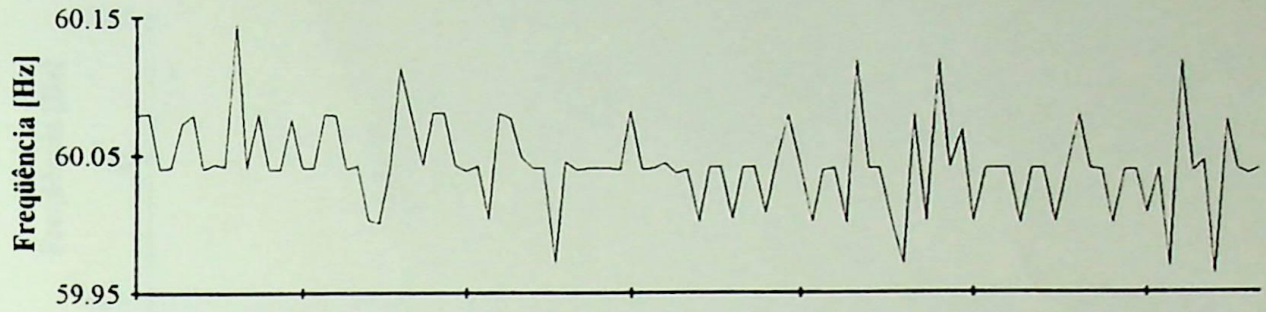
### CURVA 17



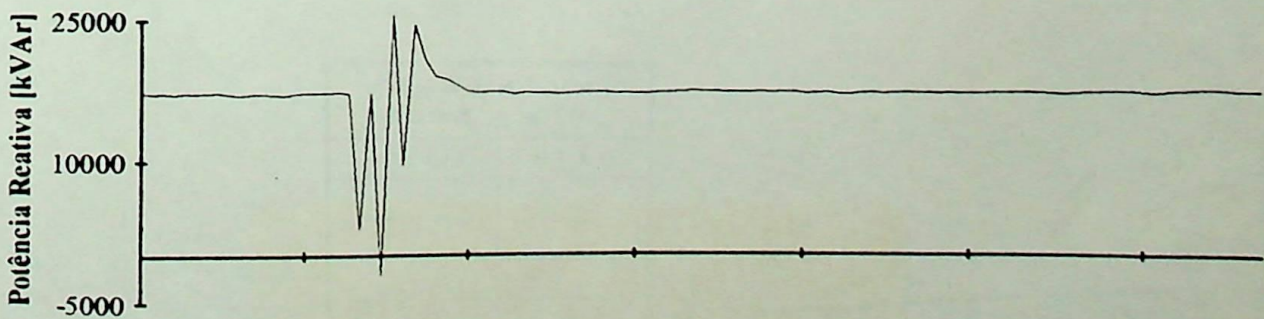
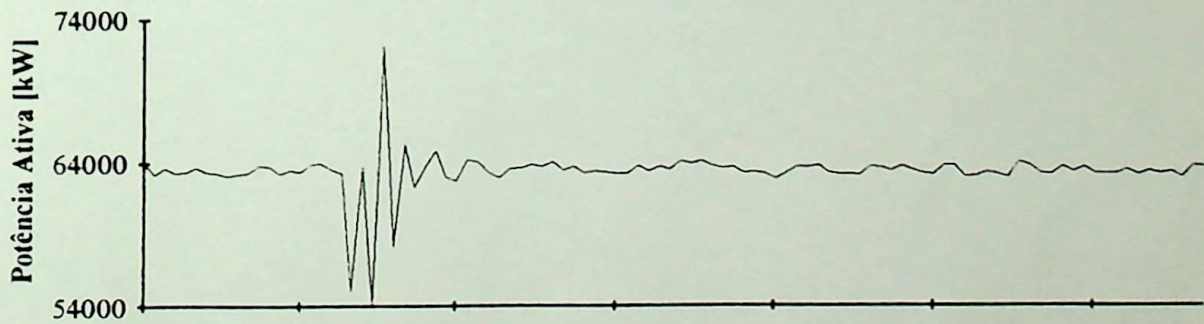
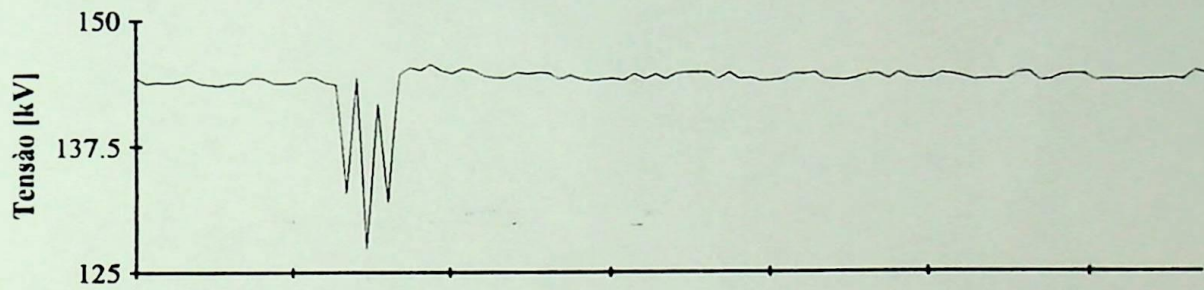
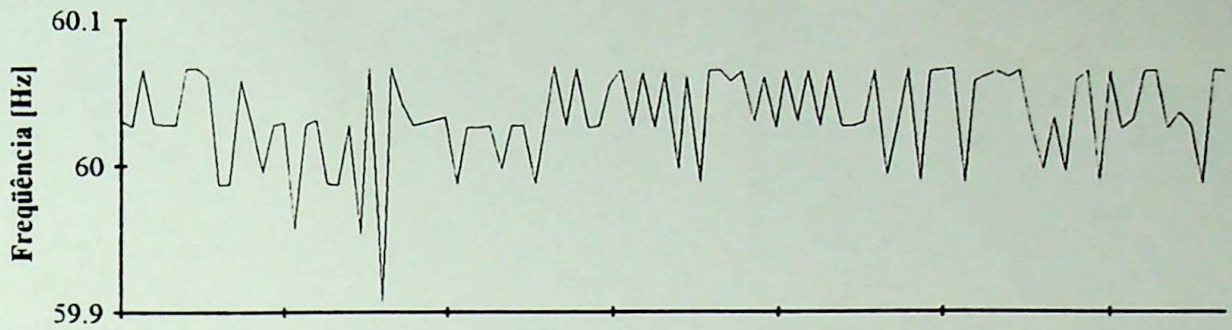
**CURVA 18**



**CURVA 19**



**CURVA 20**





EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ  
8200780



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA