

TESE

773

EFEI



ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA  
NO COMPORTAMENTO DA CARGA DOS  
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

POR MAURO DE OLIVEIRA SOBRINHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PARA OBTENÇÃO  
DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA

ORIENTADOR: PEDRO PAULO DE CARVALHO MENDES (EFEI)

(U4)  
NC

IBRO DE 1994

ITAJUBÁ - MG



*Dedico este trabalho aos meus pais  
João e Mariana, e aos meus irmãos  
André e Daniel.*

## SUMÁRIO

PREFÁCIO.....	iii
NOTAÇÕES.....	iv
<b>CAPÍTULO 1</b>	
INTRODUÇÃO.....	1
<b>CAPÍTULO 2</b>	
REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE CARGA-FREQÜÊNCIA .....	2
2.1 Introdução.....	2
2.2 Modelo do Sistema de Potência.....	2
2.3 Modelos dos Reguladores de Velocidade .....	3
2.3.1 Regulador com queda de velocidade.....	3
2.3.2 Regulador com queda de velocidade e estatismo transitório.....	4
2.4 Modelos das Turbinas .....	5
2.4.1 Turbina térmica com reaquecimento .....	5
2.4.2 Turbina hidráulica com efeito da inércia da água .....	5
2.5 Modelos das Áreas de Controle .....	6
2.5.1 Área de controle térmica .....	6
2.5.2 Área de controle hidráulica .....	7
<b>CAPÍTULO 3</b>	
CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DA CARGA.....	8
3.1 Introdução .....	8
3.2 Componentes Individuais da Carga.....	8
3.3 Carga Industrial .....	9
3.3.1 Setor Cimento.....	10
3.3.2 Setor Cal.....	11
3.3.3 Setor Fundição.....	12
3.3.4 Setor Forjarias .....	13
3.3.5 Setor Mineração.....	14
3.3.6 Setor Alumínio .....	15
3.3.7 Setor Zinco .....	16
3.3.8 Setor Outros Não-Ferrosos .....	17
3.3.9 Setor Química.....	18
3.3.10 Setor Fertilizantes .....	19

3.3.11 Setor Alimentos e Bebidas .....	20
3.3.12 Setor Laticínios .....	21
3.3.13 Setor Têxtil .....	22
3.3.14 Setor Papel e Celulose .....	23
3.3.15 Setor Refratários .....	24
3.3.16 Setor Cerâmica Branca .....	25
3.3.17 Setor Cerâmica Vermelha .....	26
3.3.18 Setor Açúcar e Álcool .....	27
3.3.19 Setor Outros .....	28
3.4 Carga Residencial .....	30
3.4.1 Classe I .....	31
3.4.2 Classe II .....	32
3.4.3 Classe III .....	33
3.4.4 Classe IV .....	34
3.4.5 Classe V .....	35
3.5 Carga Comercial / Serviços .....	37
3.5.1 Grupo Lojas .....	38
3.5.2 Grupo Comércio de Alimentos .....	39
3.5.3 Grupo Postos de Gasolina .....	40
3.5.4 Grupo Serviços de Alimentação .....	41
3.5.5 Grupo Serviços de Reparo .....	42
3.5.6 Grupo Serviços Pessoais .....	43
3.5.7 Grupo Agências Bancárias .....	44
3.5.8 Grupo Escritórios .....	45
3.5.9 Grupo Grandes Estabelecimentos .....	46
3.6 Composição da Carga em Áreas de Controle .....	48
3.6.1 Introdução .....	48
3.6.2 Composição de mercado .....	48
3.6.3 Consumidores típicos .....	49
3.6.4 Características das áreas de controle .....	51
3.7 Simulações do Sistema de Controle de Carga-Frequência .....	53
3.7.1 Considerações .....	53
3.7.2 Áreas térmicas isoladas .....	54
3.7.3 Áreas hidráulicas isoladas .....	57
3.7.4 Estabilidade dos sistemas de controle .....	60

## CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES .....	62
BIBLIOGRAFIA .....	64

## PREFÁCIO

As características das cargas afetam o comportamento dinâmico dos sistemas elétricos, uma vez que elas variam com a tensão e com a frequência.

Portanto, supõem-se ser importante a representação própria das mesmas nos estudos de simulação dinâmica dos sistemas elétricos, baseado no fato de que a variação da carga com a frequência é um fator que normalmente contribui para o amortecimento de oscilações nos sistemas.

A proposta do presente trabalho é dar uma contribuição no que diz respeito a uma melhor caracterização dos diversos tipos de cargas pertencentes aos diferentes setores de consumo, bem como reunir em um documento informações pertinentes ao assunto, servindo como um material de consulta, tanto a nível acadêmico como empresarial, quando da realização de estudos voltados às simulações no tempo visando conhecer o comportamento da carga face a pequenas variações na frequência de uma dada empresa, área de controle, ou ainda, de algum setor ou grupo de consumo de energia elétrica.

Finalizando, gostaria de agradecer a toda turma da BIM, em nome da Lúcia, pela paciência na devolução das publicações, ao Egon pelos favores e acolhidas em Itajubá, a Ana da biblioteca da CPFL, ao estagiário Daniel pela ajuda na confecção do texto, e em especial ao meu orientador Prof. Pedro Paulo de Carvalho Mendes, que apesar da distância esteve sempre presente.

Mauro de Oliveira Sobrinho

Campinas, novembro de 1994

## NOTAÇÕES

Ao longo deste trabalho serão utilizadas as seguintes notações:

%Ilu = participação percentual do uso final iluminação no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga industrial ou residencial ou comercial/serviços.

%Mot = participação percentual do uso final motores elétricos no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga industrial.

%Gec = participação percentual do uso final geração de calor no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga industrial.

%Elq = participação percentual do uso final eletroquímica no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga industrial.

%Out = participação percentual do uso final outros fins no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga industrial ou comercial/serviços.

%Laz = participação percentual do uso final lazer no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga residencial.

%Cal = participação percentual do uso final conservação de alimentos no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga residencial.

%Sed = participação percentual do uso final serviços domésticos no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga residencial.

%Coa = participação percentual do uso final condicionamento ambiental no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga residencial ou comercial/serviços.

%Aqa = participação percentual do uso final aquecimento de água no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga residencial.

%Ref = participação percentual do uso final refrigeração no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga comercial/serviços.

%Coc = participação percentual do uso final cocção no consumo de energia elétrica nos diversos segmentos consumidores da carga comercial/serviços.

Di1 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga aquecedor com relação a frequência.

Di2 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga ar condicionado tipo janela com relação a frequência.

Di3 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga ar condicionado central monofásico com relação a frequência.

Di4 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga ar condicionado central trifásico com relação a frequência.

Di5 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga motor de indução (5-200 Hp) com relação a frequência.

Di6 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga motor de indução (>200 Hp) com relação a frequência.

Di7 = coeficiente de amortecimento dos componentes individuais da carga bomba e outros motores com relação a frequência.

Di8 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga conversor com relação a frequência.

Di9 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga eletrodoméstico com motor com relação a frequência.

Di10 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga forno com relação a frequência.

Di11 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga lâmpada incandescente com relação a frequência.

Di12 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga lâmpada fluorescente com relação a frequência.

Di13 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga máquina de lavar roupa com relação a frequência.

Di14 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga máquina de lavar prato com relação a frequência.

- Di15 = coeficiente de amortecimento dos componentes individuais da carga refrigerador e freezer com relação a frequência.
- Di16 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga secadora de roupa com relação a frequência.
- Di17 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga cuba eletrolítica com relação a frequência.
- Di18 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga aparelhos eletrônicos com relação a frequência.
- Di19 = coeficiente de amortecimento do componente individual da carga televisor com relação a frequência.
- D(cim) = coeficiente de amortecimento do setor cimento com relação a frequência.
- D(cal) = coeficiente de amortecimento do setor cal com relação a frequência.
- D(fun) = coeficiente de amortecimento do setor fundição com relação a frequência.
- D(for) = coeficiente de amortecimento do setor forjarias com relação a frequência.
- D(min) = coeficiente de amortecimento do setor mineração com relação a frequência.
- D(alu) = coeficiente de amortecimento do setor alumínio com relação a frequência.
- D(zin) = coeficiente de amortecimento do setor zinco com relação a frequência.
- D(onf) = coeficiente de amortecimento do setor outros não-ferrosos com relação a frequência.
- D(qui) = coeficiente de amortecimento do setor química com relação a frequência.
- D(fer) = coeficiente de amortecimento do setor fertilizantes com relação a frequência.
- D(aeb) = coeficiente de amortecimento do setor alimentos e bebidas com relação a frequência.
- D(lat) = coeficiente de amortecimento do setor laticínios com relação a frequência.
- D(tex) = coeficiente de amortecimento do setor têxtil com relação a frequência.
- D(pec) = coeficiente de amortecimento do setor papel e celulose com relação a frequência.

D(ref) = coeficiente de amortecimento do setor refratários com relação a frequência.

D(ceb) = coeficiente de amortecimento do setor cerâmica branca com relação a frequência.

D(cev) = coeficiente de amortecimento do setor cerâmica vermelha com relação a frequência.

D(aea) = coeficiente de amortecimento do setor açúcar e álcool com relação a frequência.

D(out) = coeficiente de amortecimento do setor outros com relação a frequência.

D(cl1) = coeficiente de amortecimento da classe I com relação a frequência.

D(cl2) = coeficiente de amortecimento da classe II com relação a frequência.

D(cl3) = coeficiente de amortecimento da classe III com relação a frequência.

D(cl4) = coeficiente de amortecimento da classe IV com relação a frequência.

D(cl5) = coeficiente de amortecimento da classe V com relação a frequência.

D(loj) = coeficiente de amortecimento do grupo lojas com relação a frequência.

D(cda) = coeficiente de amortecimento do grupo comércio de alimentos com relação a frequência.

D(pdg) = coeficiente de amortecimento do grupo postos de gasolina com relação a frequência.

D(sda) = coeficiente de amortecimento do grupo serviços de alimentação com relação a frequência.

D(sdr) = coeficiente de amortecimento do grupo serviços de reparo com relação a frequência.

D(sep) = coeficiente de amortecimento do grupo serviços pessoais com relação a frequência.

D(agb) = coeficiente de amortecimento do grupo agências bancárias com relação a frequência.

D(esc) = coeficiente de amortecimento do grupo escritórios com relação a frequência.

D(gre) = coeficiente de amortecimento do grupo grandes estabelecimentos com relação a frequência.

%Ind = participação percentual da carga industrial na composição de mercado dos diversos sistemas de controle.

%Res = participação percentual da carga residencial na composição de mercado dos diversos sistemas de controle.

%Com = participação percentual da carga comercial/serviços na composição de mercado dos diversos sistemas de controle.

D(in1) = valor médio do coeficiente de amortecimento dos setores pertencentes a carga industrial onde existe predominância do uso final motores elétricos.

D(in2) = valor médio do coeficiente de amortecimento dos setores pertencentes a carga industrial onde existe predominância dos usos finais geração de calor e motores elétricos.

D(in3) = valor médio do coeficiente de amortecimento dos setores pertencentes a carga industrial onde existe predominância do uso final eletroquímica.

D(re1) = valor médio do coeficiente de amortecimento das classes pertencentes a carga residencial onde existe predominância dos usos finais condicionamento ambiental e aquecimento de água.

D(re2) = valor médio do coeficiente de amortecimento das classes pertencentes a carga residencial onde existe predominância dos usos finais lazer e serviços domésticos.

D(co1) = valor médio do coeficiente de amortecimento dos grupos pertencentes a carga comercial/serviços onde existe predominância dos usos finais refrigeração e cocção.

D(co2) = valor médio do coeficiente de amortecimento dos grupos pertencentes a carga comercial/serviços onde existe predominância dos usos finais outros fins e iluminação.

D(co3) = valor médio do coeficiente de amortecimento dos grupos pertencentes a carga comercial/serviços onde existe predominância dos usos finais iluminação e condicionamento ambiental.

D(st1) = coeficiente de amortecimento do sistema T1.

D(st2) = coeficiente de amortecimento do sistema T2.

D(st3) = coeficiente de amortecimento do sistema T3.

D(sh1) = coeficiente de amortecimento do sistema H1.

D(sh2) = coeficiente de amortecimento do sistema H2.

D(sh3) = coeficiente de amortecimento do sistema H3.

# 1. INTRODUÇÃO

A representação da carga de um sistema elétrico de potência é uma tarefa não muito simples, visto que sua magnitude e composição variam continuamente, em função entre outros motivos, da grande diversidade de seus componentes.

Fazendo um breve estado da arte sobre o assunto em pauta, mais especificamente da representação da carga com relação a frequência, pode-se citar nas décadas de 50 e 60, autores como C. Concordia, L. K. Kirchmayer e N. Cohn[13,14,15,16], que enfocaram a importância do efeito da característica da carga na estabilidade do sistema. Nos anos 70 e 80, G. J. Berg e C. Concordia[17,18,19] entre outros, publicação do EPRI[11], bem como referências mais recentes[6,20,21] mostram a característica da carga com relação a frequência de forma mais particularizada, enfocando alguns equipamentos integrantes da carga de um sistema elétrico de potência.

Ciente das dificuldades, e tendo em mente o fato da importante contribuição que o amortecimento causado pela variação da carga com a frequência pode provocar nas oscilações nos sistemas, propôs-se neste trabalho uma metodologia de cálculo para a obtenção, de forma mais precisa, do parâmetro  $D$ , que é o coeficiente de amortecimento da carga com relação a frequência, visando assim uma melhor representação das cargas, baseados em modelos lineares já existentes e usados nos estudos de estabilidade de sistemas sujeitos à pequena perturbação ou impacto de carga.

Assim sendo, em uma primeira fase serão apresentados os modelos matemáticos dos componentes do sistema de controle de carga-frequência através de funções de transferências, utilizando a representação por diagrama de blocos.

A segunda fase, apresenta a carga do sistema elétrico de potência dividida em carga industrial, carga residencial e carga comercial/serviços. Conhecendo-se a divisão percentual do consumo de energia elétrica nos diversos setores segundo os diferentes usos finais, e os valores dos coeficientes de amortecimento da carga com relação a frequência dos componentes individuais da carga, será possível determinar os valores dos coeficientes de amortecimento para os diversos segmentos consumidores integrantes da carga do sistema, verificando-se ainda, a influência da variação da frequência no comportamento da carga através de simulações, considerando-se apenas a regulação própria da mesma.

A terceira fase, apresenta, a título de ilustração, sistemas de controle de carga-frequência cuja carga mostra características distintas, no que diz respeito a composição de mercado e distribuição do consumo de energia elétrica por usos finais, admitindo-se, além da auto-regulação da carga, o efeito da atuação dos reguladores de velocidade quando da realização das simulações.

## 2. REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE CARGA-FREQÜÊNCIA

### 2.1 Introdução

Para se analisar o comportamento dinâmico do sistema de controle de carga-freqüência (malha pf), de um sistema elétrico de potência, quando este é submetido a uma pequena variação ou impacto de carga, é necessária uma representação adequada de seus componentes. O modelo matemático dos componentes é apresentado a seguir [1,2,3,7].

### 2.2 Modelo do Sistema de Potência

A característica inerente ao sistema de potência de se auto-regular é chamada de regulação própria do sistema. Ela pode ser expressa através do parâmetro D, que é o coeficiente de amortecimento da carga com relação a freqüência, dado por:

$$D = \frac{\Delta P_{cf}}{\Delta F}$$

onde:

$\Delta P_{cf}$  = variação da carga com a freqüência [MW]

$\Delta F$  = variação da freqüência [Hz]

O sistema de potência pode ser representado através da seguinte função de transferência:

$$\frac{\Delta F}{\Delta P_g - \Delta P_c - \Delta T} = \frac{1}{D + s2H} = \frac{\frac{1}{D}}{1 + s \frac{2H}{D}}$$

onde:

$\Delta F$  = variação da freqüência [Hz]

$\Delta P_g$  = variação na potência ativa gerada [MW]

$\Delta P_c$  = variação na potência ativa consumida [MW]

$\Delta T$  = variação na potência ativa de intercâmbio entre áreas [MW]

H = constante de tempo de inércia do sistema [s] ou [MJ/MVA]

D = coeficiente de amortecimento da carga com a freqüência [MW/Hz]

Considerando que não haja variação na potência ativa gerada e na potência ativa de intercâmbio (sistema isolado), e definindo  $T = 2H/D$ , como sendo a constante de tempo do sistema de potência [s], pode-se escrever a seguinte função de transferência:

$$FT_{sp} = \frac{\Delta F}{\Delta P_c} = -\frac{1/D}{1+sT}$$

Deste modo, o sistema de potência pode ser representado através do diagrama de blocos da figura 2.1.

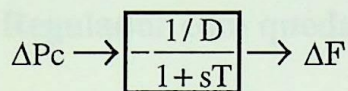


Fig. 2.1: Diagrama de blocos do sistema de potência.

## 2.3 Modelos dos Reguladores de Velocidade

### 2.3.1 Regulador com queda de velocidade

Este regulador, aplicado normalmente em turbinas térmicas, pode ser representado através da seguinte função de transferência:

$$FT_{rvtt} = \frac{\Delta A}{\Delta F} = -\frac{1/R}{1+sT_1}$$

onde:

$\Delta A$  = variação na abertura da válvula de admissão da turbina [pu]

$R$  = estatismo permanente [Hz/MW]

$T_1$  = constante de tempo do regulador de velocidade [s]

O regulador com queda de velocidade pode ser representado através do diagrama de blocos da figura 2.2.

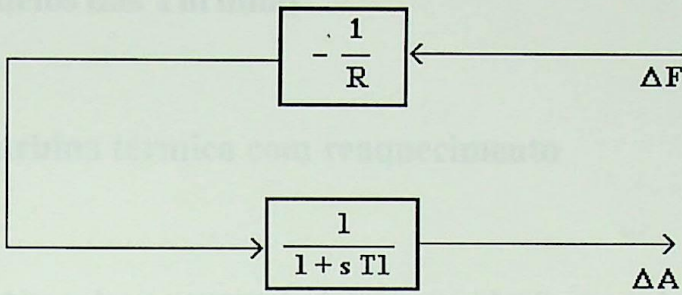


Fig. 2.2: Diagrama de blocos do regulador com queda de velocidade.

### 2.3.2 Regulador com queda de velocidade e estatismo transitório

Este regulador, aplicado normalmente em turbinas hidráulicas, pode ser representado através da seguinte função de transferência:

$$F_{Trvth} = \frac{\Delta A}{\Delta F} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{1}{1+sT1} \cdot \frac{1+sTt}{1+sTt \frac{r}{R}}$$

onde:

$r$  = estatismo transitório [Hz/MW]

$Tt$  = constante de tempo associada a malha de compensação transitória [s]

$1/R$  = energia de regulação das unidades geradoras [MW/Hz]

O regulador com queda de velocidade e estatismo transitório pode ser representado através do diagrama de blocos da figura 2.3.

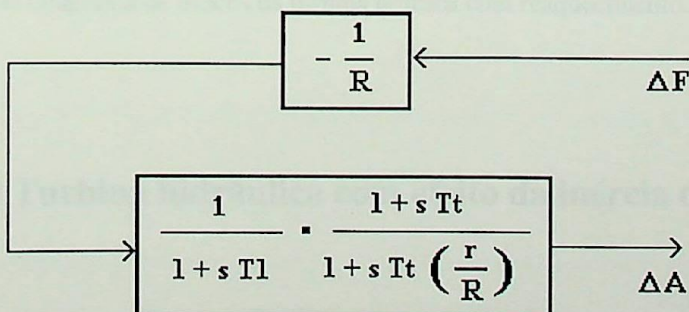


Fig. 2.3: Diagrama de blocos do regulador com queda de velocidade e estatismo transitório.

## 2.4 Modelos das Turbinas

### 2.4.1 Turbina térmica com reaquecimento

Esta turbina pode ser representada, de forma simplificada, através da seguinte função de transferência:

$$FT_{tt} = \frac{\Delta P_g}{\Delta A} = \frac{1}{1 + sT_s} \cdot \frac{1 + sCT_r}{1 + sTr}$$

onde:

$Tr$  = constante de tempo do reaquecedor [s]

$T_s$  = constante de tempo da turbina térmica [s]

$C$  = proporção do torque desenvolvido no elemento de alta pressão

A turbina térmica com reaquecimento pode ser representada através do diagrama de blocos da figura 2.4.

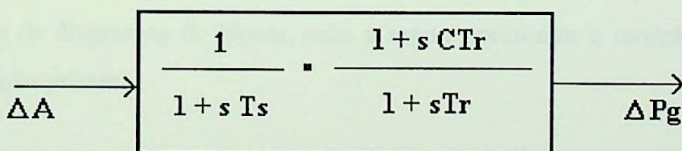


Fig. 2.4: Diagrama de blocos da turbina térmica com reaquecimento.

### 2.4.2 Turbina hidráulica com efeito da inércia da água

O modelo para esta turbina, que considera o efeito da inércia da água na tubulação [7], pode ser representado, de forma simplificada, através da seguinte função de transferência:

$$FT_{th} = \frac{\Delta P_g}{\Delta A} = \frac{1 - sT_w}{1 + s\frac{T_w}{2}}$$

onde:

$T_w$  = constante de tempo de inércia da água na tubulação [s]

A turbina hidráulica com efeito da inércia da água pode ser representada através do diagrama de blocos da figura 2.5.

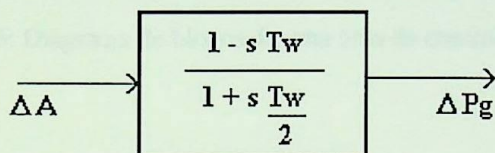


Fig. 2.5: Diagrama de blocos da turbina hidráulica com efeito da inércia da água.

## 2.5 Modelos das Áreas de Controle

Após a representação em separado dos modelos dos componentes do sistema de controle de carga-frequência, através de diagramas de blocos, cabe a seguir apresentar o modelo completo da área de controle, considerando sua regulação primária.

### 2.5.1 Área de controle térmica

A área de controle térmica (isolada) é constituída da seguinte forma:

- sistema de potência, conforme modelo da figura 2.1;
- regulador com queda de velocidade, conforme modelo da figura 2.2;
- turbina térmica com reaquecimento, conforme modelo da figura 2.4.

A área de controle térmica pode ser representada, de forma simplificada, através do diagrama de blocos da figura 2.6.

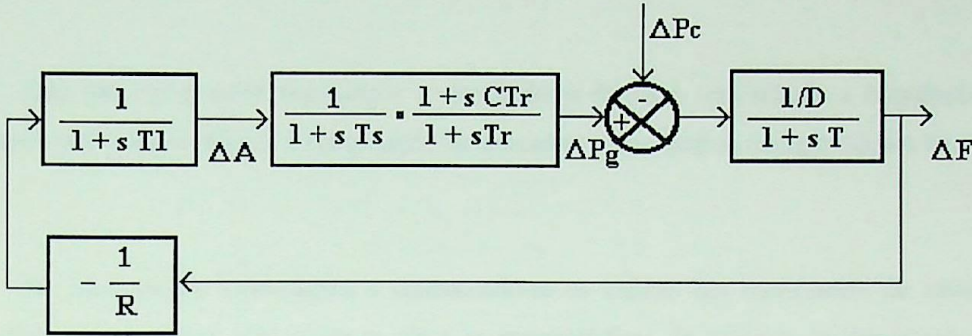


Fig. 2.6: Diagrama de blocos de uma área de controle térmica.

## 2.5.2 Área de controle hidráulica

A área de controle hidráulica (isolada) é constituída da seguinte forma:

- sistema de potência, conforme modelo da figura 2.1;
- regulador com queda de velocidade e estatismo transitório, conforme modelo da figura 2.3;
- turbina hidráulica com efeito da inércia da água, conforme modelo da figura 2.5.

A área de controle hidráulica pode ser representada, de forma simplificada, através do diagrama de blocos da figura 2.7.

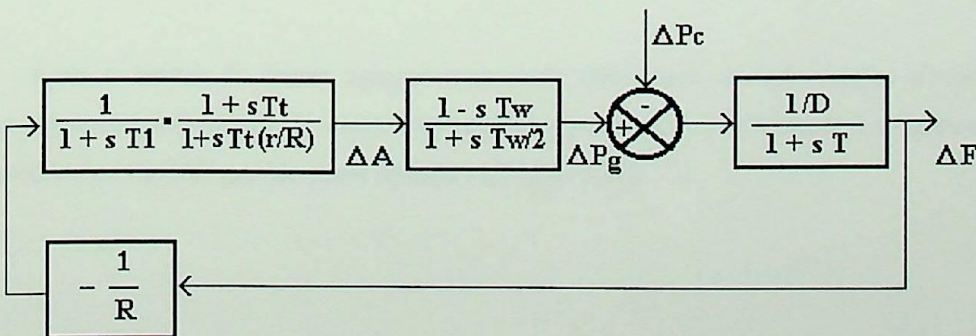


Fig. 2.7: Diagrama de blocos de uma área de controle hidráulica.

## 3. CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DA CARGA

### 3.1 Introdução

Para que seja possível representar a característica da carga com relação a frequência de maneira mais criteriosa, faz-se necessário conhecer a composição de mercado e o uso final da energia elétrica do sistema em análise.

De posse dessas informações e conhecendo-se os valores dos coeficientes de amortecimento dos componentes individuais da carga ( $D_i$ ), pode-se obter as características de resposta da frequência para os diversos segmentos consumidores integrantes da carga do sistema, e conseqüentemente, determinar o coeficiente de amortecimento típico da carga de uma dada empresa e/ou área de controle[21].

### 3.2 Componentes Individuais da Carga

Nos estudos de estabilidade de sistemas é comum representar a carga através de um valor típico para o coeficiente de amortecimento. Este valor é da ordem de 1.0 pu MW/ pu Hz, independente do tipo ou composição da carga de um dado sistema ou área de controle. Porém, na realidade, existem características distintas quanto ao comportamento das cargas face as mudanças na frequência, em virtude de seus componentes individuais apresentarem diferentes valores de coeficiente de amortecimento ( $D_i$ )[6,11,17,18,19,21].

Contudo, uma das maiores dificuldades encontradas em se construir um modelo para representar a carga através de componentes individuais e de suas características particulares com relação a frequência, é a limitação de dados disponíveis.

Com o intuito de tentar agregar uma certa quantidade de informações à respeito do comportamento dos componentes individuais da carga com relação a frequência, a TABELA 3.1 apresenta valores de coeficientes de amortecimento ( $D_i$ ) para diversos deles[6,11,17,18,19,21].

TABELA 3.1: Coeficientes de Amortecimento dos Componentes Individuais da Carga(Di).

Nº	Componentes Individuais da Carga	Di[puMW/puHz]
1	aquecedor	0.0
2	ar condicionado tipo janela	0.6
3	ar condicionado central monofásico	0.9
4	ar condicionado central trifásico	1.0
5	motor de indução(5-200 HP)	2.9
6	motor de indução(>200 HP)	1.9
7	bomba e outros motores	2.9
8	conversor	-0.48
9	eletrodoméstico com motor	0.1
10	forno	-0.5
11	lâmpada incandescente	0.0
12	lâmpada fluorescente	1.0
13	máquina de lavar roupa	2.9
14	máquina de lavar prato	0.0
15	refrigerador e freezer	0.5
16	secadora de roupa	0.0
17	cuba eletrolítica(eletrólise)	-0.3
18	aparelhos eletrônicos	0.0
19	televisor	0.0

### 3.3 Carga Industrial

Para subsidiar a análise do comportamento da carga industrial com relação a frequência, tomou-se como base a referência " **Uso de Energia Elétrica no Setor Industrial de Minas Gerais - 1985**"[8], nos aspectos referentes a divisão da carga industrial nos diversos setores de atividade, bem como foram feitos contatos com algumas empresas e entidades<sup>(1)</sup>, na busca de informações que melhor caracterizam o uso final da energia elétrica nos diversos setores considerados.

O consumo de energia elétrica nos setores componentes da carga industrial foi dividido segundo os seguintes usos finais: iluminação, motores elétricos, geração de calor, eletroquímica e outros fins[8].

Cada aplicação citada anteriormente, está por sua vez, relacionada a um ou mais equipamentos ou componentes individuais da carga, isto é:

- iluminação: lâmpada incandescente, lâmpada fluorescente.
- motores elétricos: motor de indução, motor síncrono.
- geração de calor: forno, caldeira, aquecedor, estufa,etc.
- eletroquímica: cuba eletrolítica (eletrólise).
- outros fins: aparelhos eletrônicos, computador, equipamentos de telecomunicação.

A seguir serão apresentados os diversos setores de atividade pertencentes a carga industrial:

<sup>(1)</sup> Dentre outras, pode-se citar CEMIG, CESP, ELETROBRÁS, PROCEL, ABINBE, SIEMENS, BFEI, UNICAMP.

### 3.3.1 Setor Cimento

O setor cimento apresenta como principal responsável pelo consumo de eletricidade o acionamento de moinhos de carvão, de matérias primas de cru e de clínquer.

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	2.2	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	97.6	motor de indução (>200 HP)
Geração de Calor	0.1	forno
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.1	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{cim}) = \frac{\%Ilu \times Di_{12} + \%Mot \times Di_6 + \%Gec \times Di_{10} + \%Elq \times Di_{17} + \%Out \times Di_{18}}{100}$$

$$D(\text{cim}) = \frac{2.2 \times 1.0 + 97.6 \times 1.9 + 0.1 \times -0.5 + 0.0 \times -0.3 + 0.1 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{cim}) = 1.88 [\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.1 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor cimento, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

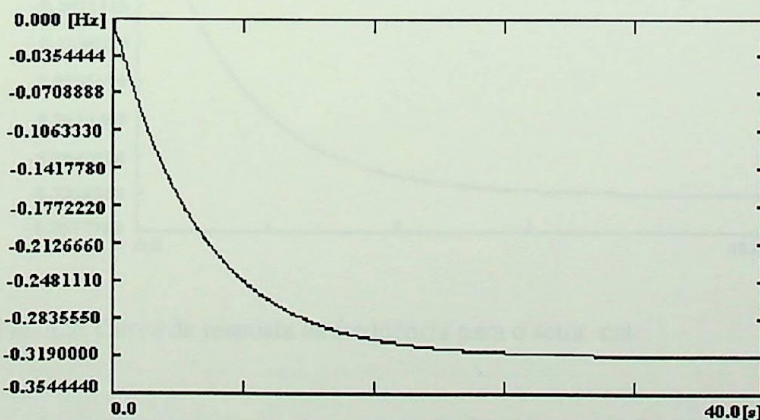


Fig. 3.1: Curva de resposta da frequência para o setor cimento.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.319 Hz e um tempo de estabilização em torno de 31.0 s.

### 3.3.2 Setor Cal

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	7.3	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	91.8	motor de indução (>200 HP)
Geração de Calor	0.4	forno
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.5	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{cal}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di6 + \%Gec \times Di10 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{cal}) = \frac{7.3 \times 1.0 + 91.8 \times 1.9 + 0.4 \times -0.5 + 0.0 \times -0.3 + 0.5 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{cal}) = 1.81[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.2 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor cal, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

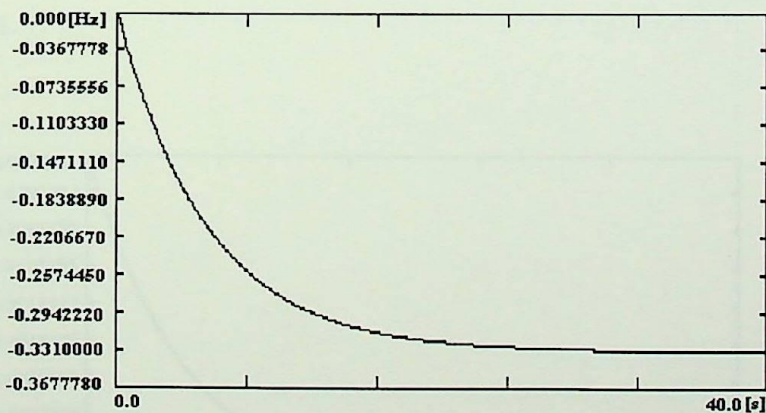


Fig. 3.2: Curva de resposta da frequência para o setor cal.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.331 Hz e um tempo de estabilização em torno de 33.0 s.

### 3.3.3 Setor Fundição

O setor fundição apresenta como característica a grande utilização dos elementos eletrotérmicos, que refletem a elevada participação da geração de calor como uso final de energia elétrica.

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	5.6	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	36.7	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	57.1	forno
Eletroquímica	0.2	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.4	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{fun}) = \frac{\% \text{Ilu} \times \text{Di}12 + \% \text{Mot} \times \text{Di}5 + \% \text{Gec} \times \text{Di}10 + \% \text{Elq} \times \text{Di}17 + \% \text{Out} \times \text{Di}18}{100}$$

$$D(\text{fun}) = \frac{5.6 \times 1.0 + 36.7 \times 2.9 + 57.1 \times -0.5 + 0.2 \times -0.3 + 0.4 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{fun}) = 0.83[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.3 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor fundição, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

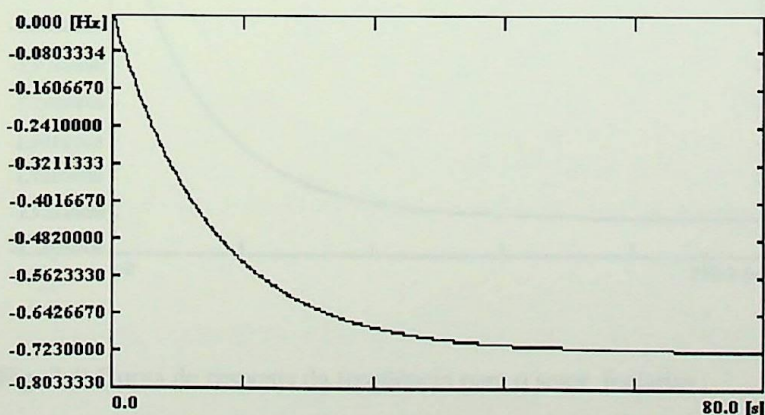


Fig. 3.3: Curva de resposta da frequência para o setor fundição.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.723 Hz e um tempo de estabilização em torno de 73.0 s.

### 3.3.4 Setor Forjarias

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	5.2	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	30.0	motor de indução (>200 HP)
Geração de Calor	63.0	forno
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	1.8	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{for}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di6 + \%Gec \times Di10 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{for}) = \frac{5.2 \times 1.0 + 30.0 \times 1.9 + 63.0 \times -0.5 + 0.0 \times -0.3 + 1.8 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{for}) = 0.31[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.4 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor forjarias, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

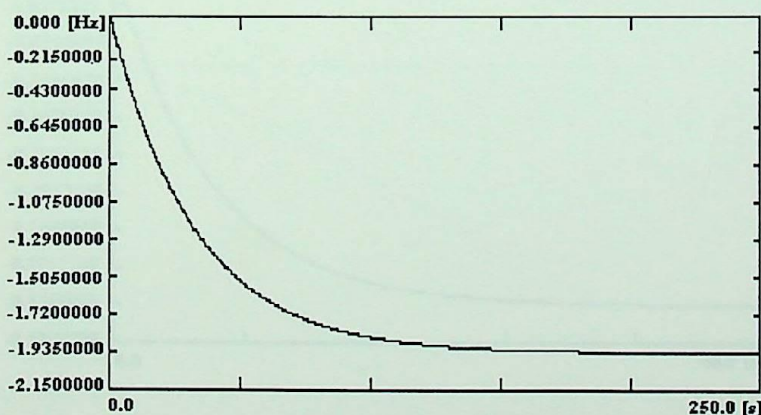


Fig. 3.4: Curva de resposta da frequência para o setor forjarias.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -1.935 Hz e um tempo de estabilização em torno de 200.0 s.

### 3.3.5 Setor Mineração

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	1.6	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	94.3	motor de indução (>200 HP)
Geração de Calor	4.0	forno
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.1	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\min) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di6 + \%Gec \times Di10 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\min) = \frac{1.6 \times 1.0 + 94.3 \times 1.9 + 4.0 \times -0.5 + 0.0 \times -0.3 + 0.1 \times 0.0}{100}$$

$$D(\min) = 1.79[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.5 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor mineração, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

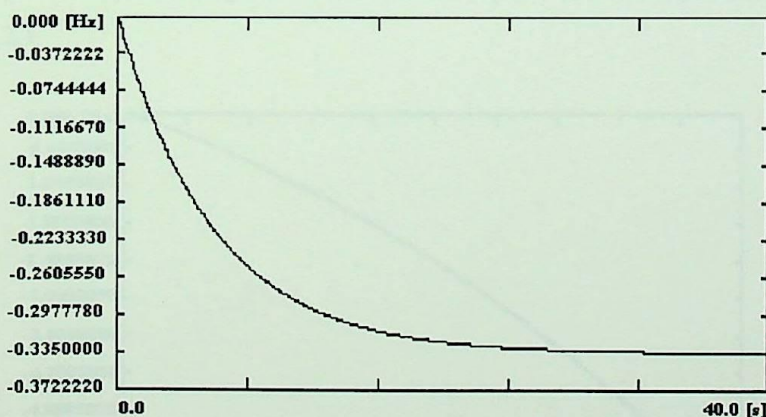


Fig. 3.5: Curva de resposta da frequência para o setor mineração.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.335 Hz e um tempo de estabilização em torno de 33.0 s.

### 3.3.6 Setor Alumínio

O setor alumínio (assim como as indústrias do setor zinco) apresenta a eletroquímica como a finalidade que absorve a maior quantidade de energia elétrica, seguida da geração de calor.

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	1.2	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	4.8	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	32.7	forno
Eletroquímica	55.6	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	5.7	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{alu}) = \frac{\%Ilu \times Di_{12} + \%Mot \times Di_5 + \%Gec \times Di_{10} + \%Elq \times Di_{17} + \%Out \times Di_{18}}{100}$$

$$D(\text{alu}) = \frac{1.2 \times 1.0 + 4.8 \times 2.9 + 32.7 \times -0.5 + 55.6 \times -0.3 + 5.7 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{alu}) = -0.18[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.6 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor alumínio, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

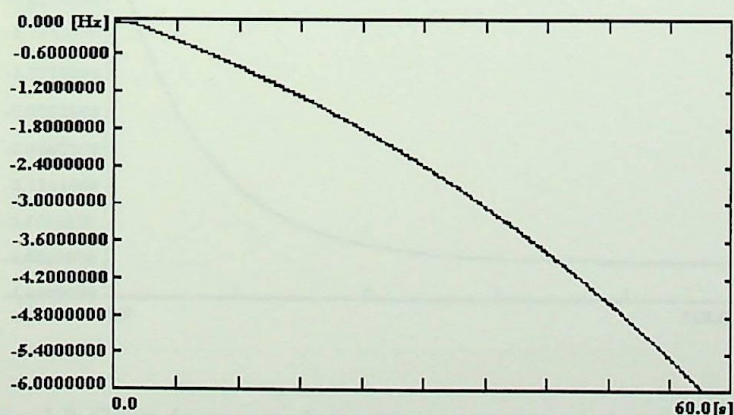


Fig. 3.6: Curva de resposta da frequência para o setor alumínio.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se uma redução exponencial de frequência, caracterizando-se desta forma um sistema instável.

### 3.3.7 Setor Zinco

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	0.6	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	15.8	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	31.3	forno
Eletroquímica	52.3	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.0	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{zin}) = \frac{\%Ilu \times Di_{12} + \%Mot \times Di_5 + \%Gec \times Di_{10} + \%Elq \times Di_{17} + \%Out \times Di_{18}}{100}$$

$$D(\text{zin}) = \frac{0,6 \times 1,0 + 15,8 \times 2,9 + 31,3 \times -0,5 + 52,3 \times -0,3 + 0,0 \times 0,0}{100}$$

$$D(\text{zin}) = 0,15[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.7 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor zinco, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

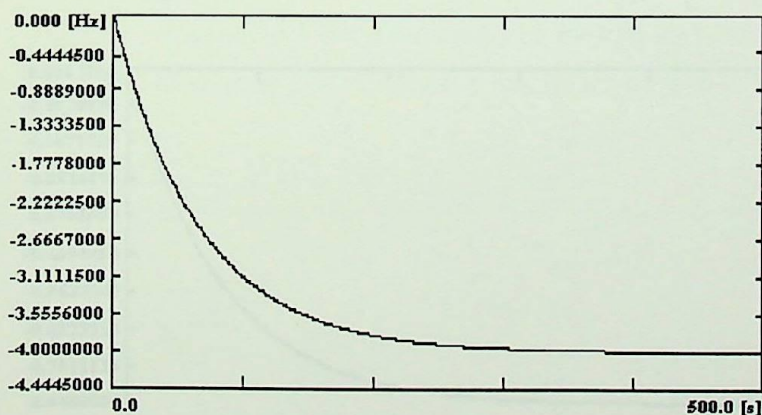


Fig. 3.7: Curva de resposta da frequência para o setor zinco.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -4.000 Hz e um tempo de estabilização em torno de 450.0 s.

### 3.3.8 Setor Outros Não-Ferrosos

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	4.3	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	31.8	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	35.2	forno
Eletroquímica	26.1	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	2.6	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{onf}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di5 + \%Gec \times Di10 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{onf}) = \frac{4.3 \times 1.0 + 31.8 \times 2.9 + 35.2 \times -0.5 + 26.1 \times -0.3 + 2.6 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{onf}) = 0.71[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.8 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor outros não-ferrosos, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

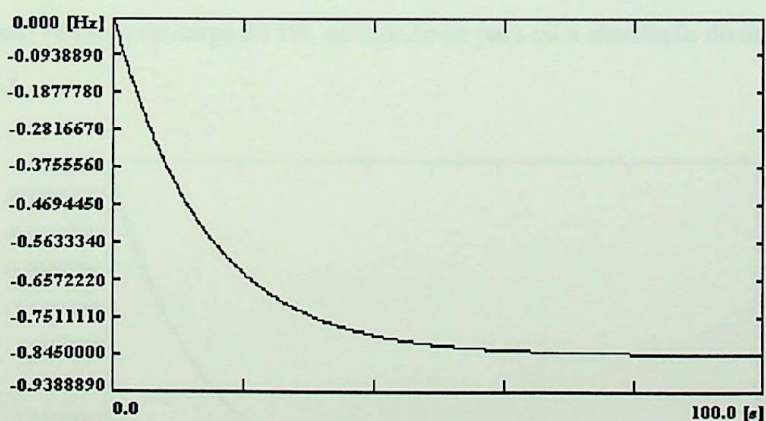


Fig. 3.8: Curva de resposta da frequência para o setor outros não-ferrosos.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.845 Hz e um tempo de estabilização em torno de 85.0 s.

### 3.3.9 Setor Química

O setor química considerado é constituído por indústrias diversificadas, sendo as principais pertencentes aos segmentos de gases industriais, incluindo ainda, indústrias produtoras de cêra, defensivos, lubrificantes, titânio e outras, excetuando-se o setor fertilizantes, que será analisado em separado.

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	0.8	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	12.3	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	29.5	aquecedor
Eletroquímica	55.9	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	1.5	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{qui}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di5 + \%Gec \times Di1 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{qui}) = \frac{0.8 \times 1.0 + 12.3 \times 2.9 + 29.5 \times 0.0 + 55.9 \times -0.3 + 1.5 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{qui}) = 0.20[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.9 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor química, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

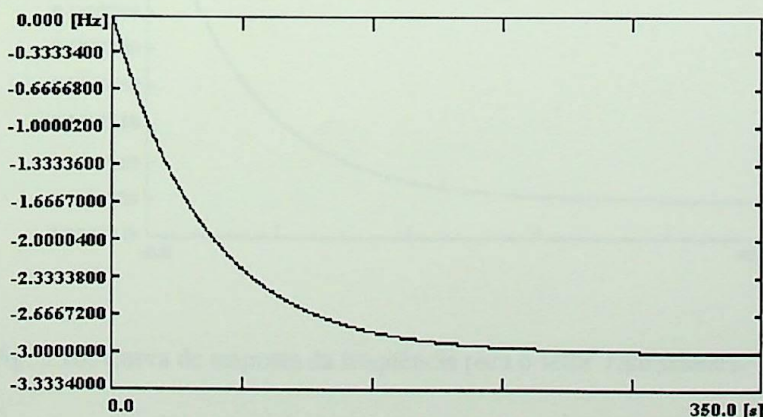


Fig. 3.9: Curva de resposta da frequência para o setor química.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -3.000 Hz e um tempo de estabilização em torno de 350.0 s.

### 3.3.10 Setor Fertilizantes

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	1.5	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	66.5	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	31.9	forno
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.1	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{fer}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di5 + \%Gec \times Di10 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{fer}) = \frac{1.5 \times 1.0 + 66.5 \times 2.9 + 31.9 \times -0.5 + 0.0 \times -0.3 + 0.1 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{fer}) = 1.78[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.10 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor fertilizantes, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

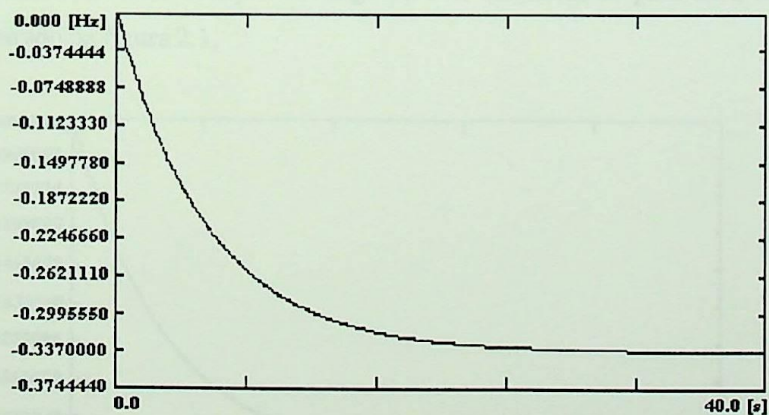


Fig. 3.10: Curva de resposta da frequência para o setor fertilizantes.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.337 Hz e um tempo de estabilização em torno de 33.0 s.

### 3.3.11 Setor Alimentos e Bebidas

O setor alimentos e bebidas é composto por indústrias diversificadas, agregando os seguintes sub-setores: avícolas, cervejas, conservas, massas, óleos vegetais, ração animal, refrigerantes, torrefação de café, abatedouros e frigoríficos.

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	6.1	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	60.6	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	30.9	aquecedor
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	2.4	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{aeb}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di5 + \%Gec \times Di1 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{aeb}) = \frac{6.1 \times 1.0 + 60.6 \times 2.9 + 30.9 \times 0.0 + 0.0 \times -0.3 + 2.4 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{aeb}) = 1.82[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.11 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor alimentos e bebidas, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

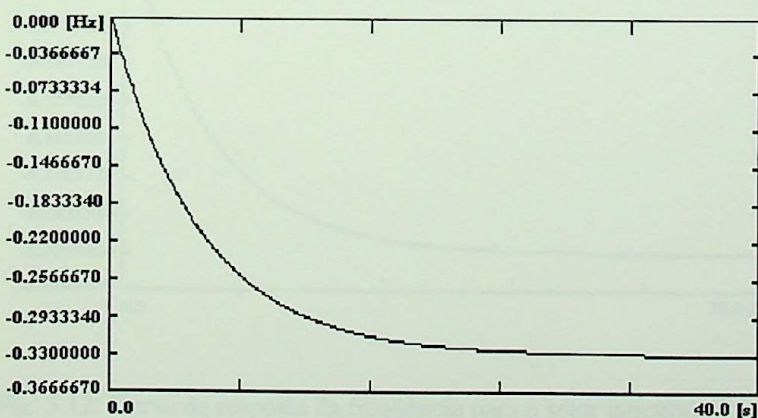


Fig. 3.11: Curva de resposta da frequência para o setor alimentos e bebidas.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.330 Hz e um tempo de estabilização em torno de 33.0 s.

### 3.3.12 Setor Laticínios

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	5.9	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	88.2	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	5.6	aquecedor
Eletroquímica	0.1	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.2	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{lat}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di5 + \%Gec \times Di1 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{lat}) = \frac{5.9 \times 1.0 + 88.2 \times 2.9 + 5.6 \times 0.0 + 0.1 \times -0.3 + 0.2 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{lat}) = 2.62[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.12 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor laticínios, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

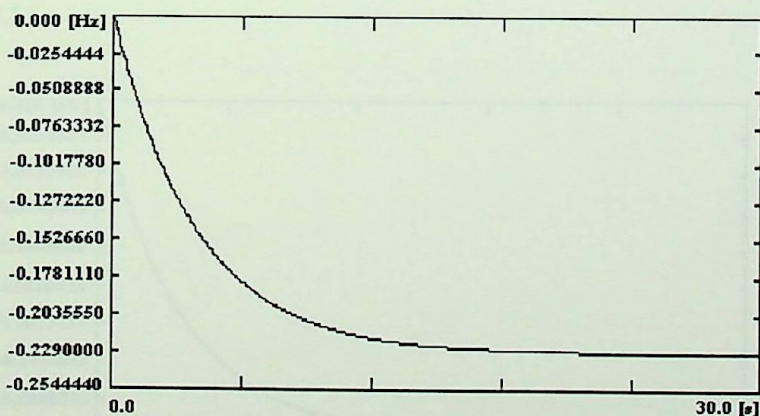


Fig. 3.12: Curva de resposta da frequência para o setor laticínios.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.229 Hz e um tempo de estabilização em torno de 23.0 s.

### 3.3.13 Setor Têxtil

As indústrias de fiação, tecelagem e acabamento, pertencentes ao setor têxtil, apresentam o acionamento de motores como a atividade de maior participação no consumo de eletricidade.

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	9.3	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	88.7	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	1.2	aquecedor
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.8	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{tex}) = \frac{\%Ilu \times Di_{12} + \%Mot \times Di_5 + \%Gec \times Di_1 + \%Elq \times Di_{17} + \%Out \times Di_{18}}{100}$$

$$D(\text{tex}) = \frac{9.3 \times 1.0 + 88.7 \times 2.9 + 1.2 \times 0.0 + 0.0 \times -0.3 + 0.8 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{tex}) = 2.67[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.13 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor têxtil, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

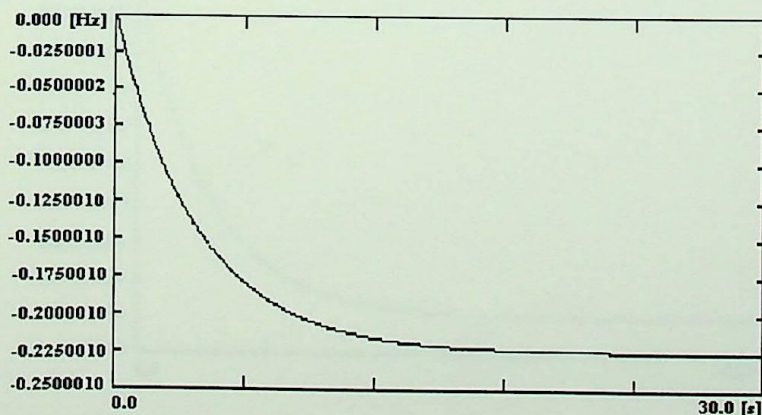


Fig. 3.13: Curva de resposta da frequência para o setor de indústria têxtil.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.225 Hz e um tempo de estabilização em torno de 23.0 s.

### 3.3.14 Setor Papel e Celulose

O setor papel e celulose agrega os sub-setores de celulose, papel e produtos de papel.

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	1.9	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	83.4	motor de indução (>200 HP)
Geração de Calor	0.1	forno
Eletroquímica	14.5	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.1	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{pec}) = \frac{\% \text{llu} \times \text{Di12} + \% \text{Mot} \times \text{Di6} + \% \text{Gec} \times \text{Di10} + \% \text{Elq} \times \text{Di17} + \% \text{Out} \times \text{Di18}}{100}$$

$$D(\text{pec}) = \frac{1.9 \times 1.0 + 83.4 \times 1.9 + 0.1 \times -0.5 + 14.5 \times -0.3 + 0.1 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{pec}) = 1.56[\text{puMw} / \text{puHz}]$$

A figura 3.14 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor papel e celulose, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

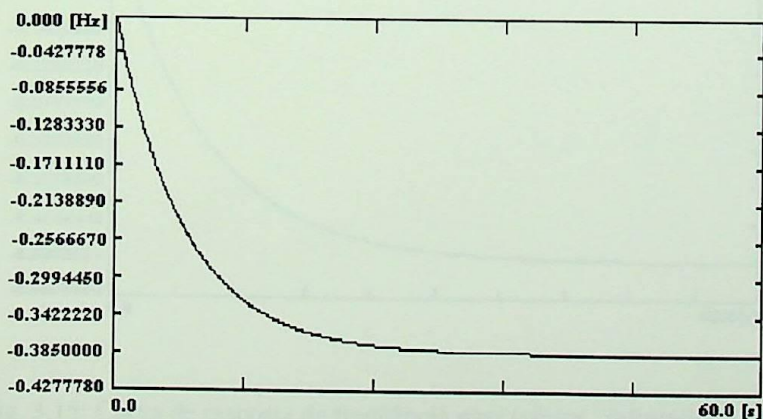


Fig. 3.14: Curva de resposta da frequência para o setor papel e celulose.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.385 Hz e um tempo de estabilização em torno de 39.0 s.

### 3.3.15 Setor Refratários

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	6.9	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	47.1	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	46.0	forno
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.0	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{ref}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di5 + \%Gec \times Di10 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{ref}) = \frac{6.9 \times 1.0 + 47.1 \times 2.9 + 46.0 \times -0.5 + 0.0 \times -0.3 + 0.0 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{ref}) = 1.20[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.15 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor refratários, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

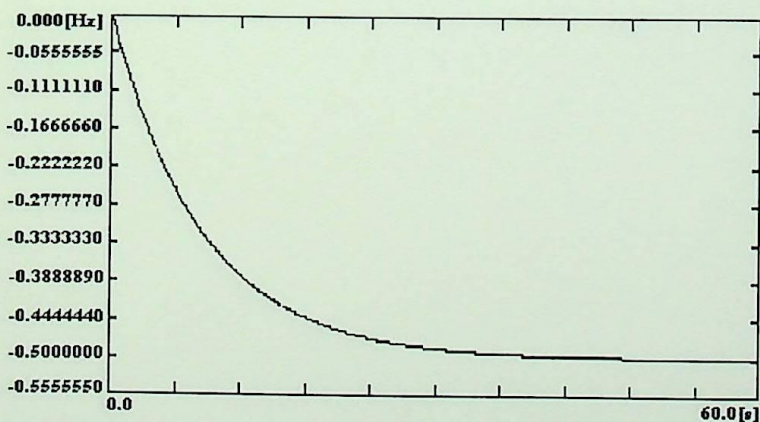


Fig. 3.15: Curva de resposta da frequência para o setor refratários.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.500 Hz e um tempo de estabilização em torno de 46.0 s.

### 3.3.16 Setor Cerâmica Branca

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	6.4	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	49.1	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	44.5	forno
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.0	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{ceb}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di5 + \%Gec \times Di10 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{ceb}) = \frac{6.4 \times 1.0 + 49.1 \times 2.9 + 44.5 \times -0.5 + 0.0 \times -0.3 + 0.0 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{ceb}) = 1.26[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.16 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor cerâmica branca, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

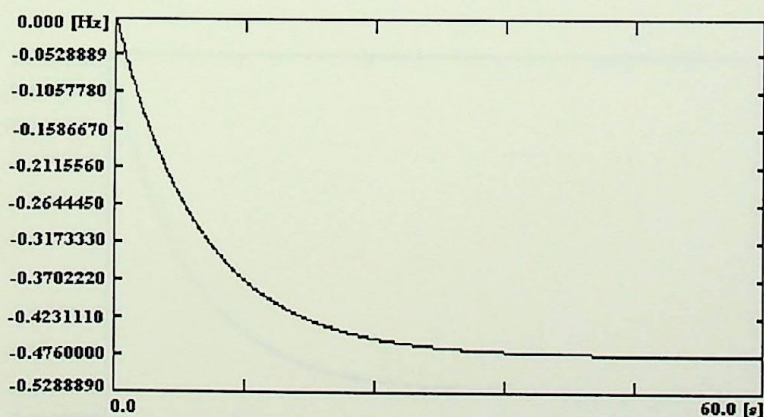


Fig. 3.16: Curva de resposta da frequência para o setor cerâmica branca.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.476 Hz e um tempo de estabilização em torno de 46.0 s.

### 3.3.17 Setor Cerâmica Vermelha

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	4.9	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	94.5	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	0.4	forno
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.2	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{cev}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di5 + \%Gec \times Di10 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{cev}) = \frac{4.9 \times 1.0 + 94.5 \times 2.9 + 0.4 \times -0.5 + 0.0 \times -0.3 + 0.2 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{cev}) = 2.79[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.17 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor cerâmica vermelha, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

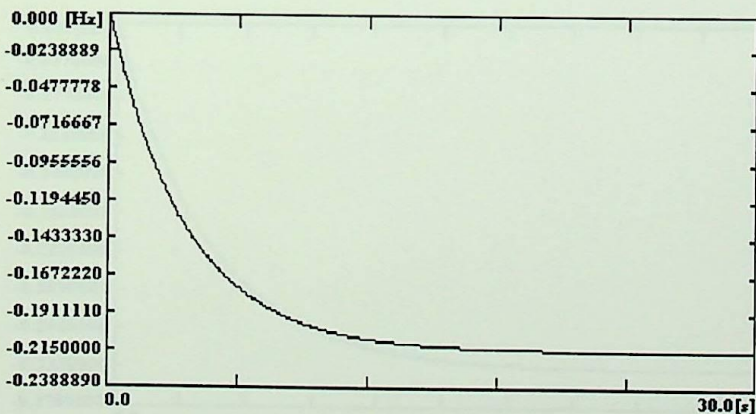


Fig. 3.17: Curva de resposta da frequência para o setor cerâmica vermelha.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.215 Hz e um tempo de estabilização em torno de 21.0 s.

### 3.3.18 Setor Açúcar e Álcool

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	9.7	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	89.7	motor de indução (>200 HP)
Geração de Calor	0.0	aquecedor
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	0.6	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{aea}) = \frac{\% \text{Ilu} \times \text{Di}12 + \% \text{Mot} \times \text{Di}6 + \% \text{Gec} \times \text{Di}1 + \% \text{Elq} \times \text{Di}17 + \% \text{Out} \times \text{Di}18}{100}$$

$$D(\text{aea}) = \frac{9.7 \times 1.0 + 89.7 \times 1.9 + 0.0 \times 0.0 + 0.0 \times -0.3 + 0.6 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{aea}) = 1.80 [\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.18 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor açúcar e álcool, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

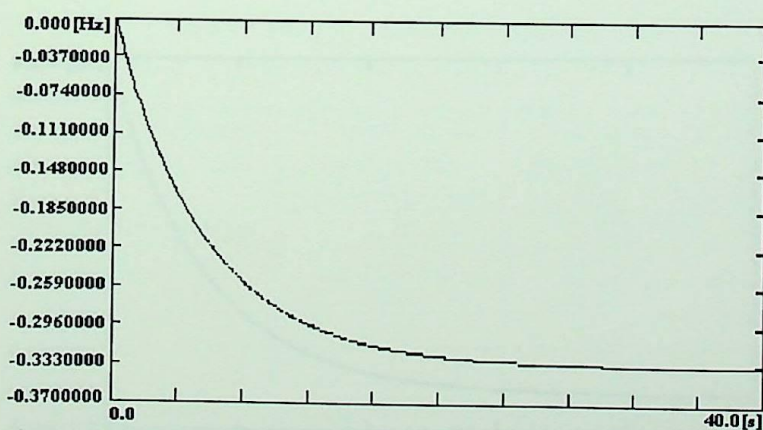


Fig. 3.18: Curva de resposta da frequência para o setor açúcar e álcool.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.333 Hz e um tempo de estabilização em torno de 33.0 s.

### 3.3.19 Setor Outros

Este setor abrange algumas indústrias ainda não relacionadas, tais como, curtumes, farmacêuticas, mecânicas, bens de capital, entre outras.

Considerou-se para este setor a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	12.7	lâmpada fluorescente
Motores Elétricos	75.8	motor de indução (5-200 HP)
Geração de Calor	6.9	forno
Eletroquímica	0.0	cuba eletrolítica (eletrólise)
Outros Fins	4.6	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este setor é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{out}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Mot \times Di5 + \%Gec \times Di10 + \%Elq \times Di17 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{out}) = \frac{12.7 \times 1.0 + 75.8 \times 2.9 + 6.9 \times -0.5 + 0.0 \times -0.3 + 4.6 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{out}) = 2.29[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.19 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o setor outros, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

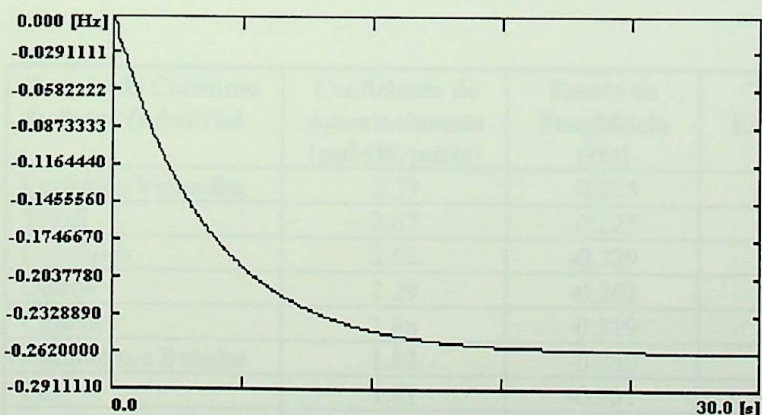


Fig. 3.19: Curva de resposta da frequência para o setor outros.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este setor, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.262 Hz e um tempo de estabilização em torno de 25.0 s.

O sumário da distribuição do uso final da energia elétrica entre os setores integrantes da carga industrial é mostrado na TABELA 3.2[8].

TABELA 3.2: Distribuição do Uso Final da Eletricidade nos Setores Industriais.

Setor de Consumo Industrial	Uso Final (%) Iluminação	Uso Final (%) Motores Elétricos	Uso Final (%) Geração de Calor	Uso Final (%) Eletriquímica	Uso Final (%) Outros Fins
Cimento	2.2	97.6	0.1	0.0	0.1
Cal	7.3	91.8	0.4	0.0	0.5
Fundição	5.6	36.7	57.1	0.2	0.4
Forjarias	5.2	30.0	63.0	0.0	1.8
Mineração	1.6	94.3	4.0	0.0	0.1
Alumínio	1.2	4.8	32.7	55.6	5.7
Zinco	0.6	15.8	31.3	52.3	0.0
Outros Não-Ferrosos	4.3	31.8	35.2	26.1	2.6
Química	0.8	12.3	29.5	55.9	1.5
Fertilizantes	1.5	66.5	31.9	0.0	0.1
Alimentos e Bebidas	6.1	60.6	30.9	0.0	2.4
Laticínios	5.9	88.2	5.6	0.1	0.2
Têxtil	9.3	88.7	1.2	0.0	0.8
Papel e Celulose	1.9	83.4	0.1	14.5	0.1
Refratários	6.9	47.1	46.0	0.0	0.0
Cerâmica Branca	6.4	49.1	44.5	0.0	0.0
Cerâmica Vermelha	4.9	94.5	0.4	0.0	0.2
Açúcar e Álcool	9.7	89.7	0.0	0.0	0.6
Outros	12.7	75.8	6.9	0.0	4.6

Finalizando o sub-ítem 3.3, a TABELA 3.3 apresenta um extrato das informações obtidas anteriormente via procedimentos de cálculo e através dos resultados das simulações realizadas, ou seja, valores dos coeficientes de amortecimento, dos desvios de frequência em regime permanente e os tempos de estabilização associados, para os grupos de consumo do setor industrial.

TABELA 3.3: Resumo Final de Valores do Setor Industrial.

Grupos de Consumo do Setor Industrial	Coefficiente de Amortecimento [puMW/puHz]	Desvio de Frequência [Hz]	Tempo de Estabilização [s]
Cerâmica Vermelha	2.79	-0.215	21.0
Têxtil	2.67	-0.225	23.0
Laticínios	2.62	-0.229	23.0
Outros	2.29	-0.262	25.0
Cimento	1.88	-0.319	31.0
Alimentos e Bebidas	1.82	-0.330	33.0
Cal	1.81	-0.331	33.0
Açúcar e Álcool	1.80	-0.333	33.0
Mineração	1.79	-0.335	33.0
Fertilizantes	1.78	-0.337	33.0
Papel e Celulose	1.56	-0.385	39.0
Cerâmica Branca	1.26	-0.476	46.0
Refratários	1.20	-0.500	46.0
Fundição	0.83	-0.723	73.0
Outros Não-Ferrosos	0.71	-0.845	85.0
Forjarias	0.31	-1.935	200.0
Química	0.20	-3.000	350.0
Zinco	0.15	-4.000	450.0

Ressalta-se que o setor Alumínio, que não foi relacionado na TABELA 3.3, apresenta valor de coeficiente de amortecimento negativo ( $D = -0.18 \text{ puMW/puHz}$ ), cuja característica provoca uma redução exponencial de frequência, levando o sistema a instabilidade.

### 3.4 Carga Residencial

Para subsidiar a análise do comportamento da carga residencial com relação a frequência, tomou-se como base a referência " **Conservação de Energia, Serviços e Consumidores - Conservação e Utilização de Energia** "[9], nos aspectos referentes a divisão da carga residencial nas diversas classes de renda familiar, bem como, a distribuição do uso final da energia elétrica em tais classes.

A seguir, apresenta-se a divisão do consumo de energia elétrica no setor residencial, utilizando-se a distribuição por classes de renda familiar, conforme enfoque da referência anteriormente mencionada.

TABELA 3.4: Classes de Consumo Residencial por Faixas Salariais.

Classes	Faixas de Salário Mínimo
Classe I	menos de 2.0
Classe II	de 2.0 a 3.5
Classe III	de 3.5 a 5.0
Classe IV	de 5.0 a 7.0
Classe V	mais de 7.0

Salienta-se ainda que a cada aplicação ou uso final de energia, está associado um ou mais equipamentos, ou seja:

- lazer: televisão, rádio, etc.
- conservação de alimentos: geladeira, freezer.
- serviços domésticos: ferro de passar roupa, aspirador, etc.
- condicionamento ambiental: ar condicionado, ventilador.
- aquecimento de água: chuveiro elétrico, boiler.
- iluminação: lâmpada incandescente, lâmpada fluorescente.

Cabe ressaltar ainda que, em virtude da falta de referência, admitiu-se, em função da semelhança de princípio de funcionamento, valores de coeficiente de amortecimento de  $0.0 \text{ puMW/puHz}$  para os equipamentos chuveiro elétrico e ferro de passar roupa, associando-os ao componente individual da carga aquecedor e  $0.1 \text{ puMW/puHz}$  para o equipamento ventilador, associando-o ao componente individual da carga eletrodoméstico com motor.

Considerou-se também para as classes IV e V, o uso compartilhado dos equipamentos lâmpada incandescente e lâmpada fluorescente, referindo-se ao uso final iluminação.

A seguir serão apresentadas as diversas classes de consumo pertencentes a carga residencial:

### 3.4.1 Classe I

Considerou-se para esta classe a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Lazer	16.4	televisor
Conservação de Alimentos	25.4	refrigerador
Serviços Domésticos	18.3	ferro de passar roupa
Condicionamento Ambiental	0.6	ventilador
Aquecimento de Água	18.3	chuveiro elétrico
Iluminação	21.0	lâmpada incandescente

O valor do coeficiente de amortecimento para esta classe é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{cl1}) = \frac{\%Laz \times Di19 + \%Cal \times Di15 + \%Sed \times Di1 + \%Coa \times Di9 + \%Aqa \times Di1 + \%Ilu \times Di11}{100}$$

$$D(\text{cl1}) = \frac{16.4 \times 0.0 + 25.4 \times 0.5 + 18.3 \times 0.0 + 0.6 \times 0.1 + 18.3 \times 0.0 + 21.0 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{cl1}) = 0.13[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.20 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para a classe I, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

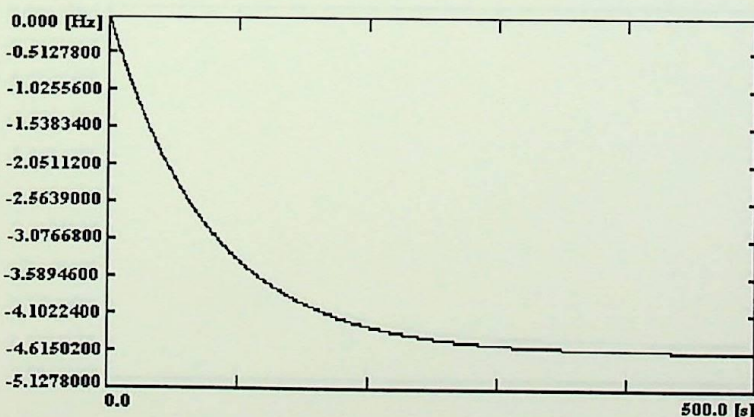


Fig. 3.20: Curva de resposta da frequência para a classe I.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para esta classe, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -4.615 Hz e um tempo de estabilização em torno de 500.0 s.

### 3.4.2 Classe II

Considerou-se para esta classe a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Lazer	10.4	televisor
Conservação de Alimentos	34.2	refrigerador
Serviços Domésticos	12.3	ferro de passar roupa
Condicionamento Ambiental	0.9	ventilador
Aquecimento de Água	24.6	chuveiro elétrico
Iluminação	17.6	lâmpada incandescente

O valor do coeficiente de amortecimento para esta classe é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{cl}2) = \frac{\%Laz \times Di19 + \%Cal \times Di15 + \%Sed \times Di1 + \%Coa \times Di9 + \%Aqa \times Di1 + \%Ilu \times Di11}{100}$$

$$D(\text{cl}2) = \frac{10.4 \times 0.0 + 34.2 \times 0.5 + 12.3 \times 0.0 + 0.9 \times 0.1 + 24.6 \times 0.0 + 17.6 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{cl}2) = 0.17[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.21 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para a classe II, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

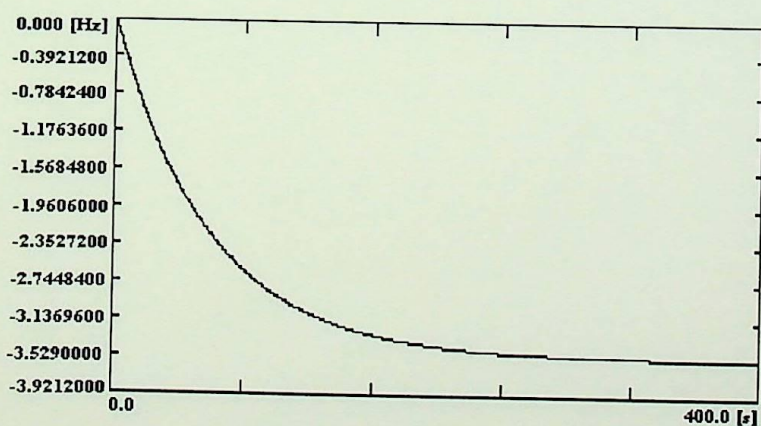


Fig. 3.21: Curva de resposta da frequência para a classe II.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para esta classe, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -3.529 Hz e um tempo de estabilização em torno de 400.0 s.

### 3.4.3 Classe III

Considerou-se para esta classe a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Lazer	8.8	televisor
Conservação de Alimentos	36.2	refrigerador
Serviços Domésticos	8.9	eletrodoméstico com motor
Condicionamento Ambiental	1.4	ventilador
Aquecimento de Água	27.6	chuveiro elétrico
Iluminação	17.1	lâmpada incandescente

O valor do coeficiente de amortecimento para esta classe é calculado da seguinte forma:

$$D(c13) = \frac{\%Laz \times Di19 + \%Cal \times Di15 + \%Sed \times Di9 + \%Coa \times Di9 + \%Aqa \times Di1 + \%Ilu \times Di11}{100}$$

$$D(c13) = \frac{8.8 \times 0.0 + 36.2 \times 0.5 + 8.9 \times 0.1 + 1.4 \times 0.1 + 27.6 \times 0.0 + 17.1 \times 0.0}{100}$$

$$D(c13) = 0.19[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.22 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para a classe III, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

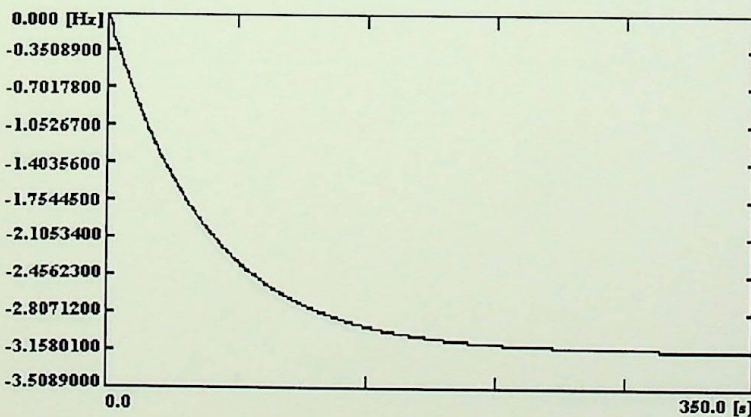


Fig. 3.22: Curva de resposta da frequência para a classe III.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para esta classe, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -3.158 Hz e um tempo de estabilização em torno de 350.0 s.

### 3.4.4 Classe IV

Considerou-se para esta classe a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Lazer	7.7	televisor
Conservação de Alimentos	33.3	refrigerador
Serviços Domésticos	7.2	eletrodoméstico com motor
Condicionamento Ambiental	1.5	ventilador
Aquecimento de Água	27.8	chuveiro elétrico
Iluminação	22.5	lâmpada incandescente e fluorescente

O valor do coeficiente de amortecimento para esta classe é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{cl4}) = \frac{\%Laz \times Di19 + \%Cal \times Di15 + \%Sed \times Di9 + \%Coa \times Di9 + \%Aqa \times Di1 + \%Ilu \times Di11 + \%Ilu \times Di12}{100}$$

$$D(\text{cl4}) = \frac{7.7 \times 0.0 + 33.3 \times 0.5 + 7.2 \times 0.1 + 1.5 \times 0.1 + 27.8 \times 0.0 + 11.25 \times 0.0 + 11.25 \times 1.0}{100}$$

$$D(\text{cl4}) = 0.29[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.23 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para a classe IV, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

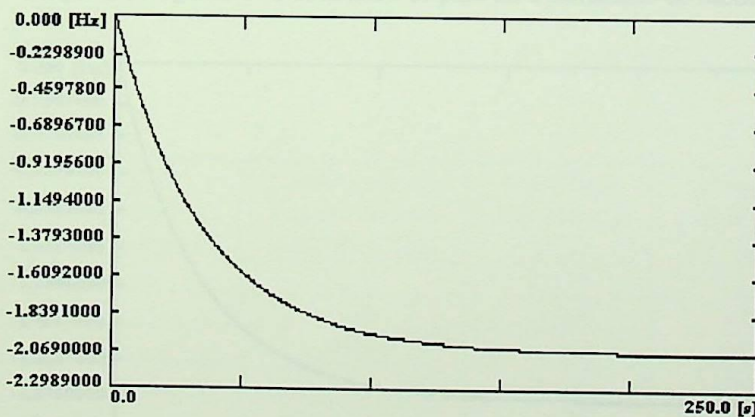


Fig. 3.23: Curva de resposta da frequência para a classe IV.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para esta classe, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -2.069 Hz e um tempo de estabilização em torno de 250.0 s.

### 3.4.5 Classe V

Considerou-se para esta classe a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Lazer	6.2	televisor
Conservação de Alimentos	29.9	refrigerador
Serviços Domésticos	6.5	eletrodoméstico com motor
Condicionamento Ambiental	2.9	ar condicionado tipo janela
Aquecimento de Água	25.9	chuveiro elétrico
Iluminação	28.6	lâmpada incandescente e fluorescente

O valor do coeficiente de amortecimento para esta classe é calculado da seguinte forma:

$$D(c15) = \frac{\%Laz \times Di19 + \%Cal \times Di15 + \%Sed \times Di9 + \%Coa \times Di2 + \%Aqa \times Di1 + \%Ilu \times Di11 + \%Ilu \times Di12}{100}$$

$$D(c15) = \frac{6.2 \times 0.0 + 29.9 \times 0.5 + 6.5 \times 0.1 + 2.9 \times 0.6 + 25.9 \times 0.0 + 14.3 \times 0.0 + 14.3 \times 1.0}{100}$$

$$D(c15) = 0.32[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.24 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para a classe V, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

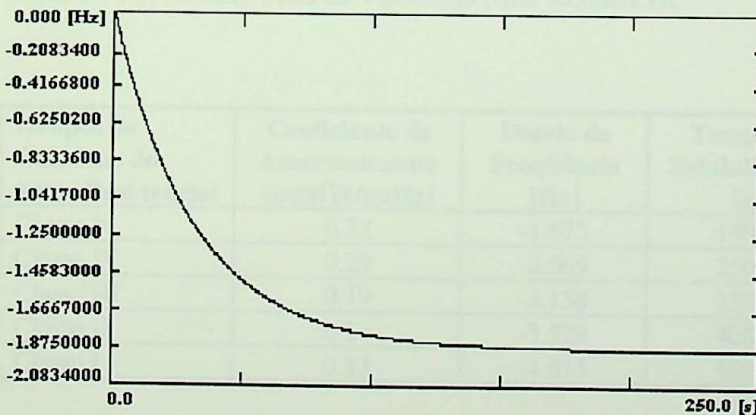


Fig. 3.24: Curva de resposta da frequência para a classe V.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para esta classe, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -1.875 Hz e um tempo de estabilização em torno de 190.0 s.

O sumário da distribuição do uso final da energia elétrica entre as classes integrantes da carga residencial é mostrado na TABELA 3.5[9].

TABELA 3.5: Estrutura do Consumo de Energia Elétrica no Brasil por Nível de Renda Segundo Seu Uso (%).

Classe de Consumo Residencial	Uso Final (%) Lazer	Uso Final (%) Conservação de Alimentos	Uso Final (%) Serviços Domésticos	Uso Final (%) Condicionamento Ambiental	Uso Final (%) Aquecimento de Água	Uso Final (%) Iluminação
Classe I	16.4	25.4	18.3	0.6	18.3	21.0
Classe II	10.4	34.2	12.3	0.9	24.6	17.6
Classe III	8.8	36.2	8.9	1.4	27.6	17.1
Classe IV	7.7	33.3	7.2	1.5	27.8	22.5
Classe V	6.2	29.9	6.5	2.9	25.9	28.6

Finalizando o sub-ítem 3.4, a TABELA 3.6 apresenta um extrato das informações obtidas anteriormente via procedimentos de cálculo e através dos resultados das simulações realizadas, ou seja, valores dos coeficientes de amortecimento, dos desvios de frequência em regime permanente e os tempos de estabilização associados, para as diversas classes de consumo do setor residencial.

TABELA 3.6: Resumo Final de Valores do Setor Residencial.

Grupos de Consumo do Setor Residencial	Coefficiente de Amortecimento [puMW/puHz]	Desvio de Frequência [Hz]	Tempo de Estabilização [s]
Classe V	0.32	-1.875	190.0
Classe IV	0.29	-2.069	250.0
Classe III	0.19	-3.158	350.0
Classe II	0.17	-3.529	400.0
Classe I	0.13	-4.615	500.0

### 3.5 Carga Comercial/Serviços

Para subsidiar a análise do comportamento da carga comercial/serviços com relação a frequência, tomou-se como base a referência " **Balanco Energético do Estado de São Paulo - 1986**"[10], nos aspectos referentes a divisão da carga comercial/serviços nos diversos grupos de atividades, bem como, a distribuição do uso final da energia elétrica em tais grupos.

A estrutura do uso final do consumo de energia elétrica do setor comercial, incorporando-se ainda o setor de serviços, foi decomposta em oito grupos de atividades, e mais um nono grupo, formado por grandes estabelecimentos, devido as suas características particulares[10].

Salienta-se que a cada aplicação ou uso final de energia, estão associados um ou mais equipamentos, ou seja:

- iluminação: lâmpada incandescente, lâmpada fluorescente.
- condicionamento ambiental: ar condicionado, ventilador.
- refrigeração: geladeira, freezer.
- cocção: eletrodomésticos com motor.
- outros: depende de cada atividade.

Ressalta-se que o uso final "Outros" representa ou está associado a utilização de equipamentos destinados à execução das atividades comerciais dos respectivos grupos. No grupo Serviços Pessoais o uso final "Outros" refere-se a participação de equipamentos elétricos de lavagem e secagem de roupas, ou ainda, no caso do grupo Postos de Gasolina à utilização de bombas de abastecimento, compressores de ar, etc, e assim sendo para os demais grupos.

A seguir serão apresentados os diversos grupos de atividades pertencentes a carga comercial/serviços:

### 3.5.1 Grupo Lojas

Considerou-se para este grupo a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	76.4	lâmpada fluorescente
Condicionamento Ambiental	11.9	ar condicionado tipo janela
Refrigeração	0.0	refrigerador e freezer
Cocção	0.0	eletrodoméstico com motor
Outros	11.7	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este grupo é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{loj}) = \frac{\%Ilu \times Di_{12} + \%Coa \times Di_2 + \%Ref \times Di_{15} + \%Coc \times Di_9 + \%Out \times Di_{18}}{100}$$

$$D(\text{loj}) = \frac{76.4 \times 1.0 + 11.9 \times 0.6 + 0.0 \times 0.5 + 0.0 \times 0.1 + 11.7 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{loj}) = 0.83[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.25 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o grupo lojas, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

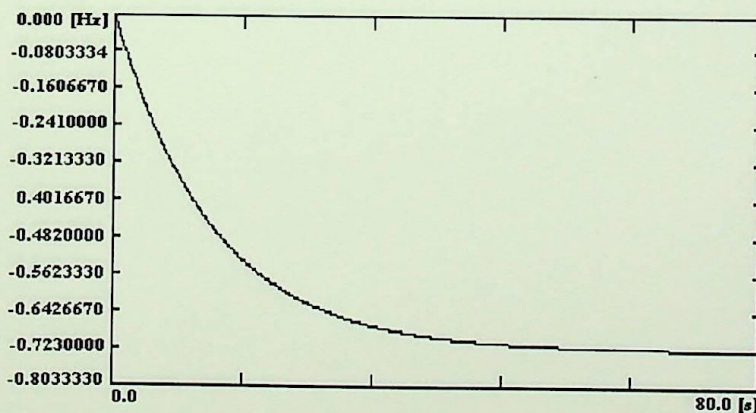


Fig. 3.25: Curva de resposta da frequência para o grupo lojas.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este grupo, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.723 Hz e um tempo de estabilização em torno de 73.0 s.

### 3.5.2 Grupo Comércio de Alimentos

Considerou-se para este grupo a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	25.0	lâmpada fluorescente
Condicionamento Ambiental	1.8	ar condicionado tipo janela
Refrigeração	56.0	refrigerador e freezer
Cocção	13.4	eletrodoméstico com motor
Outros	3.8	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este grupo é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{cda}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Coa \times Di2 + \%Ref \times Di15 + \%Coc \times Di9 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{cda}) = \frac{25.0 \times 1.0 + 1.8 \times 0.6 + 56.0 \times 0.5 + 13.4 \times 0.1 + 3.8 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{cda}) = 0.55[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.26 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o grupo comércio de alimentos, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

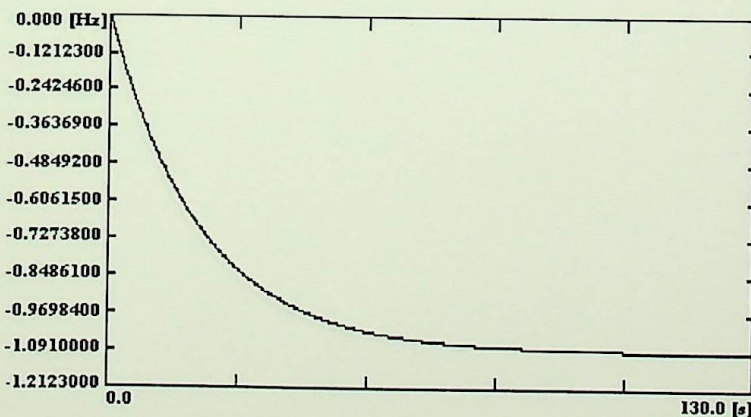


Fig. 3.26: Curva de resposta da frequência para o grupo comércio de alimentos.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este grupo, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -1.091 Hz e um tempo de estabilização em torno de 110.0 s.

### 3.5.3 Grupo Postos de Gasolina

Considerou-se para este grupo a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	42.9	lâmpada fluorescente
Condicionamento Ambiental	0.4	ar condicionado tipo janela
Refrigeração	7.5	refrigerador e freezer
Cocção	0.0	eletrodoméstico com motor
Outros	49.2	bomba e outros motores

O valor do coeficiente de amortecimento para este grupo é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{pdg}) = \frac{\%Ilu \times Di_{12} + \%Coa \times Di_2 + \%Ref \times Di_{15} + \%Coc \times Di_9 + \%Out \times Di_7}{100}$$

$$D(\text{pdg}) = \frac{42.9 \times 1.0 + 0.4 \times 0.6 + 7.5 \times 0.5 + 0.0 \times 0.1 + 49.2 \times 2.9}{100}$$

$$D(\text{pdg}) = 1.90[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.27 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o grupo postos de gasolina, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

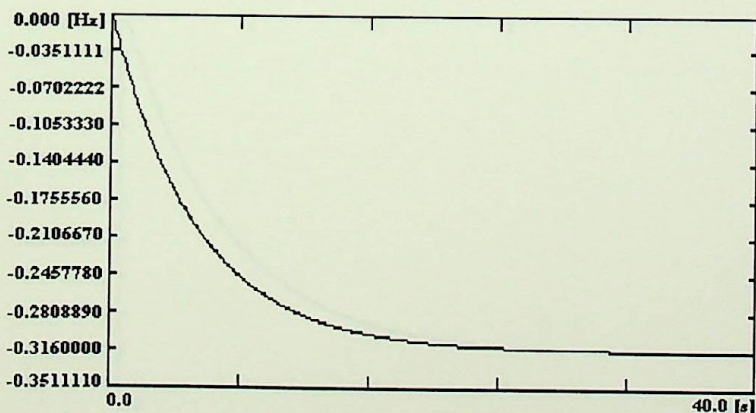


Fig. 3.27: Curva de resposta da frequência para o grupo postos de gasolina.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este grupo, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.316 Hz e um tempo de estabilização em torno de 31.0 s.

### 3.5.4 Grupo Serviços de Alimentação

Considerou-se para este grupo a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	20.3	lâmpada fluorescente
Condicionamento Ambiental	7.1	ar condicionado tipo janela
Refrigeração	44.2	refrigerador e freezer
Cocção	26.2	eletrodoméstico com motor
Outros	2.2	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este grupo é calculado da seguinte forma:

$$D(sda) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Coa \times Di2 + \%Ref \times Di15 + \%Coc \times Di9 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(sda) = \frac{20.3 \times 1.0 + 7.1 \times 0.6 + 44.2 \times 0.5 + 26.2 \times 0.1 + 2.2 \times 0.0}{100}$$

$$D(sda) = 0.49[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.28 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o grupo serviços de alimentação, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

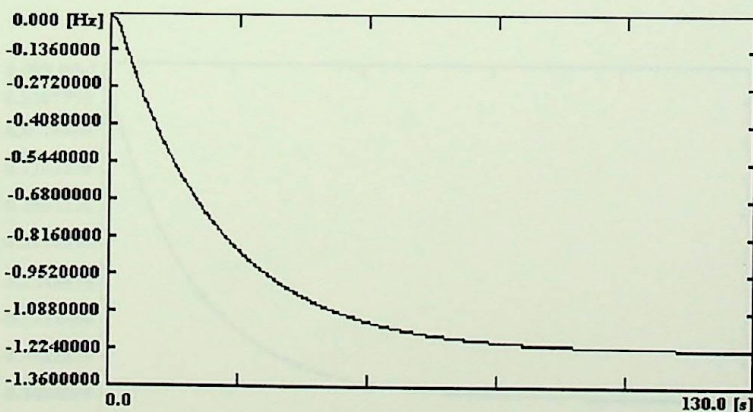


Fig. 3.28: Curva de resposta da frequência para o grupo serviços de alimentação.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este grupo, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -1.224 Hz e um tempo de estabilização em torno de 120.0 s.

### 3.5.5 Grupo Serviços de Reparo

Considerou-se para este grupo a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	56.3	lâmpada fluorescente
Condicionamento Ambiental	4.0	ventilador
Refrigeração	0.0	refrigerador e freezer
Cocção	0.0	eletrodoméstico com motor
Outros	39.7	bomba e outros motores

O valor do coeficiente de amortecimento para este grupo é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{sdr}) = \frac{\%Ilu \times Di_{12} + \%Coa \times Di_9 + \%Ref \times Di_{15} + \%Coc \times Di_9 + \%Out \times Di_7}{100}$$

$$D(\text{sdr}) = \frac{56.3 \times 1.0 + 4.0 \times 0.1 + 0.0 \times 0.5 + 0.0 \times 0.1 + 39.7 \times 2.9}{100}$$

$$D(\text{sdr}) = 1.72[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.29 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o grupo serviços de reparo, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

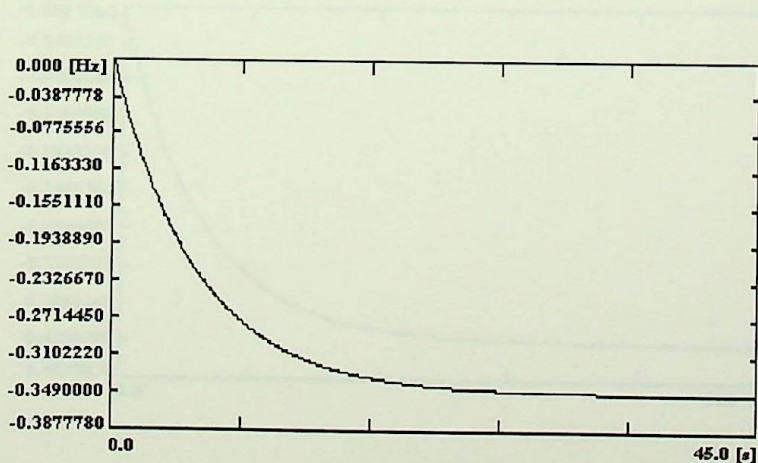


Fig. 3.29: Curva de resposta da frequência para o grupo serviços de reparo.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este grupo, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.349 Hz e um tempo de estabilização em torno de 35.0 s.

### 3.5.6 Grupo Serviços Pessoais

Considerou-se para este grupo a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	8.9	lâmpada fluorescente
Condicionamento Ambiental	3.0	ar condicionado tipo janela
Refrigeração	0.0	refrigerador e freezer
Cocção	0.0	eletrodoméstico com motor
Outros	88.1	máquina de lavar e secar roupa

O valor do coeficiente de amortecimento para este grupo é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{sep}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Coa \times Di2 + \%Ref \times Di15 + \%Coc \times Di9 + \%Out \times Di13 + Out \times Di16}{100}$$

$$D(\text{sep}) = \frac{8.9 \times 1.0 + 3.0 \times 0.6 + 0.0 \times 0.5 + 0.0 \times 0.1 + 44.05 \times 2.9 + 44.05 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{sep}) = 1.38[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.30 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o grupo serviços pessoais, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

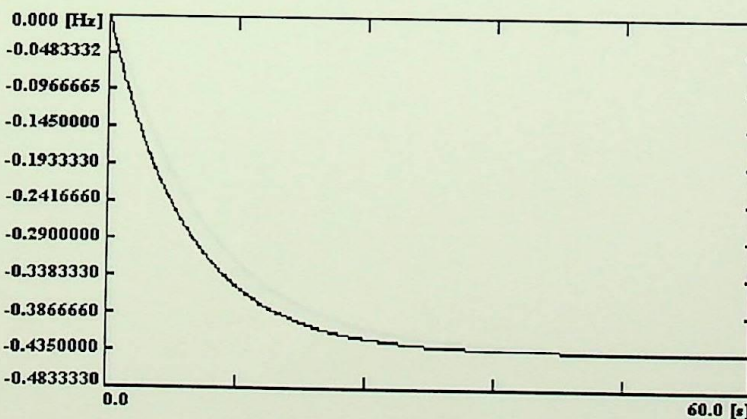


Fig. 3.30: Curva de resposta da frequência para o grupo serviços pessoais.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este grupo, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.435 Hz e um tempo de estabilização em torno de 43.0 s.

### 3.5.7 Grupo Agências Bancárias

Considerou-se para este grupo a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	52.1	lâmpada fluorescente
Condicionamento Ambiental	33.8	ar condicionado central trifásico
Refrigeração	0.2	refrigerador e freezer
Cocção	0.4	eletrodoméstico com motor
Outros	13.5	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este grupo é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{agb}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Coa \times Di4 + \%Ref \times Di15 + \%Coc \times Di9 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{agb}) = \frac{52.1 \times 1.0 + 33.8 \times 1.0 + 0.2 \times 0.5 + 0.4 \times 0.1 + 13.5 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{agb}) = 0.86[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.31 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o grupo agências bancárias, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

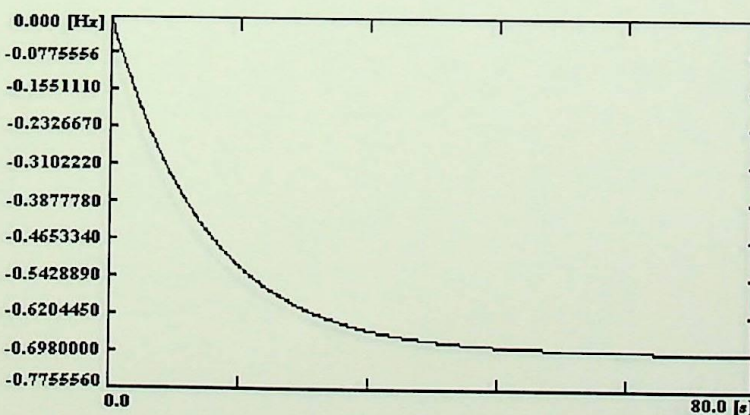


Fig. 3.31: Curva de resposta da frequência para o grupo agências bancárias.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este grupo, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.698 Hz e um tempo de estabilização em torno de 70.0 s.

### 3.5.8 Grupo Escritórios

Considerou-se para este grupo a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	50.3	lâmpada fluorescente
Condicionamento Ambiental	34.3	ar condicionado tipo janela
Refrigeração	0.0	refrigerador e freezer
Cocção	0.0	eletrodoméstico com motor
Outros	15.4	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este grupo é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{esc}) = \frac{\% \text{Ilu} \times Di12 + \% \text{Coa} \times Di2 + \% \text{Ref} \times Di15 + \% \text{Coc} \times Di9 + \% \text{Out} \times Di18}{100}$$

$$D(\text{esc}) = \frac{50.3 \times 1.0 + 34.3 \times 0.6 + 0.0 \times 0.5 + 0.0 \times 0.1 + 15.4 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{esc}) = 0.71[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.32 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o grupo escritórios, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

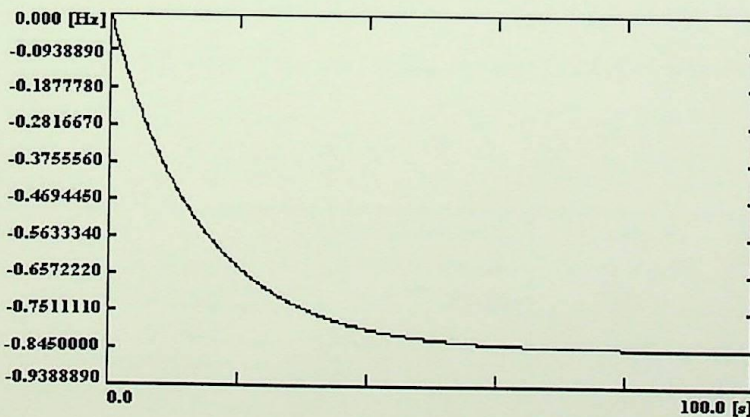


Fig. 3.32: Curva de resposta da frequência para o grupo escritórios.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este grupo, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.845 Hz e um tempo de estabilização em torno de 80.0 s.

### 3.5.9 Grupo Grandes Estabelecimentos

Considerou-se para este grupo a seguinte distribuição percentual do consumo de energia elétrica entre os diferentes usos finais, bem como os componentes individuais da carga a eles associados:

Uso Final	%	Componente Individual da Carga
Iluminação	49.5	lâmpada fluorescente
Condicionamento Ambiental	33.6	ar condicionado central trifásico
Refrigeração	6.1	refrigerador e freezer
Cocção	6.1	eletrodoméstico com motor
Outros	4.7	aparelhos eletrônicos

O valor do coeficiente de amortecimento para este grupo é calculado da seguinte forma:

$$D(\text{gre}) = \frac{\%Ilu \times Di12 + \%Coa \times Di4 + \%Ref \times Di15 + \%Coc \times Di9 + \%Out \times Di18}{100}$$

$$D(\text{gre}) = \frac{49.5 \times 1.0 + 33.6 \times 1.0 + 6.1 \times 0.5 + 6.1 \times 0.1 + 4.7 \times 0.0}{100}$$

$$D(\text{gre}) = 0.87[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.33 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o grupo grandes estabelecimentos, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo do sistema de potência mostrado na figura 2.1.

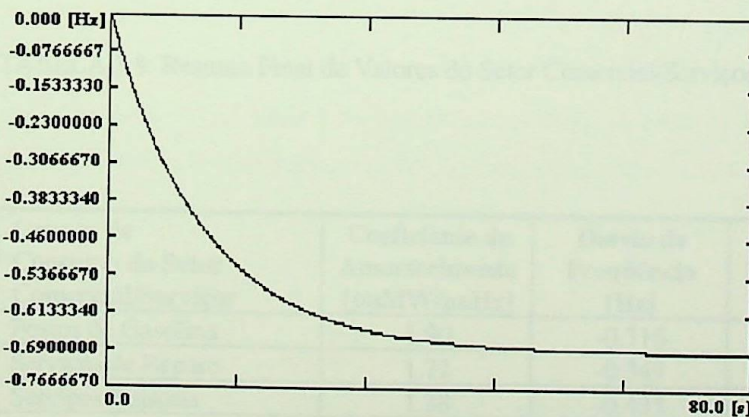


Fig. 3.33: Curva de resposta da frequência para o grupo grandes estabelecimentos.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este grupo, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.690 Hz e um tempo de estabilização em torno de 69.0 s.

O sumário da distribuição do uso final da energia elétrica entre os grupos integrantes da carga comercial/serviços é mostrado na TABELA 3.7[10].

TABELA 3.7: Distribuição e Consumo de Eletricidade por Usos Finais no Setor Comercial/Serviços.

Grupos de Consumo do Setor Comercial/Serviços	Uso Final (%) Iluminação	Uso Final (%) Condicionamento Ambiental	Uso Final (%) Refrigeração	Uso Final (%) Cocção	Uso Final (%) Outros
Lojas	76.4	11.9	0.0	0.0	11.7
Comércio de Alimentos	25.0	1.8	56.0	13.4	3.8
Postos de Gasolina	42.9	0.4	7.5	0.0	49.2
Serviços de Alimentação	20.3	7.1	44.2	26.2	2.2
Serviços de Reparo	56.3	4.0	0.0	0.0	39.7
Serviços Pessoais	8.9	3.0	0.0	0.0	88.1
Agências Bancárias	52.1	33.8	0.2	0.4	13.5
Escritórios	50.3	34.3	0.0	0.0	15.4
Grandes Estabelecimentos	49.5	33.6	6.1	6.1	4.7

Finalizando o sub-ítem 3.5, a TABELA 3.8 apresenta um extrato das informações obtidas anteriormente via procedimentos de cálculo e através dos resultados das simulações realizadas, ou seja, valores dos coeficientes de amortecimento, valores dos desvios de frequência em regime permanente e os tempos de estabilização associados, para os grupos de consumo do setor comercial/serviços.

TABELA 3.8: Resumo Final de Valores do Setor Comercial/Serviços.

Grupos de Consumo do Setor Comercial/Serviços	Coefficiente de Amortecimento [puMW/puHz]	Desvio de Frequência [Hz]	Tempo de Estabilização [s]
Postos de Gasolina	1.90	-0.316	31.0
Serviços de Reparo	1.72	-0.349	35.0
Serviços Pessoais	1.38	-0.435	43.0
Grandes Estabelecimentos	0.87	-0.690	69.0
Agências Bancárias	0.86	-0.698	70.0
Lojas	0.83	-0.723	73.0
Escritórios	0.71	-0.845	80.0
Comércio de Alimentos	0.55	-1.091	110.0
Serviços de Alimentação	0.49	-1.224	120.0

## 3.6 Composição da Carga em Áreas de Controle

### 3.6.1 Introdução

A demanda total "vista" na barra de uma determinada subestação é a soma das demandas individuais dos diversos tipos de consumidores, integrantes das diferentes classes de consumo, cada qual utilizando a energia elétrica suprida para os mais variados fins.

Diante deste quadro, e extrapolando para uma visão mais ampla, pode-se dizer que para que se possa compor a carga global de uma dada empresa concessionária, área de controle ou até mesmo de uma determinada região, com o intuito de melhor representar o comportamento dinâmico da carga com relação a frequência em estudos de simulação, é fundamental o conhecimento do uso final da energia elétrica, bem como, a composição do mercado consumidor em suas diferentes classes.

### 3.6.2 Composição de Mercado

Vencida as etapas iniciais de estabelecer a divisão da carga, caracterizando os usos finais da energia elétrica nos diversos setores de atividades e classes de consumo pertencentes a cada tipo de carga, bem como calcular os valores dos coeficientes de amortecimento para todos estes segmentos consumidores, deve-se então, definir a composição de mercado para as áreas de controle.

Porém, além de se definir a participação percentual das classes industrial, residencial e comercial/serviços no mercado, é interessante conhecer quais são os consumidores típicos em cada classe de consumo pertencentes a área de controle, empresa concessionária ou região geográfica a ser analisada, objetivando caracterizar da forma mais precisa possível o comportamento da variação da carga em análise com relação a frequência, através da determinação do coeficiente de amortecimento D.

### 3.6.3 Consumidores típicos

Analisando-se o hábito do consumo das classes residenciais e a distribuição do consumo de energia elétrica por usos finais nos diversos ramos de atividades dos setores industrial e comercial/serviços, pode-se agrupar esses consumidores baseados em alguma característica típica comum.

Para a Carga Industrial, tem-se:

- setores onde existe predominância do uso final motores elétricos

Cerâmica Vermelha	- D = 2.79 [puMW/puHz]
Têxtil	- D = 2.67 [puMW/puHz]
Laticínios	- D = 2.62 [puMW/puHz]
Outros	- D = 2.29 [puMW/puHz]
Cimento	- D = 1.88 [puMW/puHz]
Alimentos e Bebidas	- D = 1.82 [puMW/puHz]
Cal	- D = 1.81 [puMW/puHz]
Açúcar e Álcool	- D = 1.80 [puMW/puHz]
Mineração	- D = 1.79 [puMW/puHz]
Fertilizantes	- D = 1.78 [puMW/puHz]
Papel e Celulose	- D = 1.56 [puMW/puHz]
<b>Valor Médio</b>	<b>- D(in1) = 2.07 [puMW/puHz]</b>

- setores onde existe predominância dos usos finais geração de calor e motores elétricos

Cerâmica Branca	- D = 1.26 [puMW/puHz]
Refratários	- D = 1.20 [puMW/puHz]
Fundição	- D = 0.83 [puMW/puHz]
Outros Não-Ferrosos	- D = 0.71 [puMW/puHz]
Forjarias	- D = 0.31 [puMW/puHz]
<b>Valor Médio</b>	<b>- D(in2) = 0.86 [puMW/puHz]</b>

- setores onde existe predominância do uso final eletroquímica

Química	- D = 0.20 [puMW/puHz]
Zinco	- D = 0.15 [puMW/puHz]
Alumínio	- D = - 0.18 [puMW/puHz]
<b>Valor Médio</b>	<b>- D(in3) = 0.06 [puMW/puHz]</b>

Para a Carga Residencial, tem-se:

- classes onde existe predominância dos usos finais condicionamento ambiental e aquecimento de água

Classe V	- D = 0.32 [puMW/puHz]
Classe IV	- D = 0.29 [puMW/puHz]
Classe III	- D = 0.19 [puMW/puHz]
<b>Valor Médio</b>	<b>- D(re1) = 0.27 [puMW/puHz]</b>

- classes onde existe predominância dos usos finais lazer e serviços domésticos

Classe II	- D = 0.17 [puMW/puHz]
Classe I	- D = 0.13 [puMW/puHz]
<b>Valor Médio</b>	<b>- D(re2) = 0.15 [puMW/puHz]</b>

Para a Carga Comercial/Serviços, tem-se:

- grupos onde existe predominância dos uso final refrigeração e cocção

Comércio de Alimentos	- D = 0.55 [puMW/puHz]
Serviços de Alimentação	- D = 0.49 [puMW/puHz]
<b>Valor Médio</b>	<b>- D(co1) = 0.52 [puMW/puHz]</b>

- grupos onde existe predominância dos usos finais outros fins e iluminação

Postos de Gasolina -  $D = 1.90$  [puMW/puHz]

Serviços de Reparo -  $D = 1.72$  [puMW/puHz]

Serviços Pessoais -  $D = 1.38$  [puMW/puHz]

**Valor Médio** -  $D(\text{co2}) = 1.67$  [puMW/puHz]

- grupos onde existe predominância dos usos finais iluminação e condicionamento ambiental

Grandes Estabelecimentos -  $D = 0.87$  [puMW/puHz]

Agências Bancárias -  $D = 0.86$  [puMW/puHz]

Lojas -  $D = 0.83$  [puMW/puHz]

Escritórios -  $D = 0.71$  [puMW/puHz]

**Valor Médio** -  $D(\text{co3}) = 0.82$  [puMW/puHz]

### 3.6.4 Características das áreas de controle

Baseados nas informações obtidas e desenvolvidas anteriormente, no que diz respeito a caracterização dos diversos tipos de carga através do coeficiente de amortecimento da carga com relação a frequência, e na importância da definição da composição de mercado para uma dada área de controle a ser analisada, serão propostos para a etapa de simulações dos sistemas de controle de carga-frequência sistemas genéricos, enfatizando primeiramente uma área eminentemente industrial, a seguir uma área com presença significativa de indústrias e um equilíbrio nos setores residencial e comercial/serviços e ainda uma área menos industrializada e com ênfase às atividades comerciais/serviços e consumo residencial, com as seguintes características :

#### a) Sistema T1

sistema composto por uma área de controle térmica isolada, conforme modelo da figura 2.6, cuja carga apresenta a seguinte composição de mercado:

70 % industrial, constituída por setores onde existe predominância do uso final motores elétricos;

15 % residencial, constituída por classes onde existe predominância dos usos finais condicionamento ambiental e aquecimento de água;

15 % comercial/serviços, constituída por grupos onde existe predominância dos usos finais iluminação e condicionamento ambiental.

**b) Sistema T2**

sistema composto por uma área de controle térmica isolada, conforme modelo da figura 2.6, cuja carga apresenta a seguinte composição de mercado:

- 50 % industrial, constituída por setores onde existe predominância dos usos finais geração de calor e motores elétricos;
- 25 % residencial, constituída por classes onde existe predominância dos usos finais condicionamento ambiental e aquecimento de água;
- 25 % comercial/serviços, constituída por grupos onde existe predominância dos usos finais iluminação e condicionamento ambiental.

**c) Sistema T3**

sistema composto por uma área de controle térmica isolada, conforme modelo da figura 2.6, cuja carga apresenta a seguinte composição de mercado:

- 25 % industrial, constituída por setores onde existe predominância do uso final eletroquímica;
- 40 % residencial, constituída por classes onde existe predominância dos usos finais lazer e serviços domésticos;
- 35 % comercial/serviços, constituída por grupos onde existe predominância dos usos finais refrigeração e cocção.

**d) Sistema H1**

sistema composto por uma área de controle hidráulica isolada, conforme modelo da figura 2.7, cuja carga apresenta a seguinte composição de mercado:

- 70 % industrial, constituída por setores onde existe predominância do uso final motores elétricos;
- 15 % residencial, constituída por classes onde existe predominância dos usos finais condicionamento ambiental e aquecimento de água;
- 15 % comercial/serviços, constituída por grupos onde existe predominância dos usos finais iluminação e condicionamento ambiental.

**e) Sistema H2**

sistema composto por uma área de controle hidráulica isolada, conforme modelo da figura 2.7, cuja carga apresenta a seguinte composição de mercado:

- 50 % industrial, constituída por setores onde existe predominância dos usos finais geração de calor e motores elétricos;
- 25 % residencial, constituída por classes onde existe predominância dos usos finais condicionamento ambiental e aquecimento de água;
- 25 % comercial/serviços, constituída por grupos onde existe predominância dos usos finais iluminação e condicionamento ambiental.

### f) Sistema H3

sistema composto por uma área de controle hidráulica isolada, conforme modelo da figura 2.7, cuja carga apresenta a seguinte composição de mercado:

25 % industrial, constituída por setores onde existe predominância do uso final eletroquímica;

40 % residencial, constituída por classes onde existe predominância dos usos finais lazer e serviços domésticos;

35 % comercial/serviços, constituída por grupos onde existe predominância dos usos finais refrigeração e cocção.

## 3.7 Simulações do Sistema de Controle de Carga-Freqüência

### 3.7.1 Considerações

Nas simulações para a determinação do comportamento da freqüência dos sistemas de controle considerou-se, em todos os casos, os mesmos estarem sujeitos a um impacto de carga em degrau de 0.01 pu, utilizando-se ainda, os parâmetros da TABELA 3.9.

TABELA 3.9: Dados dos Parâmetros dos Sistemas de Controle de Carga-Freqüência.

Sistema	R[pu]	r[pu]	Tt[s]	Tw[s]	Tr[s]	Ts[s]	C	D[pu]	T1[s]	H[s]
T1	0.05	-	-	-	5.00	0.25	0.40	1.61	0.10	5.00
T2	0.05	-	-	-	5.00	0.25	0.40	0.70	0.10	5.00
T3	0.05	-	-	-	5.00	0.25	0.40	0.26	0.10	5.00
H1	0.05	0.50	12.0	2.50	-	-	-	1.61	0.60	5.00
H2	0.05	0.50	12.0	2.50	-	-	-	0.70	0.60	5.00
H3	0.05	0.50	12.0	2.50	-	-	-	0.26	0.60	5.00

Para a simulação no tempo destes sistemas, utilizou-se o Programa TUTSIM[22], bastante conhecido no meio científico.

A metodologia de cálculo adotada para a obtenção dos valores de D apresentados na TABELA 3.9 para os diversos sistemas de controle, consistiu na ponderação simples entre os percentuais de composição de mercado (%Ind, %Res e %Com) de cada sistema (sub-ítem 3.6.4), com o valor médio do coeficiente de amortecimento de alguns de seus consumidores típicos associados respectivamente a cada tipo de carga (sub-ítem 3.6.3), como será descrito com maiores detalhes a seguir.

### 3.7.2 Áreas térmicas isoladas

#### a) Sistema T1

O valor do coeficiente de amortecimento para este sistema foi calculado da seguinte forma:

$$D(st1) = \frac{\%Ind \times D(in1) + \%Res \times D(re1) + \%Com \times D(\infty3)}{100}$$

$$D(st1) = \frac{70.0 \times 2.07 + 15.0 \times 0.27 + 15.0 \times 0.82}{100}$$

$$D(st1) = 1.61[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.34 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o sistema T1, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo da área de controle térmica mostrado na figura 2.6.

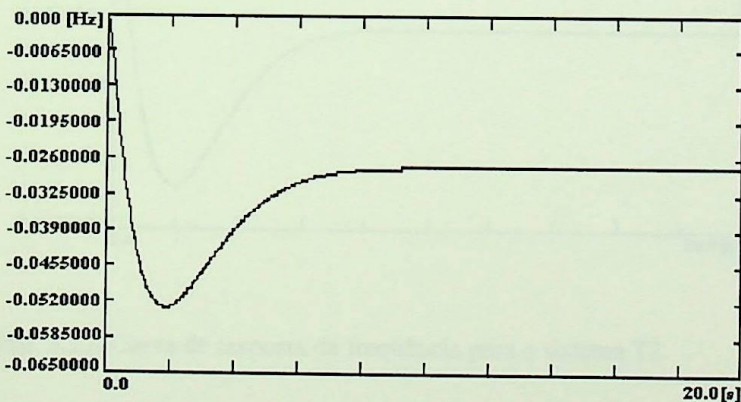


Fig. 3.34: Curva de resposta da frequência para o sistema T1.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este sistema, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.028 Hz e um tempo de estabilização em torno de 8.0 s.

Admitindo-se na simulação apenas o efeito da regulação própria da carga, ter-se-ia um desvio de frequência em regime permanente de -0.373 Hz e um tempo de estabilização em torno de 30.0 s.

## b) Sistema T2

O valor do coeficiente de amortecimento para este sistema foi calculado da seguinte forma:

$$D(st2) = \frac{\%Ind \times D(in2) + \%Res \times D(re1) + \%Com \times D(co3)}{100}$$

$$D(st2) = \frac{50.0 \times 0.86 + 25.0 \times 0.27 + 25.0 \times 0.82}{100}$$

$$D(st2) = 0.70[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.35 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o sistema T2, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo da área de controle térmica mostrado na figura 2.6.

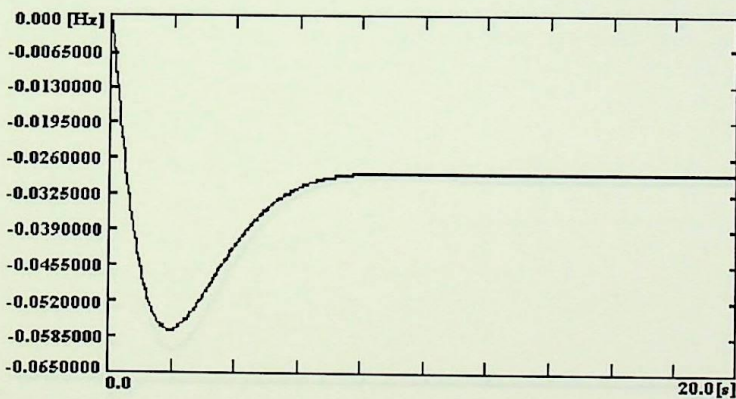


Fig. 3.35: Curva de resposta da frequência para o sistema T2.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este sistema, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.029 Hz e um tempo de estabilização em torno de 8.0 s.

Admitindo-se na simulação apenas o efeito da regulação própria da carga, ter-se-ia um desvio de frequência em regime permanente de -0.845 Hz e um tempo de estabilização em torno de 85.0 s.

## c) Sistema T3

O valor do coeficiente de amortecimento para este sistema foi calculado da seguinte forma:

$$D(st3) = \frac{\%Ind \times D(in3) + \%Res \times D(re2) + \%Com \times D(co1)}{100}$$

$$D(st3) = \frac{25.0 \times 0.06 + 40.0 \times 0.15 + 35.0 \times 0.52}{100}$$

$$D(st3) = 0.26[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.36 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o sistema T3, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo da área de controle térmica mostrado na figura 2.6.

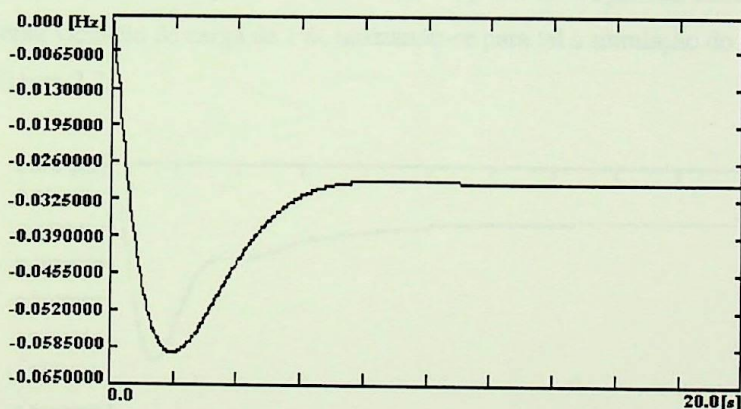


Fig. 3.36: Curva de resposta da frequência para o sistema T3.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este sistema, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.030 Hz e um tempo de estabilização em torno de 8.0 s.

Admitindo-se na simulação apenas o efeito da regulação própria da carga, ter-se-ia um desvio de frequência em regime permanente de -2.308 Hz e um tempo de estabilização em torno de 250.0 s.

### 3.7.3 Áreas hidráulicas isoladas

#### d) Sistema H1

O valor do coeficiente de amortecimento para este sistema foi calculado da seguinte forma:

$$D(\text{sh}1) = \frac{\% \text{Ind} \times D(\text{in}1) + \% \text{Res} \times D(\text{re}1) + \% \text{Com} \times D(\text{co}3)}{100}$$

$$D(\text{sh}1) = \frac{70.0 \times 2.07 + 15.0 \times 0.27 + 15.0 \times 0.82}{100}$$

$$D(\text{sh}1) = 1.61 [\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.37 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o sistema H1, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo da área de controle hidráulica mostrado na figura 2.7.

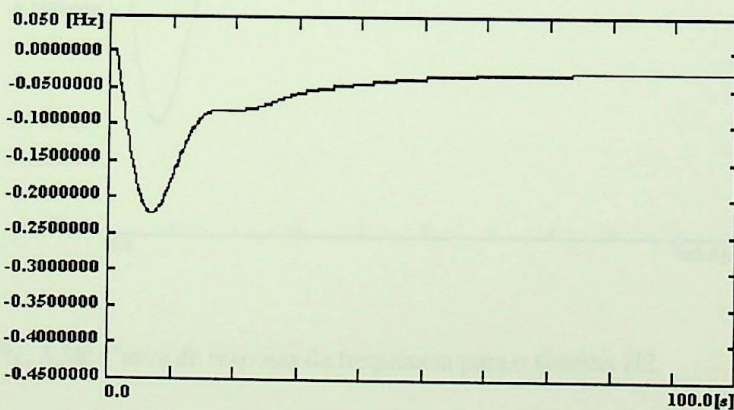


Fig. 3.37: Curva de resposta da frequência para o sistema H1.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este sistema, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.030 Hz e um tempo de estabilização em torno de 50.0 s.

Admitindo-se na simulação apenas o efeito da regulação própria da carga, ter-se-ia um desvio de frequência em regime permanente de -0.373 Hz e um tempo de estabilização em torno de 30.0 s.

## e) Sistema H2

O valor do coeficiente de amortecimento para este sistema foi calculado da seguinte forma:

$$D(\text{sh}2) = \frac{\% \text{Ind} \times D(\text{in}2) + \% \text{Res} \times D(\text{re}1) + \% \text{Com} \times D(\text{co}3)}{100}$$

$$D(\text{sh}2) = \frac{50.0 \times 0.86 + 25.0 \times 0.27 + 25.0 \times 0.82}{100}$$

$$D(\text{sh}2) = 0.70 [\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.38 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o sistema H2, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo da área de controle hidráulica mostrado na figura 2.7.

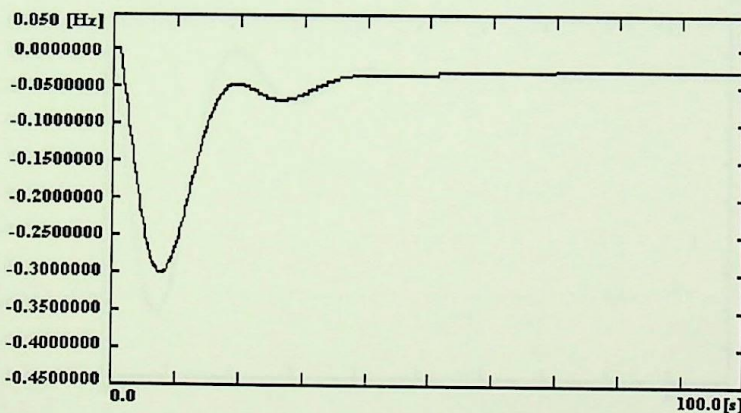


Fig. 3.38: Curva de resposta da frequência para o sistema H2.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este sistema, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.030 Hz e um tempo de estabilização em torno de 60.0 s.

Admitindo-se na simulação apenas o efeito da regulação própria da carga, ter-se-ia um desvio de frequência em regime permanente de -0.845 Hz e um tempo de estabilização em torno de 85.0 s.

## f) Sistema H3

O valor do coeficiente de amortecimento para este sistema foi calculado da seguinte forma:

$$D(\text{sh3}) = \frac{\% \text{Ind} \times D(\text{in3}) + \% \text{Res} \times D(\text{re2}) + \% \text{Com} \times D(\text{co1})}{100}$$

$$D(\text{sh3}) = \frac{25.0 \times 0.06 + 40.0 \times 0.15 + 35.0 \times 0.52}{100}$$

$$D(\text{sh3}) = 0.26[\text{puMW} / \text{puHz}]$$

A figura 3.39 apresenta a curva de resposta da frequência em função do tempo para o sistema H3, considerando uma variação de carga de 1%, utilizando-se para tal a simulação do modelo da área de controle hidráulica mostrado na figura 2.7.

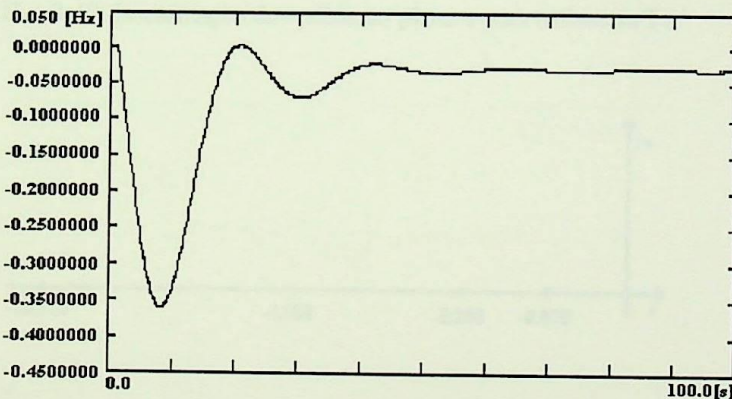


Fig. 3.39: Curva de resposta da frequência para o sistema H3.

Analisando-se a curva de resposta da frequência em função do tempo para este sistema, verificou-se um desvio de frequência em regime permanente de -0.030 Hz e um tempo de estabilização em torno de 70.0 s.

Admitindo-se na simulação apenas o efeito da regulação própria da carga, ter-se-ia um desvio de frequência em regime permanente de -2.308 Hz e um tempo de estabilização em torno de 250.0 s.

### 3.7.4 Estabilidade dos sistemas de controle

Baseado nos diagramas de blocos das figuras 2.6 e 2.7, pode-se, aplicando a teoria de controle, determinar as funções de transferência de malha fechada  $F(s)=G(s)/Q(s)$ , e por conseguinte obter os pólos das mesmas, que são as raízes das equações características  $Q(s)$  dos sistemas de controle simulados anteriormente.[4,5,12]

Então, através da localização dessas raízes no plano  $s$ , é possível determinar a estabilidade dos sistemas de controle, detectando-se o efeito da variação do coeficiente de amortecimento da carga nos diversos sistemas.

As figuras a seguir (sem escalas), ilustram tais fatos:

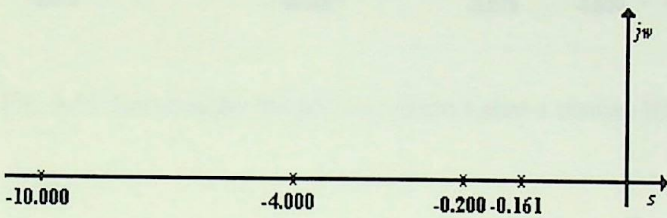


Fig. 3.40: Localização dos pólos no plano  $s$  para o sistema T1.

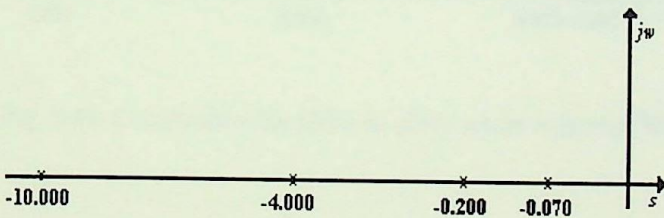


Fig. 3.41: Localização dos pólos no plano  $s$  para o sistema T2.

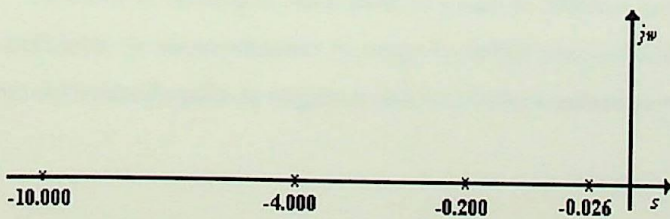


Fig. 3.42: Localização dos pólos no plano  $s$  para o sistema T3.

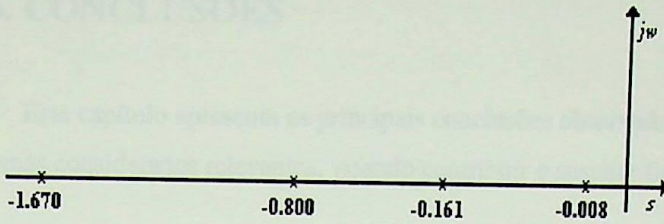


Fig. 3.43: Localização dos pólos no plano  $s$  para o sistema H1.

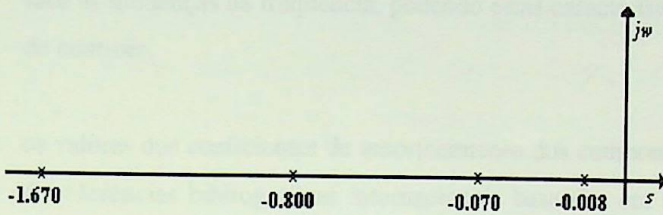


Fig. 3.44: Localização dos pólos no plano  $s$  para o sistema H2.

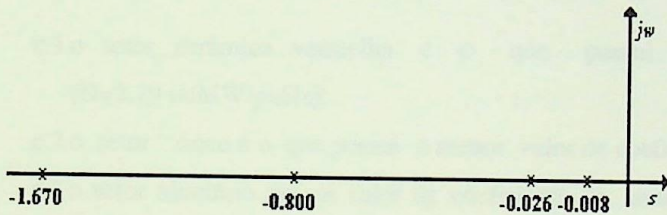


Fig. 3.45: Localização dos pólos no plano  $s$  para o sistema H3.

Verifica-se que, em função da localização de todos os pólos no lado esquerdo do plano  $s$ , está garantida a estabilidade de todos os sistemas de controle simulados.

Observa-se ainda que, tanto para os sistemas térmicos quanto para os sistemas hidráulicos, o efeito da redução do coeficiente de amortecimento da carga contribui para a diminuição da margem de estabilidade, pela aproximação de um determinado pólo da origem e cuja tendência conduziria os sistemas a instabilidade.

## 4. CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões observadas ao longo do presente trabalho, além de sugerir alguns temas considerados relevantes, visando contribuir e suscitar futuros desenvolvimentos.

Como conclusões, pode-se dizer que:

- a. os componentes individuais da carga apresentam características distintas com relação aos seus comportamentos face as mudanças na frequência, podendo estas características serem benéficas ou não à estabilidade dos sistemas de controle.
- b. os valores dos coeficientes de amortecimento dos componentes individuais da carga ( $D_i$ ) foram obtidos através de referências bibliográficas internacionais baseados em testes e modelos matemáticos, sendo que a associação destes valores com os usos finais para os tipos de carga enfocados, bem como a distribuição percentual dos usos finais nos diversos segmentos consumidores, procurou retratar um padrão médio do consumo nacional.
- c. no que diz respeito a carga industrial
  - c.1 o setor cerâmica vermelha é o que possui o maior valor de coeficiente de amortecimento ( $D=2.79$  puMW/puHz);
  - c.2 o setor zinco é o que possui o menor valor de coeficiente de amortecimento ( $D=0.15$  puMW/puHz);
  - c.3 o setor alumínio possui valor de coeficiente de amortecimento negativo ( $D=-0.18$  puMW/puHz), cuja característica provoca uma redução exponencial da frequência, sendo portanto uma carga instável;
  - c.4 os setores que possuem os maiores valores de coeficientes de amortecimento apresentam o uso final motores elétricos de forma predominante;
  - c.5 os setores que possuem os menores valores de coeficientes de amortecimento apresentam o uso final eletroquímica de forma predominante.
- d. no que diz respeito a carga residencial
  - d.1 a classe V é a que possui o maior valor de coeficiente de amortecimento ( $D=0.32$  puMW/puHz);
  - d.2 a classe I é a que possui o menor valor de coeficiente de amortecimento ( $D=0.13$  puMW/puHz);
  - d.3 as classes que possuem os maiores valores de coeficientes de amortecimento são as de maior faixa salarial;
  - d.4 as classes que possuem os menores valores de coeficientes de amortecimento são as de menor faixa salarial.
- e. no que diz respeito a carga comercial/serviços
  - e.1 o grupo postos de gasolina é o que possui o maior valor de coeficiente de amortecimento ( $D=1.90$  puMW/puHz);
  - e.2 o grupo serviços de alimentação é o que possui o menor valor de coeficiente de amortecimento ( $D=0.49$  puMW/puHz);
  - e.3 os grupos que possuem os maiores valores de coeficientes de amortecimento apresentam o uso final outros (associados à motores, bombas, compressores) de forma predominante;

e.4 os grupos que possuem os menores valores de coeficientes de amortecimento apresentam os usos finais refrigeração e cocção de forma predominante.

- f. quanto maior for o valor do coeficiente de amortecimento da carga, menor será o valor do desvio de frequência e menor será o tempo para a estabilização da mesma, mostrando a influência do parâmetro  $D$  na resposta em regime permanente do sistema.
- g. calculando a média dos valores dos coeficientes de amortecimento dos diversos segmentos consumidores para cada tipo de carga, verifica-se que a carga industrial possui o maior valor ( $D=1.44$  puMW/puHz), vindo a seguir a carga comercial/serviços ( $D=1.03$  puMW/puHz) e por fim a carga residencial ( $D=0.22$  puMW/puHz), fato este que esta relacionado com os usos finais específicos a cada atividade de consumo.
- h. baseado na metodologia proposta, dispondo dos valores dos coeficientes de amortecimento dos componentes individuais da carga ( $D_i$ ) e conhecendo-se a composição de mercado e o uso final da energia elétrica de uma dada empresa ou área de controle, é possível caracterizar com maior fidelidade o comportamento da carga global, permitindo-se desta forma, uma melhor representação da mesma nos estudos de estabilidade.
- i. como proposto nos itens 3.6 e 3.7, é salutar a utilização do conceito de consumidores típicos, quando for inviável ou se julgar desnecessária uma maior estratificação dentro de cada tipo de carga, visando obter-se o valor do coeficiente de amortecimento da carga global para a realização das simulações dos sistemas de controle de carga-freqüência, sistemas estes cujas composições de mercado estão associadas ao mercado nacional.
- j. a auto-regulação da carga é bastante importante para valores limites de operação dos sistemas elétricos.
- k. apesar da auto-regulação da carga, verifica-se nas simulações, tanto para os sistemas térmicos quanto para os hidráulicos, ser fundamental a presença da regulação primária, visando minimizar os desvios de frequência em regime permanente e estabilizar os sistemas elétricos.

**Como futuros desenvolvimentos, sugere-se:**

- a. investir em trabalhos de pesquisa e testes de laboratório que visem caracterizar o comportamento com relação a frequência de novos equipamentos, buscando atualização de informações, baseados no fato do contínuo desenvolvimento tecnológico de novos componentes individuais da carga.
- b. investir em trabalhos de pesquisa junto aos diversos segmentos consumidores, na busca de uma maior estratificação da carga, no que diz respeito aos usos finais de energia.
- c. que trabalhos futuros estudem, através de modelos mais precisos da carga, o problema do acoplamento tensão-freqüência.
- d. que trabalhos futuros estudem, através de modelos mais precisos da carga, o comportamento das cargas sujeitas a grandes variações de frequência, verificando se a representação linear ainda é satisfatória.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] X.Vieira Filho, " Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração " , ELETROBRÁS/Editora Campus, 1984.
- [2] O.I.Elgerd , " Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica " , Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1976.
- [3] S.B.Crary, " Power System Stability I " , John Wiley, 1947.
- [4] K.Ogata, " Engenharia de Controle Moderno " , Editora Prentice/Hall do Brasil Ltda, 1982.
- [5] C.L.Phillips and R.D.Harbor, " FeedBack Control Systems " , Prentice/Hall International Editions, 1988.
- [6] P.Kandur, " Power System Stability and Control " , Editora McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [7] P.P.Carvalho Mendes, "Otimização do Controle Automático de Geração em Sistemas de Características Diversas"l , dissertação de mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1989.
- [8] CEMIG, " Uso de Energia Elétrica no Setor Industrial de Minas Gerais - 1985 " , Belo Horizonte, 1987.
- [9] CODI, " Conservação de Energia, Serviços e Consumidores - Conservação e Utilização de Energia " , vol. I, 1988.
- [10] CESP/CPFL/ELETROPAULO/COMGÁS, " Balanço Energético do Estado de São Paulo - 1986 " , São Paulo, 1989.
- [11] EPRI, " Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies" , EL-5003, Vol.2, 1987.
- [12] P.P.Carvalho Mendes, " Dinâmica e Controle da Geração " , Notas de Aula, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1989.
- [13] C.Concordia and L.K.Kirchmayer, " Tie-Line Power and Frequency Control of Electric Power Systems " , IEEE Transactions on PAS, pp. 562-572, 1953.
- [14] C.Concordia and L.K.Kirchmayer, "Tie-Line Power and Frequency Control of Electric Power Systems - Part II " , IEEE Transactions on PAS, pp. 133-146, 1954.
- [15] N.Cohn, " Some Aspects of Tie-Line Bias Control on Interconnected Power Systems " , AIEE Transactions, pp. 1415-1436,1957.
- [16] N.Cohn, " Considerations in the Regulation of Interconnected Areas " , IEEE Transactions on PAS, pp. 1527-1538,1967.

- [17] G.J.Berg and A.K.Kar, " Model Representation of Power System Loads " , Proceedings of the PICA Conference, pp. 153-162, 1971.
- [18] G.J.Berg, " Power System Load Representation " , IEE Proceedings, vol. 120, n° 3, pp. 344-348, 1973.
- [19] C.Concordia and S.Ihara, " Load Representation in Power System Stability Studies " , IEEE Transactions on PAS, vol. 101, n° 4, pp. 969-977, 1982.
- [20] IEEE Task Force, " Load Representation for Dynamic Performance Analysis " , IEEE Transactions on PAS, vol. 8, n° 2, pp. 472-482, 1993.
- [21] M.Oliveira Sobrinho e P.P.Carvalho Mendes, " Considerações Sobre a Influência da Variação da Frequência no Comportamento da Carga dos Sistemas Elétricos de Potência " , VI Seminário de Pesquisa da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1992.
- [22] " Manual de Uso do Programa TUTSIM " , versão 5.0, Twente University of Technology in The Netherlands, 1986.

DATA	19/01/1995
PROC.	
PED.	PPG
LIV.	
Cz\$	DOAÇÃO

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ  
8200773



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

FICHA 01 T.773  
E F E I / Biblioteca Mauá  
6.21.3.018:6.21.316(043.2)  
048i

OLIVEIRA SOBRINHO, M. de  
Influência da variação da frequência no comportamento da carga dos sistemas elétricos de potência.

Data da	N.º Registro	Data Dev.
18/01/95	Paulo R. Costa	18/01/95

**EFEI**

**BIBLIOTECA MAUÁ**

Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação em seu poder.