

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE
DE CARGA FREQUÊNCIA UTILIZADAS NA INDÚSTRIA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

FRANCISCO EDSON LOPES DA ROCHA

FLORIANÓPOLIS, JULHO - 1978

COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE CARGA-
-FREQUÊNCIA UTILIZADAS NA INDÚSTRIA

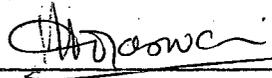
ii

FRANCISCO EDSON LOPES DA ROCHA

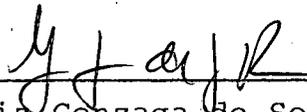
ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

" MESTRE EM ENGENHARIA "

ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

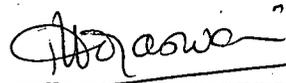


Prof. Rajamani Doraiswami, PhD
orientador

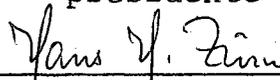


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, DSc
coordenador

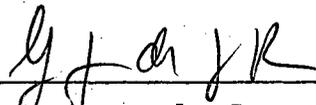
BANCA EXAMINADORA



Prof. Rajamani Doraiswami, PhD
presidente



Prof. Hans H. Zörn, PhD



Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, DSc



Prof. João Carlos Cascaes, MSc

À Dary e ao Junior

À meus pais

Agradecimentos

- À COPEL, na pessoa do Eng^o Juracy Rezende Castro Andrade, que permitiu fossem os trabalhos de datilografia, desenhos e cópias executados com recursos da empresa.
- Ao meu orientador, Prof. Rajamani Doraiswami, pelo carinho e compreensão demonstrados no nosso longo relacionamento e pelo suporte nunca negado.
- À CAPES, pelo patrocínio no período de obtenção de créditos.
- À minha esposa e meu filho, pela compreensão, carinho e apoio.
- Ao Eng^o Mozart Rocha Braga pela ajuda no desenvolvimento do programa de computador.
- À todos os meus colegas da COPEL, de cujo relacionamento retirei condições psicológicas que muito me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.
- À meus pais, sem os quais este trabalho jamais teria sido possível.

S U M Á R I O

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| GRÁFICOS E TABELAS | viii |
| DEFINIÇÃO DE TERMOS | 1 |
| DEFINIÇÃO DE SÍMBOLOS | 4 |
| RESUMO | 6 |
| ABSTRACT | 7 |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1- Conceitos Básicos | 11 |
| 1.2- Os elementos e Variáveis Pertinentes | 15 |
| 1.3- Oportunidades de simplificação | 16 |
| 1.4- Metodologia Utilizada | 19 |
| CAPÍTULO 2 - DESENVOLVIMENTO DE MODELOS | 22 |
| 2.1- O Sistema de Potência | 23 |
| 2.2- A Máquina Motriz e o Sistema de Suprimento de Energia | 32 |
| 2.2.1 - Turbinas a Vapor | 32 |
| 2.2.2 - Turbinas Hidráulicas | 34 |
| 2.3- Controle Primário de Carga-Frequência | 42 |
| 2.3.1 - O Regulador Estático | 44 |
| 2.3.2 - O Regulador Estático com Compensa- ção de Queda de Velocidade | 48 |
| CAPÍTULO 3 - RESPOSTA DO REGULADOR DE VELOCIDADE E FOR- MAÇÃO DOS SINAIS DE REGULAÇÃO SUPLEMENTAR.. | 52 |
| 3.1- A Resposta do Regulador de Velocidade- Área Isolada | 52 |
| 3.2- Resposta do Regulador de Velocidade - Área Interligadas | 55 |
| 3.3- Objetivos da Regulação Suplementar | 59 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTULO 4 - CASOS SIMULADOS | 70 |
| 4.1- Determinação das Equações de Estado | 70 |
| 4.2- Considerações sobre o Programa de Computador | 74 |
| 4.3- Casos Simulados | 75 |
| 4.4- Discussão dos Resultados | 77 |
| 4.4.1 - Caso 1 | 79 |
| 4.4.2 - Caso 2 | 80 |
| 4.4.3 - Caso 3 | 81 |
| 4.4.4 - Caso 4 | 81 |
| 4.4.5 - Caso 5 | 83 |
| 4.4.6 - Caso 6 | 83 |
| CONCLUSÕES | 84 |
| SUGESTÕES | 86 |
| CAPÍTULO 5 - IMPLEMENTAÇÃO | 88 |
| 5.1- A Realidade Brasileira Hoje | 89 |
| 5.2- A Necessidade de Operação Automática | 89 |
| 5.3- Um Caso Real | 92 |
| BIBLIOGRAFIA | 103 |
| APÊNDICE 1 - ALGORÍTMO DE INTEGRAÇÃO FACE | 107 |
| APÊNDICE 2 - VALORES USADOS NO PROGRAMA E DEFINIÇÕES DE VARIÁVEIS USADAS NO PROGRAMA | 110 |
| APÊNDICE 3 - PROGRAMA USADO NA SIMULAÇÃO | 113 |
| APÊNDICE 4 - RESULTADOS | 124 |

GRÁFICOS E TABELAS

FIGURAS:

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 - Elementos e Variáveis de Interesse em Estudo de Dinâmica | 17 |
| 2 - Modelo do Sistema para Estudo da Dinâmica de Geração | 19 |
| 3 - Modelo do Sistema de Potência para Estudo de Controle | 23 |
| 4 - Representação Simplificada de Duas Áreas de Controle | 28 |
| 5 - Secção da Curva Potência-Ângulo para Duas Áreas | 30 |
| 6 - Diagrama de Blocos do Sistema de Potência... | 31 |
| 7 - Diagrama de Blocos de uma Turbina Térmica... | 34 |
| 8 - Turbina Hidráulica-Conduto Forçado Curto.... | 35 |
| 9 - Resposta da Turbina Hidráulica a uma Variação em ΔPV | 38 |
| 10 - Diagrama de Blocos de uma Turbina Hidráulica.. | 39 |
| 11 - Sistema de Potência - Turbina Térmica | 40 |
| 12 - Sistema de Potência - Turbina Hidráulica.... | 41 |
| 13 - Regulador de velocidade Estático..... | 44 |
| 14 - Diagrama de Blocos para o Regulador estático | 47 |
| 15 - Regulador Estático com Compensação de Queda de Velocidade | 49 |
| 16 - Regulador com Compensação de Queda de Velocidade | 51 |
| 17 - Sistemas com Diferentes Tipos de Reguladores e Turbinas | 53 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 18 - Diagrama Simplificado de um Sistema de Potência | 54 |
| 19 - Resposta da Regulação Natural para diferentes Tipos de Máquina Motriz..... | 56 |
| 20 - Duas Áreas Interligadas | 57 |
| 21 - Esquema de Controle Integral- Diagrama de Blocos | 64 |
| 22 - Sistema de Potência Composto de Duas Áreas | 65 |
| 23 - Diagrama de Bloco em Malha Aberta | 71 |
| 24 - Malha Fechada Representativa da Malha Aberta | 71 |
| 25 - Sistema de Potência em Duas Áreas (Turbinas Térmicas) | 72 |
| 26 - Representação do Sistema de Potência em Malha Aberta | 73 |
| 27 - Simulação de Controle de Geração (SCGER) Fluxograma Geral | 76 |
| 28 - Concepção do Sistema Nacional para fins de Operação | 90 |
| 29 - Cálculo de ECU-Fluxo de Dados para três Unidades em Controle Automático | 93 |
| 30 - Filtro não Linear para o ECA | 95 |
| 31 - Decisões Lógicas do Controlador de unidades | 97 |
| 32A- Possibilidades de Comando | 99 |
| 32B- Ação Final em Cima da Unidade Geradora. | 101 |
| 33 - Visão geral do software para CAG | 102 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 34 - Relações no Domínio do tempo ilustrando a Resposta do Integrador FACE | 108 |
| 35 - Diagrama de Blocos do Integrador FACE.. | 109 |
| 36 - Resposta do Sistema à Combinação CCPF-CCFP..... | 125 |
| 37 - Resposta do Sistema à Combinação CCPF-CPI | 126 |
| 38 - Resposta do Sistema à Combinação CCPF-CPF | 127 |
| 39 - Resposta do Sistema à Combinação CPI-CPF | 128 |
| 40 - Resposta do Sistema à Combinação CPI-CPI | 129 |
| 41 - Resposta do Sistema à Combinação CPF-CPF | 130 |

DEFINIÇÃO DE TERMOS

- SISTEMA DE POTÊNCIA:

Define-se neste trabalho como Sistema de Potência o conjunto de uma ou mais estações geradoras e/ou linhas de transmissão operadas sob gerenciamento ou supervisão comum para alimentar cargas.

- ÁREA, ÁREA DE CONTROLE OU ÁREA SOB CONTROLE:

É um sistema de potência, uma parte de um sistema de potência ou uma combinação de sistemas aos quais é aplicado um esquema comum de controle de geração.

- INTERLIGAÇÃO :

Ligação entre dois ou mais sistemas de potência.

- SISTEMA INTERLIGADO:

Dois ou mais sistemas individuais operando normalmente com linhas de transmissão interligando-os.

- INTERCÂMBIO:

Troca de potência e/ou energia entre dois ou mais sistemas.

- INTERCÂMBIO LÍQUIDO:

É a soma algébrica dos fluxos de potência e/ou energia nas interligações da área.

- INTERCÂMBIO LÍQUIDO PROGRAMADO:

É a soma algébrica dos fluxos de potência programados nas interligações e, pré-estabelecidos de comum acordo.

- DESVIO DE INTERCÂMBIO LÍQUIDO

É a diferença entre o intercâmbio líquido e o intercâmbio líquido programado.

- FREQUÊNCIA DO SISTEMA:

É o número de ciclos por segundo da tensão alternada do sistema.

- FREQUÊNCIA OU VELOCIDADE NOMINAL:

É a frequência (ou velocidade) para a qual é projetado o equipamento de geração do sistema.

- FREQUÊNCIA PROGRAMADA:

É a frequência pré-estabelecida de comum acordo que se procura manter no sistema interligado.

- DESVIO DE FREQUÊNCIA:

É a diferença entre a frequência do sistema e a frequência programada.

- CARACTERÍSTICA DE CARGA-FREQUÊNCIA:

É a curva representativa da variação da carga conectada a uma área em função da variação da frequência.

- ESTATISMO:

É a variação de frequência (ou velocidade) experimentada por uma unidade geradora, expressa em por cento da frequência (ou velocidade) nominal, quando a potência de saída da turbina é gradualmente reduzida desde seu valor nominal até a vazio, mantendo-se inalterados todos os ajustes do regulador de velocidade.

- REGULAÇÃO:

É a ação voluntária que modifica o valor de determinada grandeza, com a finalidade de mantê-la em um valor pré-determinado.

- REGULAÇÃO PRIMÁRIA OU NATURAL:

É a regulação exercida pelo regulador de velocidade em resposta às variações de frequência no sistema.

- REGULAÇÃO OU CONTROLE SUPLEMENTAR OU CONTROLE DE CARGA- FREQUÊNCIA:

É a ação de controle aplicada manual ou automaticamente aos reguladores de velocidade dos geradores de uma área em resposta aos desvios ocorridos na frequência do sistema, no fluxo de potência das interligações, ou numa relação destes fatores de forma a manter a frequência programada e/ou o intercâmbio líquido programado.

- ERRO DE CONTROLE DE ÁREA (ECA):

É a grandeza que define um excesso ou deficiência de geração na área e que deve ser anulado, manual ou automaticamente, através da atuação do controle suplementar.

- CONTROLE PLANO DE FREQUÊNCIA:

É a modalidade de Controle Suplementar no qual o ECA é igual ao desvio de frequência.

- CONTROLE PLANO DE INTERLIGAÇÃO:

É a modalidade de Controle Suplementar no qual o ECA é igual ao desvio de intercâmbio líquido.

- CONTROLE DE CARGA-FREQUÊNCIA PONDERADO:

É a modalidade de Controle Suplementar no qual o ECA é igual ao desvio de intercâmbio líquido somado ao desvio de frequência multiplicado pela constante B da área.

DEFINIÇÃO DE SÍMBOLOS

$A_i, i = 1, 2, \dots, j, \dots, n =$ Áreas de Controle

$P_{Gi} =$ potência mecânica produzida na área i

$\Delta P_{Gi} =$ variação incremental em P_{Gi}

$P_{Gi}(s) =$ transformada de Laplace de P_{Gi}

$\Delta P_{Gi}(s) =$ transformada de Laplace de ΔP_{Gi}

$E_{Ci} =$ energia cinética armazenada na área i

$P_{Di} =$ carga conectada a área i

$\Delta P_{Di} =$ variação incremental em P_{Di}

$P_{Di}(s) =$ transformada de Laplace de P_{Di}

$\Delta P_{Di}(s) =$ transformada de Laplace de ΔP_{Di}

$f_i =$ frequência do sistema

$\Delta f_i =$ variação incremental em f_i

$F_i(s) =$ transformada de f_i

$\Delta F_i(s) =$ transformada de Laplace de Δf_i

$\omega_i = 2\pi f_i =$ velocidade em rad/seg da área i

$\Delta \omega_i = 2\pi \Delta f_i =$ variação incremental em ω_i

$I_i =$ momento de inércia da área i

$H_i =$ constante de inércia da área i

$D_i =$ amortecimento de carga conectada a área i

$P_{TL,ij} =$ fluxo de potência da área i para área j

$\Delta P_{TL,ij} =$ variação incremental em $P_{TL,ij}$

$P_{TL,ij}(s) =$ transformada de Laplace de $P_{TL,ij}$

$\Delta P_{TL,ij}(s) =$ transformada de Laplace de $\Delta P_{TL,ij}$

$P_{TL,i} =$ intercâmbio líquido da área i

$\Delta P_{TL,i} =$ variação incremental em $P_{TL,i}$

$P_{TL,i}(s) =$ transformada de Laplace de $P_{TL,i}$

$\Delta P_{TL,i}(s) =$ transformada de Laplace de $\Delta P_{TL,i}$

δ_i = ângulo de potência no barramento da área i

E_i = tensão interna da máquina equivalente da área i

T_{ij} = coeficiente de torque sincronizante entre as áreas i e j

K_{pi} = ganho da área i

T_{pi} = constante de tempo da área i

T_t = constante de tempo de turbinas a vapor sem reaquecimento

T_g = constante de tempo de regulador de velocidade

T_w = constante de tempo de água em tubulações forçadas de turbinas hidráulicas.

P_v = posição da válvula de admissão de turbinas

ΔP_v = variação incremental em P_v

$P_v(s)$ = transformada de Laplace de P_v

$\Delta P_v(s)$ = transformada de Laplace de ΔP_v

T_r = constante de tempo de amortecimento de regulador de velocidade

R = estatismo estático

r = estatismo transitório

B_i = constante de ponderação da área i (bias setting)

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de comparar as diferentes filosofias de controle suplementar presentemente usadas na operação de sistemas de potências modernos, sendo a comparação feita através de simulação digital.

De maneira a desenvolver a compreensão do problema, estabeleceu-se uma ordem lógica de eventos para o desenvolvimento do trabalho. Deste modo, primeiramente identificou-se a área de dinâmica dos Sistemas de Potência onde o problema se enquadra, determinaram-se os requisitos mínimos de modelo visando a análise de controle e deduziram-se as equações para os modelos apropriados. A seguir estabeleceram-se os objetivos da regulação suplementar, bem como deduziram-se as equações para atender tais objetivos. Finalmente as equações de estado foram integradas e os resultados obtidos plotados em impressora de linha comum, usando uma subrotina especialmente desenvolvida para tal.

A interpretação dos resultados mostra as reações do Sistema de Potência à cada uma das modalidades de controle suplementar e quão efetivas são as mesmas do ponto de vista de tempo de resposta, suavidade e não interação entre as áreas.

Com a finalidade de mostrar a aplicação dos resultados obtidos na simulação e ilustrar em pormenores o procedimento adotado na prática no desenvolvimento de um esquema de controle automático a ser aplicado em um sistema real, apresenta-se, ao final, o esquema de Controle Automático de Geração em implementação no Sistema COPEL.

ABSTRACT

This work has been developed to compare the different supplementary control strategies now in use in modern Power Systems operation, by means of digital simulation.

A logical way was set up for the presentation in order to parallel the modelling procedure and the problem comprehension. In this way, supplementary control dynamic aspects and minimum modelling requirements, as far as control analysis and Power System elements are concerned, were identified and the set of pertinent equations determined as well. Supplementary control objectives follow, along with their mathematical representation. Finally the state equations were integrated and the results plotted in a line printer through a special subroutine.

The answer shows the Power System reaction under each supplementary control strategy combination and how effective they are as far as time response, smoothness and noninteraction are concerned.

To show up how to apply the results of the simulation and to illustrate the procedure in the real life, an actual system control strategy, now being implemented, is shown.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Está amplamente demonstrado na literatura que o problema de controle suplementar é, hoje, pura e simplesmente um problema de engenharia ^{1,4,5,6,9,12,13,14,15,16,22,24,25,26,31,32}, e como tal o mesmo permite diversas abordagens. A solução, em geral, exige criatividade, o que a aproxima de uma arte. Assim sugerem-se abordagens não convencionais que incluam aspectos de otimização dos parâmetros do controlador e da estratégia de controle ^{1,15,17,31}, mostram-se efeitos dos parâmetros elétricos do sistema na solução do problema ^{11,17}, sugere-se a introdução de estudos de sensibilidade na otimização ¹⁶, e, mais modernamente, chega-se à conclusão que é necessário não só otimizar a estratégia de controle a ser aplicada como também incluir aspectos de estabilidade do sistema de potência ³¹.

O advento da moderna tecnologia de controle digital trouxe consigo a possibilidade de implementação de um alto grau de sofisticação na lógica de controle, permitindo, portanto, programar no computador algoritmos em quase qualquer grau de complexidade. Ainda assim, preferiu-se a abordagem convencional aliada aos aspectos econômicos do problema, não porém, sem apoderar-se de um número elevado de subsídios advindos de abordagens ditas não convencionais ^{5,6,9,10,12,13,14,22,32}. O que se nota, na verdade, é a existência de um certo conservadorismo, produto de uma diferença filosófica, que existe entre a universidade e a indústria. É a diferença entre o melhor e o possível. Se não, vejamos.

A experiência ensina que o campo da engenharia recebe (ou pode receber) dois enfoques técnicos filosoficamente diferentes: um no campo acadêmico e outro no campo dito prático. Enquanto o meio acadêmico quase sempre fornece as condições ambientais propícias à pesquisa da melhor solução técnica, o campo prático quase nunca deixa alternativas (ou tempo) para que se encontre a não ser uma solução possível. Daí o uso em larga escala da técnica de "load-flow" no planejamento de operação. Porém, um fato novo começa a acontecer no Brasil: o uso em escala moderada de equipamentos automáticos para tomadas de decisões relativas a operação do sistema, em tempo-real*. Isto de modo algum quer dizer que o load-flow perdeu sua importância. Ele pode (e deve) ser usado para estimativas a longo e/ou médio prazo. Porém para decisões de operação a solução deverá estar gravada na memória do computador utilizado para controle do processo e o load-flow se por acaso existir deverá ser executado on-line.

Esta tese, embora com finalidade acadêmica, tem muito da experiência prática do autor, pois o assunto em questão é parte do seu dia-a-dia na Empresa e ele tenta, portanto, pelo menos do ponto de vista pessoal, cobrir o "gap" entre o pensamento filosófico a respeito do assunto e a aplicabilidade prática do mesmo.

* Diz-se que um sistema de controle automático opera em tempo-real quando ele é rápido o suficiente para adquirir dados em um processo qualquer, analisar estes dados e executar a ação do controle pertinente a tempo de corrigir a trajetória de estado deste sistema.

Os objetivos deste trabalho são: produzir as curvas representativas do comportamento dinâmico de um Sistema de Potência quando submetido à cada uma das filosofias de controle suplementar presentemente usadas na indústria da produção de potência elétrica; interpretar estes resultados à luz das técnicas de controle moderno de uma forma bastante afeiçoada àquelas pessoas familiarizadas com a operação de sistemas de energia elétrica; mostrar aspectos do sistema nacional de transmissão do ponto de vista de operação automatizada e finalmente apresentar um caso real com a finalidade de ilustrar o procedimento em pormenores e indicar claramente onde se utiliza os resultados obtidos na simulação.

O trabalho é composto de cinco (5) Capítulos e quatro (4) Apêndices.

No Capítulo 1, além das generalidades eventualmente assumidas através do texto se procura criar condições que facilitem ao leitor a identificação da área de dinâmica de sistemas em que o problema a resolver se enquadra, condições para identificação dos elementos e variáveis de interesse, bem como algum contato com a metodologia a ser utilizada. O Capítulo 2 será totalmente dedicado a determinação dos modelos do Sistema de Potência, do Sistema Motriz e do Sistema de Controle Primário. Já no Capítulo 3 serão investigadas as respostas dinâmicas do Controle Primário para áreas isoladas e interligadas e a formação dos sinais de regulação suplementar. O Capítulo 4 apresenta uma miscelânea de assuntos gerais que vão desde a técnica utilizada para transformar as equações operacionais desenvolvidas no domínio da frequência complexa s para o modelo do Sistema de Potência em equações de estado, passam por considerações sobre o progra-

ma utilizado na simulação e terminaram com a discussão dos resultados obtidos e conclusões. Finalmente o Capítulo 5 apresenta a implementação de um caso real de operação automatizada através de computadores digitais.

O Apêndice 1 descreve as características básicas do método de integração numérica conhecido por FACE. Os Apêndices 2 e 3 apresentam a descrição das variáveis e respectivos valores usados no programa de computação e listagem do mesmo, respectivamente. Finalmente o Apêndice 4 mostra as curvas obtidas nos vários casos rodados.

1.1 - CONCEITOS BÁSICOS

Para um entendimento funcional razoável do problema que se procura resolver nesta tese e para clarear um pouco a função daqueles equipamentos automáticos referidos antes, algumas palavras são necessárias a respeito da operação de um sistema de potência bem como de seus objetivos.

A finalidade básica de um Sistema de Potência qualquer é fornecer energia elétrica continuamente para a carga total conectada em sua área de concessão. Isto simplesmente significa que a produção de potência deve ser igual a demanda a cada segundo.

As leis da estatística, com uma boa dose de ajuda do engenheiro de potência, auxiliam a dectar de modo bastante aproximado ao nível de transmissão, como a carga de um Sistema varia com o tempo*. Porém, como os resultados de uma previsão de carga nunca são exatos, a operação do sistema acaba se transformando numa "caçada" com a geração perseguindo a demanda sempre variante. Este é

* Entende-se por nível de transmissão aquele em que a tensão é maior ou igual a 69 kV.

talvez, um dos únicos processos de compra e venda em que as leis econômicas de demanda e oferta não funcionam.

Esta sempre presente diferença entre demanda e geração altera o comportamento da frequência do sistema. A compreensão deste fato é simples a partir do entendimento do delicado mecanismo que controla o balanço torque-potência dentro de cada unidade geradora ligada ao sistema de energia elétrica. O mecanismo referido acima age sempre no sentido de prover o gerador com a quantidade de potência mecânica suficiente para que o mesmo possa manter a saída de potência elétrica que lhe está sendo solicitada. Sendo tais dispositivos, em sua grande maioria, do tipo eletro-hidráulico e portanto com constantes de tempo de certa forma elevadas, é aparente que eles são incapazes de modificar a entrada de potência mecânica para o gerador a tempo de acompanhar a variação de potência elétrica. Em outras palavras isto quer dizer que o gerador reconhece uma alteração na demanda de potência muito mais rápido que o mecanismo que lhe fornece potência mecânica. Como, inicialmente, esta variação de demanda é sempre atendida, aparentemente a situação se torna paradoxal, pois a produção não aumenta (ou diminui) instantaneamente. A conclusão mais lógica é assumir que esta variação de potência é atendida às custas de um "empréstimo". É bastante ilustrativo verificar de onde o sistema toma emprestado este valor de potência (assumindo, por exemplo, que a demanda neste instante é maior que a produção de potência).

As quatro condições necessárias para sincronizar um gerador num Sistema de Potência, entre outras coisas, significam que o gerador deve ter uma certa quantidade de energia cinética armazenada antes que o mesmo possa ser sincronizado. Qualquer que seja a condição de carga do gerador esta energia cinética deve ser con-

servada em seu interior pois é ela quem garante que a máquina permanecerá sincronizada ao Sistema. Como o interior dos geradores é o único lugar no sistema onde existe energia útil armazenada, é evidente, que o "empréstimo" referido acima só poderá vir daí, inicialmente. Assim, tão logo o gerador sente o acréscimo na demanda, ele retira uma parcela de sua energia cinética para emprestar ao Sistema. A taxa de variação em que este desarmazenamento de energia ocorre é, obviamente, igual ao acréscimo na demanda de potência. Assumindo que este fato ocorre no interior de um gerador de capacidade elevada e desde que o mesmo está sincronizado ao sistema, a frequência real começa a se desviar da programada com uma certa velocidade. A presença desta taxa de variação na frequência dispara o mecanismo que controla o balanço torque-potência no interior do gerador e mais potência ativa começa a ser produzida com a entrada de mais potência mecânica no eixo do gerador.

Por outro lado, a carga conectada ao sistema é, também, sensível a esta taxa de variação na frequência, qualquer que seja o seu tipo *. Esta dependência é conhecida na literatura técnica como Característica de Carga-Frequência da Área. Em palavras simples tal característica representa nada mais, nada menos, que a velocidade de variação da carga com a frequência. Como no caso em questão a frequência está caindo, a carga então começará a se desviar para baixo do seu estado inicial com uma certa velocidade. Desde que a presença em cena desta potência "liberada" pela carga significa que menos potência precisa ser produzida, se pode considerar que ela representa efetivamente uma contribuição direta para o

* Para definição dos vários tipos de carga, ver Capítulo III da referência 1.

acréscimo de potência que provocou toda a cadeia de eventos¹.

Os dois últimos fatos abordados sugerem tacitamente que a energia cinética do sistema será consumida em uma taxa decrescente, pois eventualmente (teoricamente após um tempo infinito) a potência adicional produzida somada àquela liberada pela carga estabilizarão a frequência em um valor qualquer diferente daquele inicial. Este é o segundo efeito na frequência provocado por um desequilíbrio entre carga e geração: o aparecimento de um erro estático. Mister-se faz corrigir este erro estático, pois afinal de contas, a presença do mesmo não é saudável, nem para a carga e nem para o Sistema.

A análise qualitativa recém descrita é realística em todos os aspectos para um Sistema isolado, porém para um sistema interligado teria ainda a considerar o problema das interligações, onde antes da ocorrência do desequilíbrio estaria fluindo a potência contratada entre as partes interessadas.

O mecanismo que controla o balanço torque-potência no interior do gerador é o regulador de velocidade. Como já foi enfatizado antes, este mecanismo é sensível à taxa de variação da frequência e desde que este sinal é comum ao sistema inteiro, é impossível para um regulador, qualquer que seja a sua posição no Sistema Interligado, discriminar a origem do problema. Resultado: num sistema interligado, juntamente com o desvio estático na frequência, aparece sempre um desvio estático no fluxo de potência programado para as interligações, geralmente conhecido por desvio de intercâmbio.

A tarefa básica de qualquer sistema de controle suplementar quer, ele seja implementado de forma manual ou automática, usando aqueles equipamentos já referidos, é corrigir um destes dois

desvios estáticos ou os dois ao mesmo tempo, dependendo da filosofia de controle suplementar adotada, atuando no motor de sincronização do regulador de velocidade. A pergunta oportuna para o momento seria: uma vez restaurada a frequência para seu valor original, a energia cinética do Sistema voltaria também ao seu valor inicial? A resposta dificilmente poderia ser afirmativa. A prova deste fato é bastante simples, porém ela está intimamente relacionada ao comportamento do sistema de controle suplementar e será deixada para mais tarde.

1.2 - OS ELEMENTOS E VARIÁVEIS PERTINENTES

Funcionalmente, todo Sistema de Potência, independente de seu tamanho físico, pode ser dividido em três (3) partes distintas, que são:

1. O sistema motriz
2. A máquina elétrica e sua excitação
3. O sistema de controle de geração

Embora a dinâmica dos Sistemas de Potência seja um assunto complexo e de dimensão elevada, a divisão funcional detectada antes permite sempre classificar os efeitos dinâmicos em uma destas três (3) áreas de estudo:

- I. Dinâmica do sistema motriz
- II. Dinâmica das máquinas e respectivo controle de excitação
- III. Dinâmica de geração.

A dinâmica do sistema motriz estuda os fenômenos associados ao controle e à resposta das variáveis da máquina motriz, tais como potência de eixo de turbinas, pressões de caldeiras, temperaturas e fluxos.

A área de dinâmica das máquinas elétricas e controle de excitação envolve o estudo de condições elétricas da rede de transmissão e o comportamento do fluxo de potência, tensões, correntes ... etc, considerando-os afetados por transitórios eletromecânicos que aparecem entre as máquinas devido a desequilíbrios momentâneos entre as potências elétrica e mecânica produzidas. Estes desequilíbrios momentâneos, causam acelerações ou desacelerações dos rotores das máquinas elétricas cujas consequências são oscilações nos respectivos ângulos de potência. O estudo destes fenômenos pertence ao campo da Estabilidade dos Sistemas de Potência.

Finalmente, a dinâmica de geração diz respeito ao comportamento do sistema de potência como um todo em relação a frequência e/ou ao fluxo de potência nas linhas de interligação entre diferentes sistemas e/ou áreas de controle.

Um problema bastante sério no estudo da dinâmica dos sistemas de potência é a escolha de um modelo que represente adequadamente o sistema para o estudo em questão.

A Fig. 1 mostra os elementos (blocos de funções) e as variáveis de interesse para os estudos de dinâmica. Devido a presença de sinais de realimentação é necessário que a solução de problemas de dinâmica, em qualquer uma das três (3) áreas citadas, envolvam representações globais.

1.3 - OPORTUNIDADES DE SIMPLIFICAÇÃO

Embora a necessidade de representações globais seja aparente, felizmente, entretanto, é raro a ocorrência de um fenômeno que exija uma representação detalhada e simultânea de funções em todas as três (3) áreas de estudo, e, dependendo do fenômeno particular de interesse várias simplificações podem ser feitas no mo-

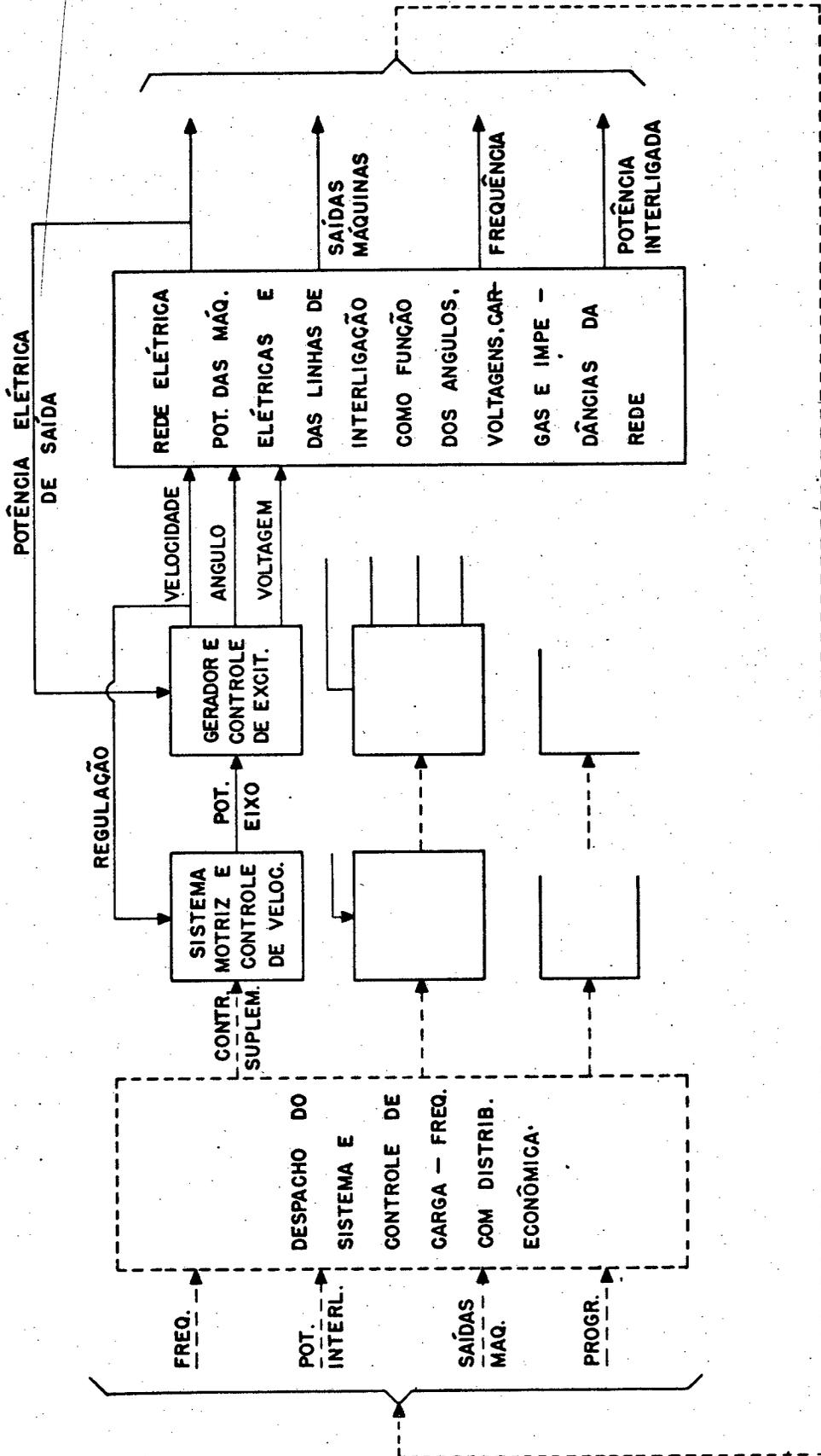


FIG.1 - ELEMENTOS E VARIÁVEIS DE INTERESSE EM ESTUDOS DE DINÂMICA

delo para representar os fenômenos menos importantes⁶. Então a necessidade básica é uma representação global, porém detalhada apenas no que diz respeito às variáveis de interesse e não uma representação que considere no mesmo nível de detalhes tanto os efeitos relevantes quanto os irrelevantes. Além disso existem ainda dois fatores que motivam bastante a adoção de modelos simplificados na solução dos problemas de dinâmica. O primeiro é a redução do custo computacional e o segundo, muito mais importante que o primeiro, é a limitação da capacidade de coleta e interpretação de dados.

A redução no custo computacional é uma imposição de ordem econômica e pode ser facilmente contornável, porém a limitação na capacidade de coletar e interpretar dados se refere a uma limitação do cérebro humano em absorver resultados e realimentá-los corretamente no processo e portanto mais difícil de ser ultrapassada.

As oportunidades de simplificação nos modelos surgem de três (3) maneiras distintas, que são:

1. Duração dos efeitos e resolução no tempo durante o qual os mesmos são significativos.
2. Faixa de variação das variáveis.
3. Número de elementos de um tipo que precisa ser representado.

Quando se investiga fenômenos de estabilidade transitória, por exemplo, cuja duração é de um (1) a dois (2) segundos, é completamente irrelevante representar transitórios de caldeiras que se desenvolvem por vários minutos. Esta é uma simplificação quanto à duração de um fenômeno. Por outro lado no estudo de transitórios, a adoção de velocidade constante nas equações de tensão gerada e frequência constante para os parâmetros de impedância,

é perfeitamente justificável se os desvios de frequência forem pequenos. Quanto ao número de elementos o exemplo mais popular de simplificação que existe é o de uma máquina ligada à barra infinita, que permite a solução de uma quantidade surpreendente de problemas de muitas máquinas.

1.4 - METODOLOGIA UTILIZADA

Um aspecto importante da dinâmica dos Sistemas de Potência, que é o ponto básico para este trabalho, diz respeito ao estudo da dinâmica e controle de geração conhecido como Controle Complementar, Controle Suplementar, Controle de Carga-Frequência, ou ainda Controle Automático de Geração²⁷. A compreensão desta área envolve dois aspectos fundamentais, sendo o primeiro deles a hierarquia de atuação desta modalidade de controle e o segundo a descrição dos elementos básicos do sistema de potência em termos de modelos matemáticos simplificados, devendo estes modelos refletir adequadamente o comportamento do sistema objetivando a análise de controle. A Fig. 2 mostra os elementos e as variáveis de interesse para esta área de estudos.

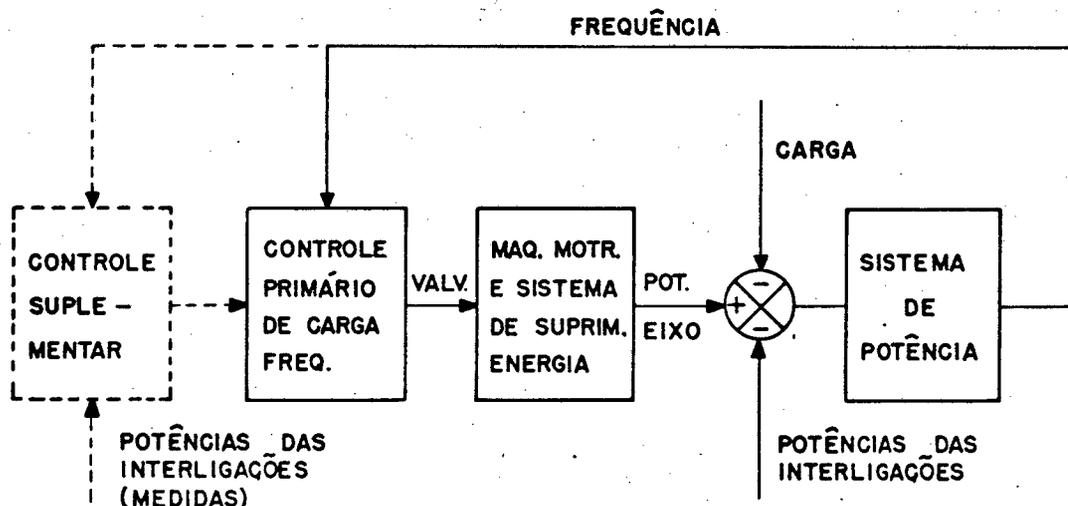


FIG. 2 - MODELO DO SISTEMA PARA ESTUDO DA DINÂMICA DE GERAÇÃO

Na FIG. 2 as linhas tracejadas indicam que a função Controle Suplementar é de hierarquia temporal inferior ao Controle Primário. Embora esta afirmação seja aparentemente infundada a esta altura do trabalho, ela se tornará cristalina a partir do Capítulo III.

De uma forma sintetizada (e elegante) se poderia dizer que a FIG. 2 apresenta, na verdade, a quantidade mínima de informações necessárias para investigação do comportamento dinâmico do Sistema sob a ação de uma dada filosofia de Controle Suplementar.

Embora o ponto final do trabalho seja a investigação deste comportamento dinâmico, sob a forma de simulação digital, para cada uma das filosofias de controle suplementar presentemente adotadas, a tarefa primeira que se impõe é modelar convenientemente para o estudo cada um dos elementos mostrados na FIG 2. Existem diferentes maneiras de determinar estes modelos, porém será aqui adotada uma que se afigura a mais lógica porque concorrentemente com o desenvolvimento dos modelos é também desenvolvida a compreensão do processo^{1,3,6,11}. Nesta ordem de idéias serão então modelados o Sistema de Potência, o Sistema Motriz Primário, o Sistema de Controle Primário (o regulador de velocidade) e os Controles Suplementares.

Além dos elementos, A FIG 2 mostra ainda as variáveis de interesse. Estas variáveis, definidas tacitamente como dependentes e independentes, serão utilizadas na determinação das funções de transferência representativas dos elementos, de uma maneira bastante simples. Por exemplo, para o Sistema de Potência as variáveis independentes são a potência de eixo e a carga ligada e o modelo a ser desenvolvido deve descrever as reações da frequência e potência nas interligações às variações destas variáveis inde-

pendentes. De modo semelhante para o Sistema Motriz Primário, a variável independente é a posição da válvula da turbina e o modelo deve determinar a potência do eixo, e assim por diante.

Capítulo 2

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS

O resultado de um problema de Controle Suplementar deve refletir o esforço conjunto de todas as unidades geradoras controladas dentro de uma determinada Área e, usualmente, os limites físicos das Áreas de Controle coincidem com aqueles dos Sistemas de Potência, embora isto não seja estritamente necessário devido à relatividade do conceito de Área *. Neste trabalho dito conceito será usado na sua expressão mais geral.

Há ainda a considerar o fato de, praticamente, inexistirem oscilações entre grupos de barras pertencentes a um mesmo Sistema de Potência, devido a velocidade considerável com que caminham as ondas de sincronização entre barras com conexões elétricas rígidas entre si^{1,3,4,5,11,12,13}. Baseado neste fato, o problema de Controle Suplementar considera apenas uma unidade equivalente em cada Área de Controle e no barramento desta unidade equivalente se conectam toda a carga e as linhas de interligação com outras Áreas. A FIG. 3 ilustra o procedimento.

* As instalações da ESCELSA (Espírito Santo Centrais Elétricas S/A), por exemplo, se encontram dentro da Área de Controle de FURNAS (FURNAS Centrais Elétricas S/A) no Sistema Interligado do Sudeste Brasileiro.

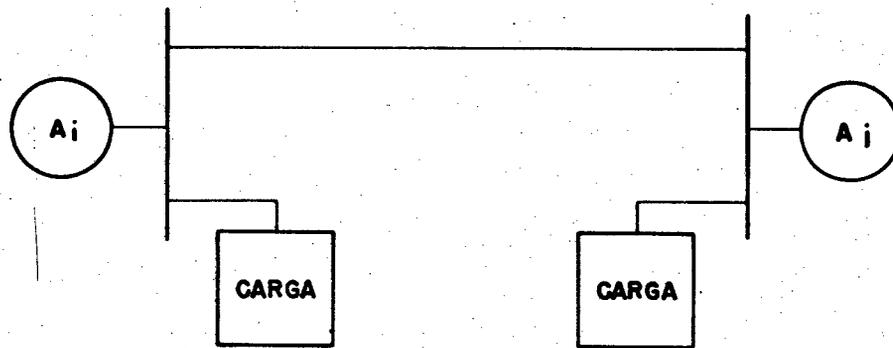


FIG.3 - MODELO DO SISTEMA DE POTÊNCIA PARA ESTUDO DE CONTROLE

Obviamente as linhas de interligação entre as Áreas de Controle devem ter características elétricas tais que permitam oscilações de frequência e/ou de potência entre as mesmas*.

2.1 - O SISTEMA DE POTÊNCIA

É bem conhecida a dificuldade, para não dizer impossibilidade, de se prever com exatidão a carga de um Sistema de Potência, quer em base anual, diária, horária ou em menores espaços de tempo. Em sendo assim, a tarefa maior que se impõe em um sistema de potência qualquer é corrigir instante-a-instante a sempre presente diferença entre a potência produzida e aquela consumida. Embora estas oscilações entre potências produzida e consumida sejam aleatórias em essência, será aqui assumido, para efeito de análise a-

* Infelizmente a expressão "linha de interligação", nesta situação, é má tradução da idéia expressa nos termos "tie-line".

penas, que elas aparecem num determinado instante como excesso de produção, embora a análise não fosse muito diferente se fosse assumido o oposto.

Considera-se o Sistema Interligado da FIG 3. Existem três (3) maneiras distintas para este sistema absorver um excesso de potência real que venha a ocorrer no interior da Área A_i , por exemplo:

- a. Aumentando a energia cinética EC_i desta Área, na taxa $\frac{d}{dt} (EC_i)$
- b. Aumentando o consumo de carga na Área
- c. Aumentando a exportação de potência ativa através das interligações.

Considerando que antes do desequilíbrio de potência ativa o sistema esteja funcionando em regime permanente, então a equação matemática que descreve a situação assumida é

$$\Delta PG_i - \Delta PD_i = \frac{d}{dt} (EC_i) + D_i \Delta f_i + \Delta PTL_i \text{ MW} \quad (1)$$

Cada termo do segundo membro desta equação tem um significado próprio para o sistema de potência e isto será agora discutido.

1. A energia cinética EC_i

A quantidade EC_i representa toda a energia cinética armazenada na parte girante da máquina equivalente da Área A_i , e portanto está associada a uma constante de inércia que represente globalmente a Área. Existem muitos modos de determinar esta constante de inércia ^{1,2,3}, porém é bastante representativo para o trabalho verificar o seu aparecimento a partir da computação de $\frac{d}{dt} (EC_i)$.

A energia cinética da parte em rotação da máquina equivalente da Área A_i é dada por

$$EC_i = \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \quad \text{MJ} \quad (2)$$

onde I_i é o momento de inércia desta máquina equivalente e ω_i a sua velocidade de rotação em radianos por segundo. Como a situação assumida é um excesso de geração na Área, então

$$\omega_i = \omega_0 + \Delta\omega_i \quad \text{rad/seg} \quad (3)$$

com ω_0 representando a velocidade nominal de rotação em rad/seg. Em vista da Eq. (3) a Eq (2) fica

$$EC_i = \frac{1}{2} I_i (\omega_0 + \Delta\omega_i)^2 \quad \text{MJ} \quad (4)$$

Desenvolvendo o quadrado binominal e desprezando as infinitésimos de segundo grau a Eq. (4) toma a seguinte forma

$$EC_i = \frac{1}{2} I_i \omega_0^2 + I_i \omega_0 2\pi \Delta f_i \quad \text{MJ} \quad (5)$$

A primeira parcela do segundo membro da Eq. (5) represente a energia cinética armazenada na parte girante da máquina da Área quando em rotação nominal e será doravante $EC_{i,0}$. Desta maneira

$$EC_i = EC_{i,0} + \frac{I_i \omega_0^2}{f_0} \Delta f_i \quad \text{MJ} \quad (6)$$

onde f_0 é a frequência nominal do sistema.

Finalmente

$$\frac{d}{dt} (EC_i) = \frac{2 \cdot EC_{i,0}}{f_0} \cdot \frac{d}{dt} (\Delta f_i) \quad \text{MW} \quad (7)$$

ou em valores por unidade

$$\frac{d}{dt} (EC_i) = \frac{2 \cdot EC_{i,0}}{P_{BASE} f_0} \frac{d}{dt} (\Delta f_i) \text{ p.u. MW} \quad (8)$$

Definindo a quantidade H_i como

$$H_i = \frac{EC_{i,0}}{P_{BASE}}$$

finalmente a Eq. (8) toma a forma

$$\frac{d}{dt} (EC_i) = \frac{2H_i}{f_0} \frac{d}{dt} (\Delta f_i) \text{ p.u. MW} \quad (9)$$

2. A quantidade $D_i \Delta f_i$

O fator D_i expressa a dependência da carga total conectada a Área A_i às variações de frequência no sistema interligado, em outras palavras este fator é o que conhece por Característica de Carga-Frequência^{1,3,14,17}. Na verdade este termo atua como fator de amortecimento, o que, aliás, é explicitamente sugerido na Eq. (1) e como tal seu valor é fortemente dependente da natureza da carga.

Assumindo que a carga conectada à Área A_i é do tipo composta típica e que o modelo de máquina é aquele de tensão constante atrás da reatância *, então

* O termo "Carga composta típica" é aqui empregado exatamente no mesmo sentido que aquele definido no Capítulo 3 da referência 1.

$$PD_i = PD_i (f_i, |V_i|) \text{ MW} \quad (10)$$

e por conseguinte

$$\Delta PD = \frac{\partial PD_i}{\partial f_i} \Delta f_i + \frac{\partial PD_i}{\partial |V_i|} \cdot \Delta |V_i| \text{ MW} \quad (11)$$

O termo D_i , de acordo com o que foi explicitado antes, é plenamente identificado pela derivada parcial da carga em relação à frequência.

Portanto

$$D_i = \frac{\partial PD_i}{\partial f_i} \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \quad (12)$$

Supondo que a característica Carga-Frequência da Área A_i é essencialmente linear, então

$$D_i = \frac{\partial PD_i}{\partial f_i} = \frac{PD_i}{f_i} \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \quad (13)$$

O valor da quantidade D_i pode ser computado em MW/Hz, p.u. MW/Hz ou simplesmente p.u. Neste trabalho será adotado p.u. MW/Hz porque os desvios de frequência esperados são bastantes pequenos e portanto Δf_i pode ser computado diretamente em Hz.

3. O termo ΔPTL_i

Este termo reflete o incremento total de potência real exportado da Área i e é igual a soma algébrica de todos os incrementos de fluxo de potência ativa nas linhas que interligam esta Área com as Áreas vizinhas, isto é

$$\Delta PTL_i = \sum_j \Delta PTL_{ij} \text{ MW} \quad (14)$$

Para computar cada $\Delta P_{TL,ij}$ é necessário uma análise mais profunda sobre a natureza do acompanhamento elétrico das Áreas. Em sendo assim, considere-se, por exemplo, as duas Áreas, i e j, mostradas na FIG. 4.

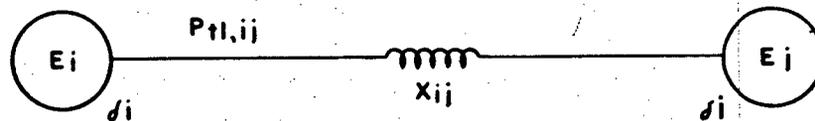


FIG. 4 - REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DE DUAS ÁREAS DE CONTROLE

Para simplicidade de raciocínio se considera que estas Áreas estão interligadas apenas pela reatância X_{ij} . A transferência de potência real da Área i para Área j, $P_{TL,ij}$, é dada por

$$P_{TL,ij} = \frac{E_i E_j}{X_{ij}} \sin \delta_{ij} \quad \text{MW} \quad (15)$$

onde

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad \text{rad} \quad (16)$$

é o ângulo de potência entre as barras das máquinas equivalentes de cada Área. Para uma pequena variação deste ângulo em torno do ponto de operação, considerando invariáveis as tensões internas, a Eq. (15) pode ser escrita como

$$\Delta P_{TL,ij} = \frac{\partial P_{TL,ij}}{\partial \delta_{ij}} \Delta \delta_{ij} \quad \text{MW} \quad (17)$$

ou seja

$$\Delta P_{TL,ij} = \frac{E_i E_j}{X_{ij}} \cos \delta_{ij} \Delta \delta_{ij} \quad \text{MW} \quad (18)$$

onde

$$\Delta \delta_{ij} = \Delta(\delta_i - \delta_j) \text{ rad} \quad (19)$$

O coeficiente $\frac{E_i E_j}{X_{ij}} \cos \delta_{ij}$, que pode ser visto na FIG. 5 como sendo a inclinação $\frac{\Delta P_{TL,ij}}{\Delta \delta_{ij}}$ da curva potencia-ângulo no ponto de operação, é denominado coeficiente de torque sincronizante entre as Áreas i e j, T_{ij} . Então

$$T_{ij} = \frac{E_i E_j}{X_{ij}} \cos \delta_{ij} \text{ MW/rad} \quad (20)$$

A variação angular $\Delta \delta_{ij}$, por sua vez, é obtida pela integração no tempo da variação instantânea de frequência entre as Áreas*. Desta maneira os dois fatores componentes do termo $\Delta P_{TL,ij}$ estão perfeitamente determinados.

* Evidentemente diferentes valores de desvio de frequência existirão apenas momentaneamente, pois em regime permanente Δf_i será igual a Δf_j , se as áreas permanecerem sincronizadas.

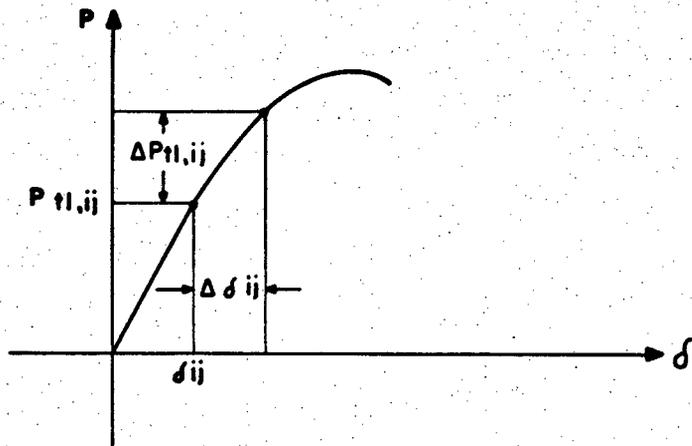


FIG.5 - SECÇÃO DA CURVA POTÊNCIA - ÂNGULO PARA DUAS ÁREAS

Em vista do exposto antes, a Eq. (18) se transforma em

$$\Delta P_{TL,ij} = 2\pi T_{ij} \int (\Delta f_i - \Delta f_j) dt \text{ MW} \quad (21)$$

e finalmente a Eq. (14) toma a seguinte forma

$$\Delta P_{TL,i} = 2\pi \sum_j T_{ij} \int (\Delta f_i - \Delta f_j) dt \text{ MW} \quad (22)$$

Com todos os P e D medidos em por unidade de P_{BASE} , a Eq. (1) será reescrita

$$\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Di} = \frac{2H_i}{f_0} \frac{d}{dt} (\Delta f_i) + D_i \Delta f_i + \Delta P_{TL,i} \text{ p.u MW} \quad (23)$$

Tomando a transformada de Laplace das Eqs. (22) e (23) segue que

$$\Delta P_{TL,i}(s) = \frac{2\pi}{s} \sum_j T_{ij} \{ \Delta F_i(s) - \Delta F_j(s) \} \quad (24)$$

$$\{ \Delta P_{Gi}(s) - \Delta P_{Di}(s) - \Delta P_{TL,i}(s) \} = \left\{ \frac{2H_i}{f_0} s + D_i \right\} \Delta F_i(s) \quad (25)$$

Rearranjando esta Eq. (25) e redefinindo alguns termos obtem-se

$$\{ \Delta P_{Gi}(s) - \Delta P_{Di}(s) - \Delta P_{TL,i}(s) \} \cdot \frac{K_{P,i}}{1 + sT_{P,i}} = \Delta F_i(s) \quad (26)$$

onde

$$T_{p,i} = \frac{2H_i}{f_0 \cdot D_i} \quad \text{segundos} \quad (27)$$

e

$$K_{p,i} = \frac{1}{D_i} \quad \text{Hz/p.u MW} \quad (28)$$

A FIG. 6 é o equivalente das Eqs. (24) e (26) em diagrama de blocos.

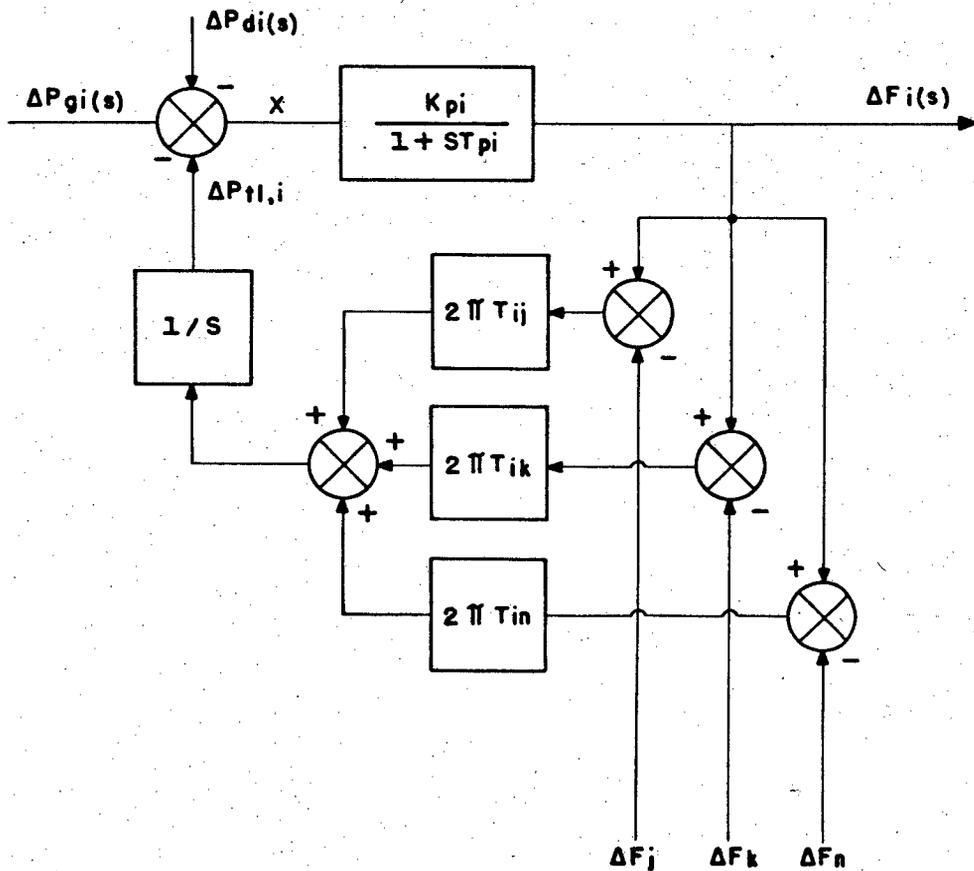


FIG. 6 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE POTÊNCIA

Via de regra é irrelevante na análise de Controle Suplementar a identificação do sinal de potência elétrica de saída da máquina equivalente de uma Área ou de cada máquina tomada individualmente. Porém, se necessário este sinal é facilmente obtido de um diagrama de blocos simples, como o da FIG. 6, da forma descrita a seguir.

O sinal X, no diagrama de blocos, representa na verdade um incremento na potência de aceleração da Área e ΔPG_i um incremento na potência mecânica. Como

$$\Delta PG_i - \Delta PE_i = X \text{ MW} \quad (29)$$

então

$$\Delta PE_i = \Delta PG_i - X \text{ MW} \quad (30)$$

com ΔPE_i representando incrementos de potência elétrica.

Se for necessário preservar a identidade da potência elétrica de saída de cada unidade geradora da Área, então cada máquina motriz deve ser representada individualmente^{4,5,6,11,12,13}.

2.2 - A MÁQUINA MOTRIZ E O SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA

Será descrito agora um outro elemento da malha da FIG. 2, precisamente o que relaciona a resposta de potência da máquina motriz às variações de posição da válvula de admissão da mesma.

Está evidentemente fora de escopo deste trabalho considerar em todos os detalhes o problema de modelos de turbinas, portanto será apresentada uma descrição simples e objetiva de apenas dois tipos de turbinas, uma a vapor e outra hidráulica.

2.2.1 - TURBINAS A VAPOR

A potência desenvolvida em uma turbina a vapor é propor-

cional ao fluxo de vapor da turbina^{1,5}, ou seja,

$$PG \propto \dot{m} (h_i - h_o) \quad (31)$$

onde

PG = potência mecânica produzida pela turbina

h_i = entalpia do vapor de entrada na turbina

h_o = entalpia do vapor de saída da turbina

\dot{m} = fluxo de vapor dentro da turbina

Visto que, em geral, h_i e h_o são quase constantes, a resposta de PG segue a do fluxo de vapor. Em turbinas sem reaquecimento, que será o caso discutido aqui, a resposta do fluxo de vapor a uma alteração na posição da válvula de admissão é quase instantânea, isto é, as constantes de tempo envolvidas são da ordem de 0.2 a 0.3 segundos^{1,9,11,25,30}. Supondo-se que a pressão do sistema de fornecimento de vapor permaneça essencialmente constante, então a resposta de potência da turbina a uma variação na posição da válvula de admissão, para uma turbina sem reaquecimento, pode ser descrita por uma função de transferência com uma única constante de tempo, como se vê na FIG. 7*.

* Visto que o sistema de fornecimento de vapor não é uma fonte infinita, a pressão da caldeira realmente varia transitoriamente com alterações na demanda de vapor. Contudo, a suposição continua válida para pequenas alterações em torno do ponto de operação.

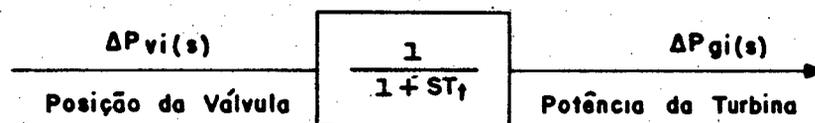


FIG. 7 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UMA TURBINA TÉRMICA

As turbinas com reaquecimento, devido a presença de mais de um estágio de pressão, necessitam de mais de uma constante de tempo para a sua representação, além de uma constante de ganho que deve atentar para a perda de vapor no reaquecedor⁶.

2.2.2 - TURBINAS HIDRÁULICAS

A determinação de uma função de transferência para turbinas hidráulicas não pode ser baseada numa análise simplista como aquela utilizada para turbinas a vapor sem reaquecimento, desde que o comportamento das turbinas hidráulicas, é altamente dependentes dos efeitos de inércia e compressibilidade da água e da elasticidade das paredes da tubulação forçada que alimenta a turbina e cada um destes fatores provoca efeitos diferentes na resposta da mesma bem como na do seu regulador de velocidade^{5,6,11,20,21,23,28,29}.

Por exemplo, a inércia da água atrasa as variações de fluxo das variações de abertura da válvula de admissão. Este fato é o responsável pelo aparecimento de um atraso de fase na malha do regulador de velocidade, cuja consequência prática é um efeito ins-

tabilizante na unidade geradora⁶. A elasticidade das paredes do conduto forçado, por sua vez, provoca ondas não estacionárias de pressão e fluxo na tubulação. Estes efeitos de onda são de pequena consequência quando a tubulação forçada é curta em relação à velocidade das ondas; mas podem chegar a nível destrutivo nos casos em que a ressonância entre a tubulação e o sistema regulador causa ondas estacionárias e intensificação local da oscilação de pressão.

Como já foi referido anteriormente, está fora do escopo desta tese a apreciação detalhada de modelos. Portanto será aqui deduzido apenas um modelo bastante simples de uma turbina hidráulica, com uma tubulação curta.

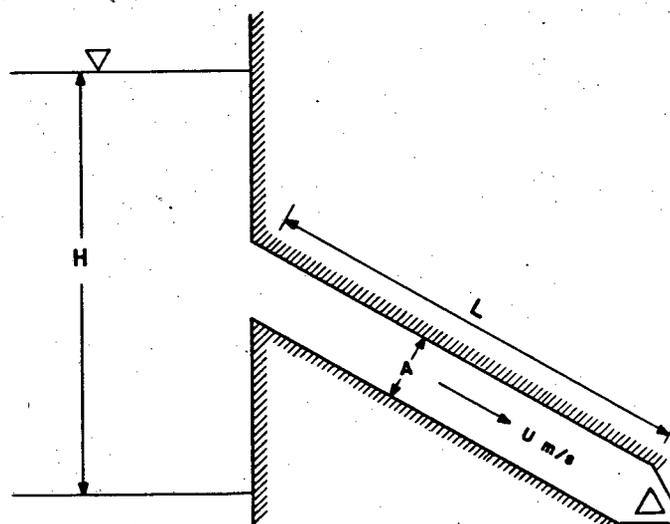


FIG. 8 — TURBINA HIDRÁULICA — CONDUTO FORÇADO CURTO

A FIG. 8 mostra um sistema de suprimento de energia constituído de uma tubulação curta, de comprimento L e área de secção transversal A . Devido a característica de comprimento da tubulação a análise levará em conta apenas a inércia da água.

A velocidade da água na tubulação é dada por

$$u = P\gamma \sqrt{H} \quad \text{m/s} \quad (32)$$

onde

H = altura hidrostática da válvula de admissão

PV = posição da válvula de admissão

u = velocidade da água na tubulação

Para pequenas variações em torno do ponto de operação, a Eq. (32) pode ser escrita, numa forma linearizada e já normalizada e ainda transformada por Laplace, como

$$\frac{\Delta u(s)}{u(s)} = \frac{1}{2} \frac{\Delta H(s)}{H(s)} + \frac{\Delta PV(s)}{PV(s)} \quad (33)$$

com

Δu = variação incremental em u

ΔH = variação incremental em H

Por outro lado a equação do movimento da coluna d'água na tubulação é

$$\rho A L \frac{d}{dt} (\Delta u) = - A \rho g \Delta H \quad (34)$$

onde

ρ = densidade da água em Kg. m^{-3}

A = área da secção transversal do conduto forçado em m^2

g = aceleração da gravidade em m.s^{-2}

L = comprimento do conduto forçado em m.

A Eq. (34) transformada por Laplace e normalizada fornece

$$\frac{\rho(s) \cdot A(s) \cdot L(s) \cdot s \cdot \Delta u(s)}{A(s) \cdot \rho(s) \cdot g(s) \cdot H(s) \cdot u(s)} = \frac{-A(s) \cdot \rho(s) \cdot g(s) \cdot \Delta H(s)}{A(s) \cdot \rho(s) \cdot g(s) \cdot H(s) \cdot u(s)} \quad (35)$$

ou, reagrupando algumas variáveis

$$\frac{L(s) \cdot u(s)}{g(s) \cdot H(s)} \cdot s \left\{ \frac{\Delta u(s)}{u(s)} \right\} = \frac{-\Delta H(s)}{H(s)} \quad (36)$$

ou ainda

$$s.T_w \left(\frac{\Delta u(s)}{u(s)} \right) = - \frac{\Delta H(s)}{H(s)} \quad (37)$$

com

$$T_w = \frac{L(s) \cdot u(s)}{g(s) \cdot H(s)} \quad \text{segundos} \quad (38)$$

sendo definida como a constante inicial nominal da água no conduto forçado, para H tomado como a altura hidrostática inicial da válvula de admissão da turbina.

O sinal - no segundo membro da Eq. (37) reflete o fenômeno da tendência de inversão de torque das turbinas hidráulicas quando submetidas a um transitório de altura na coluna d'água. Evidentemente esta Eq. (37) não é ainda aceitável como modelo matemático do bloco funcional denominado "Máquina Motriz" na FIG. 2, porque, como estabelecido lá, as variáveis dependente e independente para este bloco são a potência de eixo e a posição da válvula de admissão, respectivamente. A transformação da Eq. (37) em termo destas variáveis será feita a seguir.

Substituindo a Eq. (37) na Eq. (33) é possível expressar a variação de velocidade da água em função da posição da válvula de admissão, ou seja

$$\frac{\Delta u(s)}{u(s)} = \frac{1}{1 + s \cdot \frac{T_w}{2}} \cdot \frac{\Delta PV(s)}{PV(s)} \quad (39)$$

Por outro lado a potencia mecânica produzida pela turbina é proporcional ao produto do fluxo pela pressão⁵, ou em termos de velocidade e altura

$$PG \propto H \cdot u \quad (40)$$

Expandindo a Eq. (40) em forma linearizada, normalizando e transformando por Laplace, segue que

$$\frac{\Delta PG(s)}{PG(s)} = \frac{\Delta H(s)}{H(s)} + \frac{\Delta u(s)}{u(s)} \quad (41)$$

Finalmente, substituindo as Eqs. (37) e (39) na Eq. (41) obtem-se

$$\frac{\Delta PG(s)}{PG(s)} = \frac{1-s.T_w}{1+s.\frac{T_w}{2}} \cdot \frac{\Delta PV(s)}{PV(s)} \quad (42)$$

ou simplesmente

$$\Delta PG(s) = \frac{1-s.T_w}{1+s.\frac{T_w}{2}} \cdot \Delta PV(s) \quad (43)$$

com $\Delta PG(s)$ e $\Delta PV(s)$ em p.u. dos respectivos valores nominais.

A Eq. (43), quando resolvida no domínio do tempo para, por exemplo, uma entrada de um degrau unitário em ΔPV , forneceria para ΔPG uma resposta como aquela mostrada na FIG. 9 .

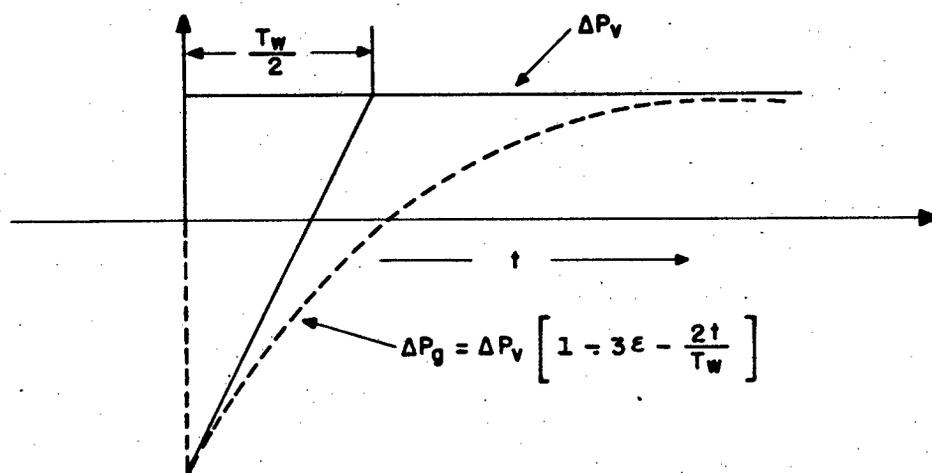


FIG. 9 - RESPOSTA DA TURBINA HIDRÁULICA A UMA VARIAÇÃO BRUSCA EM ΔP_v

A FIG. 9 mostra que imediatamente após uma variação na abertura da válvula de admissão, o efeito inicial é uma variação negativa na potência (ou no torque) da turbina em relação à va-

riação da posição da válvula de admissão e cuja magnitude é duas vezes maior. É aparente também, a partir da mesma FIG. 9, que este fenômeno acontece enquanto o peso da coluna líquida está sendo usado apenas para acelerar a si mesmo. Desta maneira a constante de tempo T_w pode, também, ser definida como o tempo requerido para acelerar a coluna d'água na tubulação a uma velocidade de u metros por segundo sob a ação de uma altura igual a H metros.

A FIG. 10 mostra o diagrama de blocos para uma turbina hidráulica.

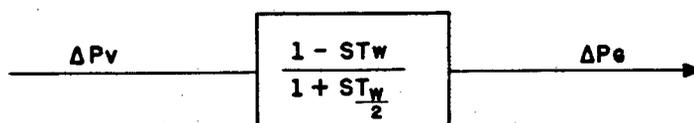


FIG. 10 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UMA TURBINA HIDRÁULICA

De acordo com o caso a ser estudado, um dos dois blocos, o da FIG. 7 ou o da FIG. 10 deve ser ligado no diagrama da FIG. 6 para adicionar mais uma função na malha da FIG. 2.

As FIG. 11 e 12 mostram cada uma das possibilidades.

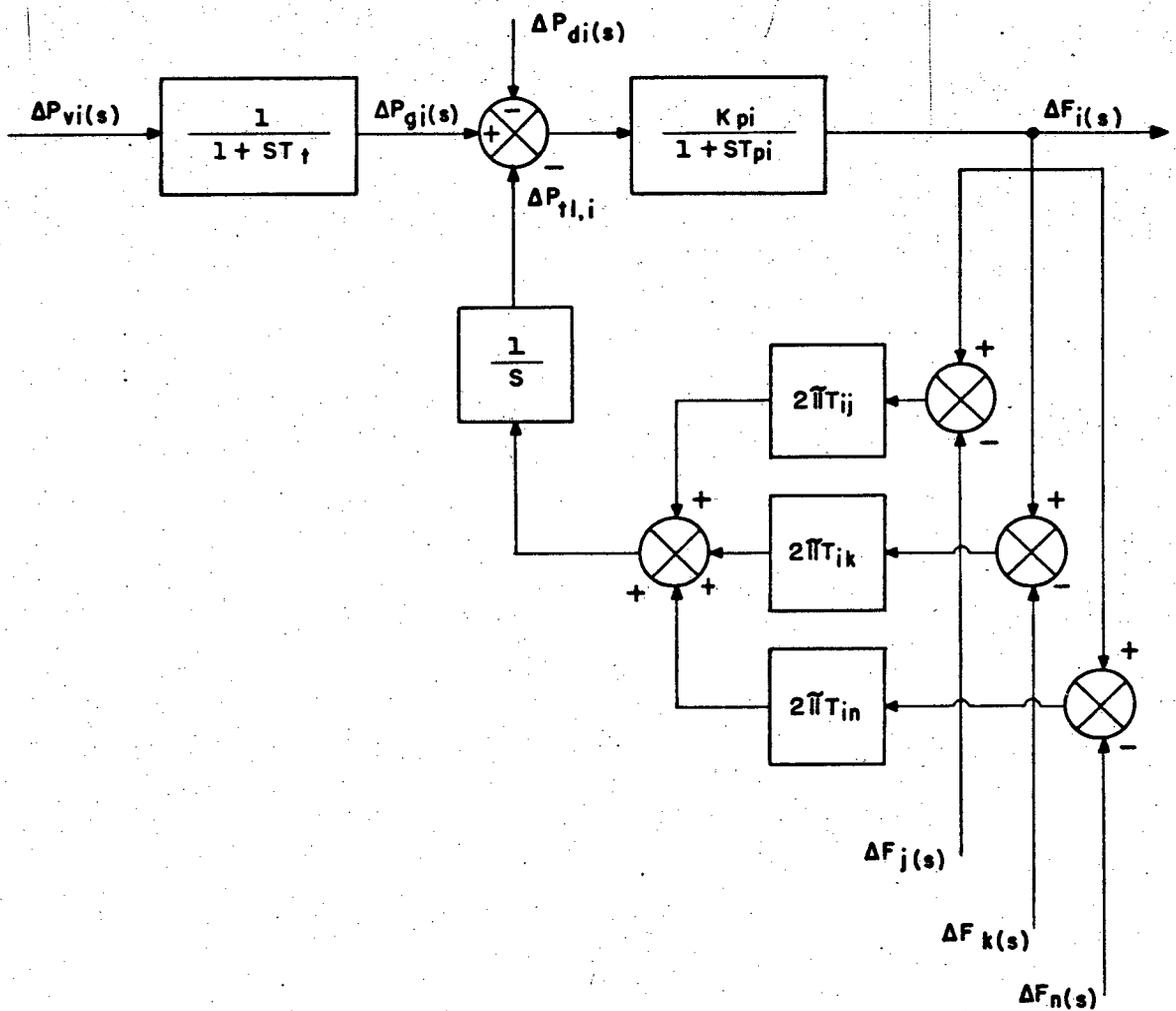


FIG.11 - SISTEMA DE POTÊNCIA - TURBINA TÉRMICA

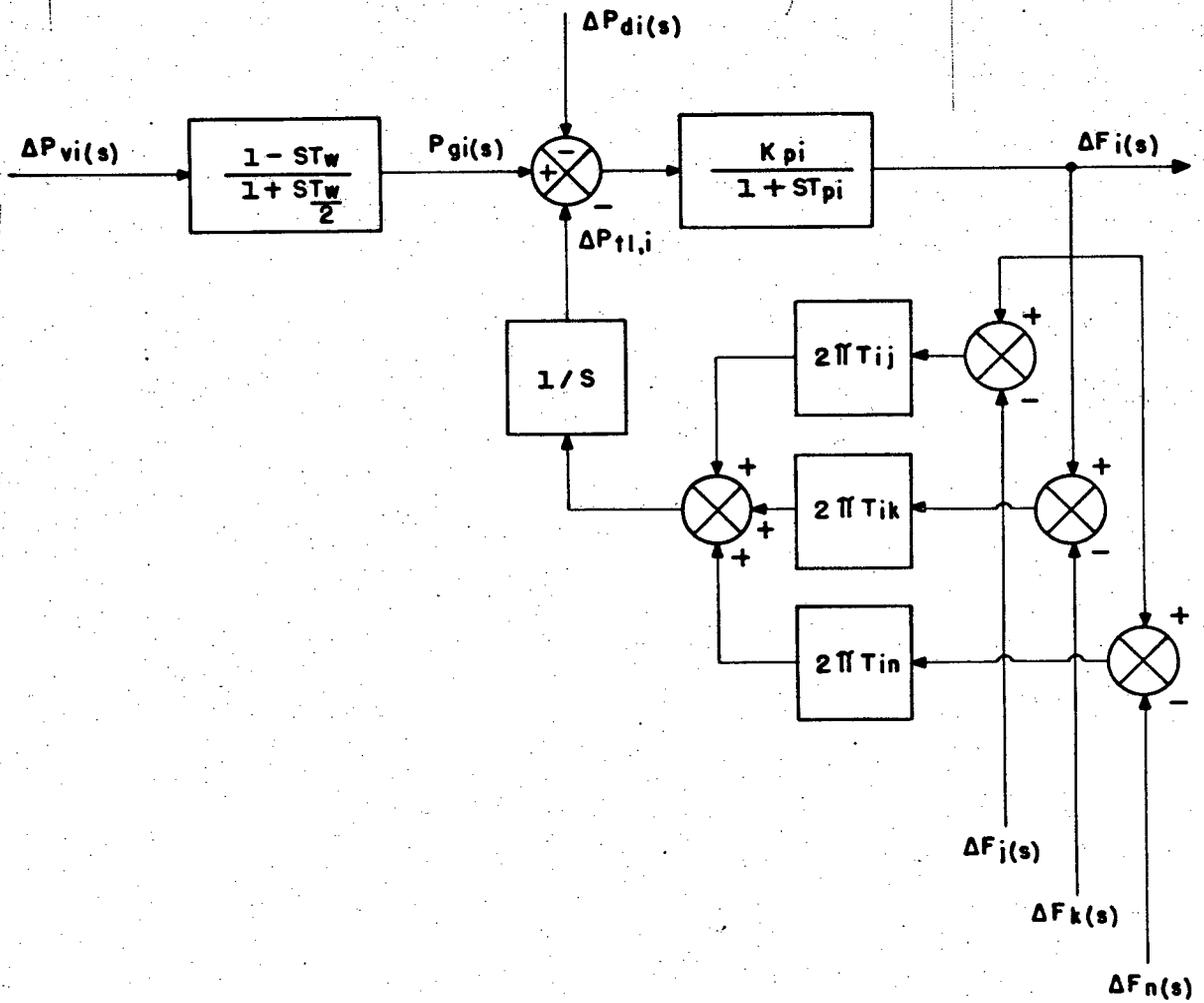


FIG. 12 - SISTEMA DE POTÊNCIA - TURBINA HIDRÁULICA

2.3 - CONTROLE PRIMÁRIO DE CARGA-FREQUÊNCIA

Tendo descrito as características dinâmicas de algumas máquinas motrizes e sistemas de fornecimento de energia, agora chegou a vez do próximo elo da cadeia, precisamente o denominado CONTROLE PRIMÁRIO.

Na verdade este bloco representa o regulador de velocidade. Porém, como o termo "regulador" não descreve de maneira universal a função "Controle primário de carga-frequência" devido a presença de muitíssimos equipamentos do tipo eletro-hidráulico, foi escolhida a terminologia "CONTROLE PRIMÁRIO DE CARGA-FREQUÊNCIA" para título deste parágrafo^{6,9,20,23,30}.

Existem basicamente dois tipos de reguladores de velocidade. O regulador de ação integral e o regulador de ação proporcional, com o primeiro, também conhecido por regulador ISÓCRONO, não podendo ser usado em sistemas de multi-máquinas em paralelo, porque a repartição de carga entre as unidades seria indeterminada¹³.

O regulador de ação proporcional, ou ESTÁTICO, apresenta duas fases distintas de atuação. Na primeira fase, chamada regulação primária, os reguladores das unidades sincronizadas ao sistema atuam até anular o desequilíbrio entre carga e geração detectado no parágrafo 2.1, e cujo sinal para o regulador de velocidade é apresentado sob a forma de variações na frequência. É aparente que, das deduções, conceitos e definições que conduziram à Eq.(25), a anulação deste desequilíbrio entre carga e geração trará consigo pelo menos um desvio estático na frequência em sistemas isolados e um outro ainda no fluxo de potência em sistemas interligados. O primeiro dos desvios citados ocorre devido ao estatismo estático dos reguladores, necessário para repartir a carga entre

as unidades geradoras e o segundo devido a inabilidade destes mesmos reguladores em dectatar onde, no sistema interligado aconteceu o desequilíbrio entra a potência consumida e a produzida. Numa segunda fase, conhecida por REGULAÇÃO SECUNDÁRIA OU SUPLEMENTAR, a frequência do sistema, é restabelecida pela atuação, por comando manual ou automático, de um órgão suplementar, o ajustador de frequência, ou motor de sincronização. Este órgão permite ainda através de controle adequado, uma redistribuição de carga entre as unidades, característica essa utilizada na distribuição econômica.

As turbinas hidráulicas, devido a sua grande inêrica e devido também a tendência do torque variar inicialmente em sentido oposto ao desejado, utilizam um terceiro tipo de regulador de velocidade, também de ação proporcional, com um estatismo transitório e outro permanente. Este estatismo transitório garante um comportamento estável do regulador para desvios rápidos na frequência ^{5,6,11}.

A maioria absoluta dos reguladores de velocidade em uso hoje em dia é do tipo eletro-hidráulico. A grande vantagem deste tipo de regulador reside no fato do mesmo permitir, por simples controle de potenciômetros, introduzir, variar e misturar em proporções desejadas um grande número de grandezas, em forma de sinais, que podem representar a frequência, a sua derivada e sua integral, o desvio de potência nas interligações e/ou sua integral, o nível d'água, o fluxo de água e várias outras grandezas, podendo a relação entre as quantidades ser alterada em plena operação⁹.

Obviamente o trabalho não comporta a dedução em detalhes de modelos para todos os tipos de reguladores e portanto será aqui discutido e modelado apenas o tipo possível de ser utilizado em

em sistemas de multi-máquinas.

2.3.1 - O REGULADOR ESTÁTICO

A FIG. 13 mostra o esquema de um regulador estático ou com queda de velocidade.

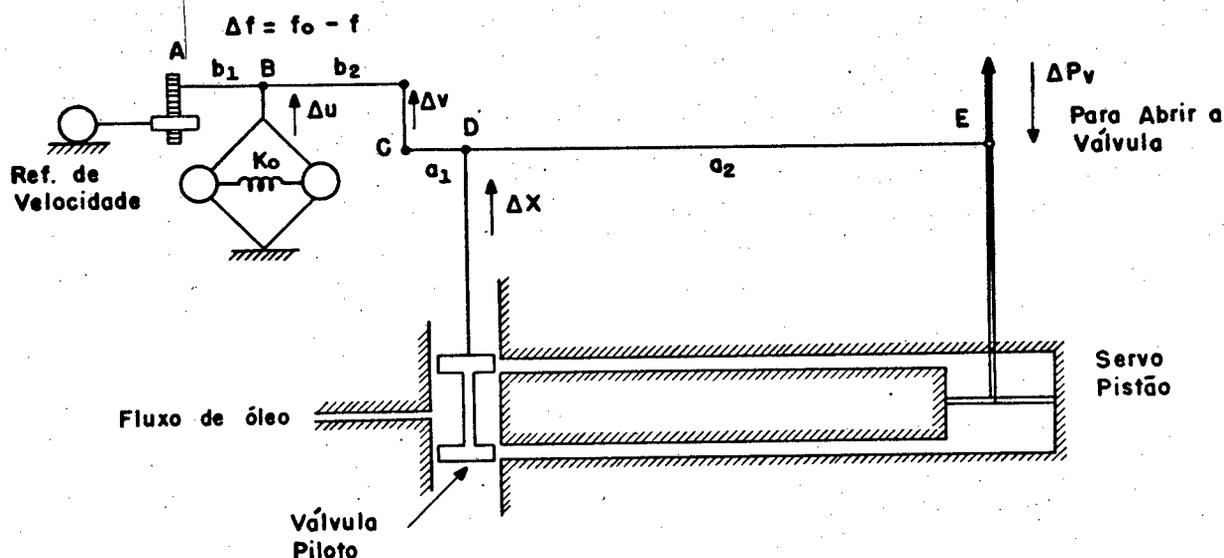


FIG. 13 - REGULADOR DE VELOCIDADE ESTÁTICO

A característica de queda de velocidade neste regulador é devido a possibilidade de realimentação da posição da válvula de admissão da turbina na posição da válvula piloto, que pode, basicamente, ser afetada de três (3) maneiras distintas:

1. Diretamente através de comandos no motor de sincronização.
2. Indiretamente, via realimentação, devido a variações na posição do servo pistão
3. Indiretamente, também via realimentação, devido a variações na frequência do sistema, detectadas pelo sistema "fly-ball".

O comando para o motor de sincronização é um dos elementos primordiais na discussão das filosofias de controle suplementar e será discutido somente no Capítulo 3. Evidentemente o modelo mate-

mático a ser deduzido para o regulador em questão deve ser capaz de reportar variações na posição da válvula de admissão em resposta às variações na frequência, ou ainda às variações na posição da válvula piloto provocadas direta ou indiretamente. Suponha-se, portanto, por um instante que não existe comando algum acionando o motor de sincronização. Em sendo assim, uma variação incremental normalizada na posição da válvula piloto seria dada por

$$\Delta X = \Delta X_1 + \Delta X_2 \quad (44)$$

onde

ΔX_1 = modificação na posição da válvula piloto devido a desvios na frequência, em forma normalizada.

ΔX_2 = modificação na posição, da válvula piloto devido a realimentação de mudanças na posição do servo pistão (ou da válvula de admissão), em forma normalizada.

Das definições acima é aparente que

$$\Delta X_1 = K_1 \Delta f \quad (45)$$

onde Δf é o desvio de frequência normalizado e k_1 uma constante que depende da constante da mola do sistema "fly-ball" e da relação de braços $a_1 - a_2$ e $b_1 - b_2$. Por outro lado o binário produzido pelas forças atuando nos pontos E e D na FIG. 13 confirmam a relação.

$$\Delta X_2 = -K_3 \Delta PV \quad (46)$$

onde ΔPV é a variação na posição da válvula de admissão, em forma normalizada, e K_3 uma constante que depende da relação entre os braços a_1 e a_2 .

Assumindo que o fluxo de óleo para o interior do mecanismo é proporcional à posição da válvula piloto, então a relação entre

ΔPV e ΔX é do tipo .

$$\Delta PV = \int K_2 \Delta X \, dt \quad (47)$$

ou ainda

$$\Delta PV = \int K_2 (K_1 \cdot \Delta f - K_3 \cdot \Delta PV) \, dt \quad (48)$$

com a constante K_2 dependendo das geometrias do orifício e do cilindro e da pressão do fluido.

A Eq. (47), na forma diferencial é altamente esclarecedora das relações entre as posições da válvula de admissão da turbina e da válvula piloto. Pois se assim escrita esta equação indicaria que a posição da válvula de admissão continuaria variando desde que persistisse o deslocamento na posição da válvula piloto. Desta maneira a posição da válvula de admissão atingirá um novo estado permanente somente quando o integrando da Eq. (48) for nulo, o que em termos práticos significa que a posição da válvula piloto é tal que a pressão é a mesma nos dois lados do servo pistão. Nestas condições a ação de tal regulador de velocidade é no sentido de detectar e fazer parar as variações na frequência do sistema e movimentar a posição da válvula de admissão para uma posição que permita tal ação. Evidentemente o preço disso é um erro estático na frequência, como pode ser claramente visto na Eq. (48).

Transformando a Eq. (48) por Laplace e fazendo algumas simplificações segue que

$$\Delta PV(s) = \frac{1}{K_3} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{K_2 K_3}} \Delta F(s) \quad (49)$$

A FIG. 14 é a representação do regulador em forma de diagrama de blocos.

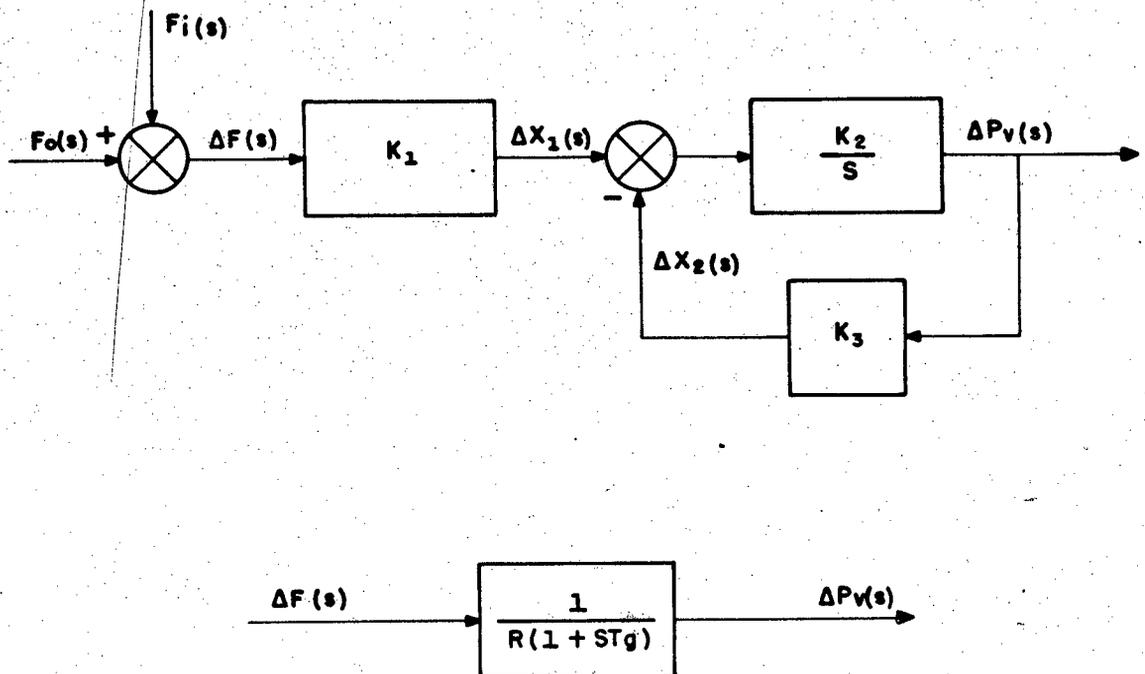


FIG. 14 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O REGULADOR ESTÁTICO

Nesta figura

$$R = \frac{K_3}{K_1} \quad (50)$$

$$TG = \frac{1}{K_2 K_3} \quad (51)$$

A constante de tempo TG é conhecida como a constante de tempo do regulador, ou do mecanismo de regulação de velocidade, e é geralmente da ordem de uma fração de segundo.

A Eq. (49) mostra que em regime permanente

$$\Delta PV(t) = \frac{1}{\frac{K_3}{K_1}} \Delta f(t) \quad (52)$$

ou

$$\Delta PV(t) = \frac{1}{R} \Delta f(t) \quad (53)$$

e isto quer dizer que o valor de estado permanente do desvio de frequência Δf exigido para produzir uma variação de 1 p.u. na posição da válvula de admissão da turbina é R. Este desvio de frequência referido antes, quando calculado em por cento da frequência nominal, é denominado estatismo estático e R é a inclinação da característica natural de regulação, que é basicamente uma linha relacionando os valores percentuais da velocidade da turbina aos valores percentuais da capacidade da unidade geradora¹. Com um valor fixo para o estatismo, por exemplo, diferentes valores para o parametro R significariam a produção de diferentes valores percentuais da capacidade nominal da unidade geradora na velocidade nominal da turbina.

Em termos gerais o regulador, cujo modelo matemático foi deduzido neste parágrafo, pode ser caracterizado como um regulador de ação proporcional, com ganho $1/R$.

2.3.2 - O REGULADOR ESTÁTICO COM COMPENSAÇÃO DE QUEDA DE VELOCIDADE

Embora os reguladores estáticos possam ser usados com sucesso em sistemas cujas máquinas motrizes são turbinas térmicas, eles não podem, contudo, ser utilizados naqueles recebendo a sua potência motriz de turbinas hidráulicas. Estas devido a tendência inicial de inversão na resposta de torque ou potência, necessitam de reguladores de velocidade com características especiais de queda transitória de velocidade para comportamento estável. Em outras palavras isto quer dizer que o regulador de velocidade de uma

turbina hidráulica deve demonstrar alta regulação (ou baixo ganho) para desvios rápidos na frequência e deve se comportar exatamente ao contrário para alterações mais lentas na mesma⁵.

A FIG. 15 apresenta um regulador estático no qual foi adicionada uma realimentação transitória da posição da válvula de admissão na posição da válvula piloto através de uma câmara de óleo com orifício.

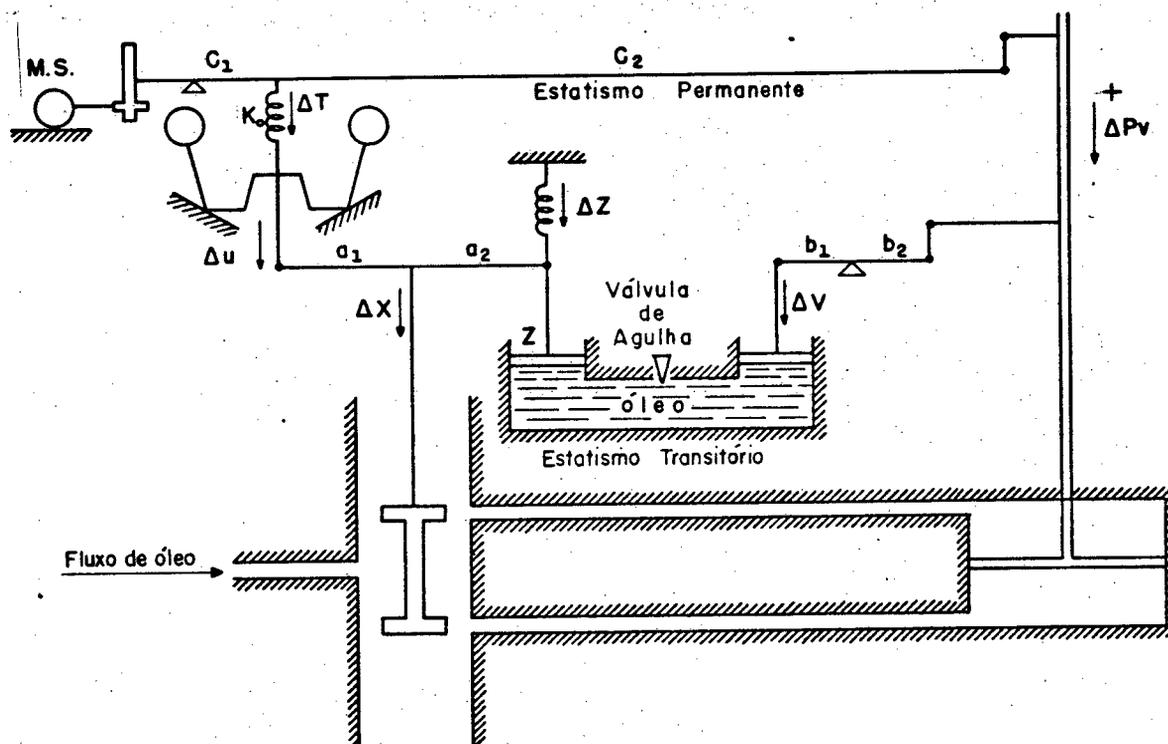


FIG. 15 - REGULADOR ESTÁTICO COM COMPENSAÇÃO DE QUEDA DE VELOCIDADE

Esta malha transitória tem a função básica de refrear a ação do regulador de velocidade durante os transitórios do sistema de suprimento de energia. Esta ação é necessária porque, devido a problemas de inércia e compressibilidade da água e elasticidade das paredes da tubulação, a resposta do sistema de suprimento de energia às variações na posição da válvula de admissão não é instantânea no sentido esperado. Desta maneira, a ação inicial do regulador deve ser no sentido de permitir à turbina uma maior li-

berdade no início do processo para logo em seguida aplicar uma ação eficaz de regulação.

A função de transferência deste tipo de regulador de velocidade é basicamente a mesma da FIG. 14, com uma malha adicional introduzida pela realimentação transitória. Portanto será aqui deduzida a função de transferência desta realimentação transitória apenas. Nas deduções a seguir todas as variações incrementais são consideradas linearizadas e normalizadas. Na FIG. 15 a relação entre ΔX e ΔZ é puramente linear ou seja,

$$\Delta X = K_0 \cdot \Delta Z \quad (54)$$

onde

ΔX = variação incremental na posição da válvula piloto devido a variação na posição do pistão Z.

ΔZ = variação incremental na posição do pistão Z.

Por outro lado

$$\Delta Z = - K_{11} \cdot \Delta V + \int \frac{\dot{Q}}{A} dt \quad (55)$$

onde

Q = óleo extravazado através da válvula da agulha

A = área do pistão Z

A pressão no óleo é proporcional a ΔZ e Q é proporcional à pressão; logo

$$\frac{\dot{Q}}{A} = - K_5 \cdot \Delta Z \quad (56)$$

O seguinte também é verdade

$$\Delta V = K_6 \cdot \Delta PV \quad (57)$$

Em vista das Eqs. (56) e (57) a Eq. (55) fica

$$\Delta Z = -K_{16} \cdot \Delta PV - K_5 \int \Delta Z \, dt \quad (58)$$

com

$$k_{16} = k_{11} \cdot K_6 \quad (59)$$

Transformando por Laplace a Eq. (58), segue que

$$\Delta Z(s) = -K_{16} \cdot \Delta PV(s) - K_5 \frac{\Delta Z(s)}{s} \quad (60)$$

ou

$$\Delta Z(s) = -\frac{K_{16}}{1 + \frac{K_5}{s}} \Delta PV(s) \quad (61)$$

ou ainda (usando a Eq. 54)

$$\Delta X(s) = -\frac{K_0 \cdot K_{16}}{1 + \frac{K_5}{s}} \cdot \Delta PV(s) \quad (62)$$

Simplificando a Eq. (62) e incorporando o seu diagrama de bloco representativo na FIG. 14, o resultado é o mostrado na FIG. 16 .

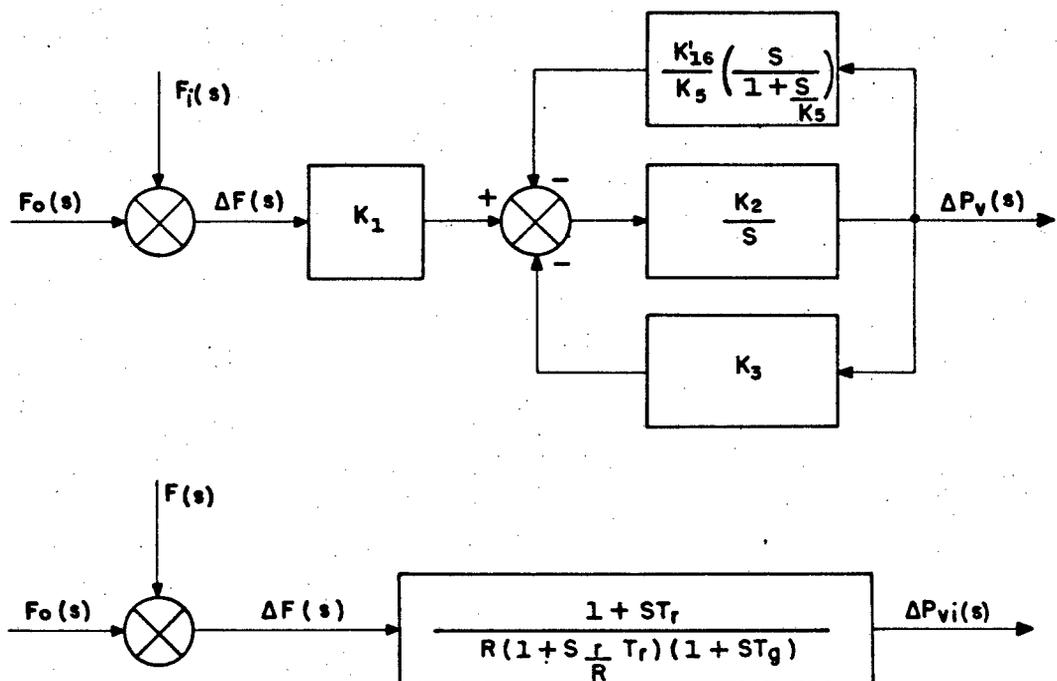


FIG. 16 - REGULADOR COM COMPENSAÇÃO DE QUEDA DE VELOCIDADE
DIAGRAMA DE BLOCO

Capítulo 3RESPOSTA DO REGULADOR DE VELOCIDADE E FORMAÇÃO
DOS SINAIS DE REGULAÇÃO SUPLEMENTAR

No Capítulo 2 foi enfatizada a necessidade de se utilizar reguladores de ação proporcional em sistemas de multi-máquinas em paralelo para uma divisão de carga adequada e determinada entre as máquinas. Verificou-se ainda que o efeito líquido da ação natural deste tipo de regulador é no sentido de fazer parar as variações na frequência do sistema e cuja consequência intrínseca é a produção de erros estáticos na mesma. Por outro lado a inabilidade dos reguladores em discriminar a origem de uma variação de carga nos sistemas interligados faz com que os fluxos programados nas interligações se alterem porque todos os reguladores, desde que não estejam bloqueados, agem em resposta às variações de frequência. Esta alteração no fluxo de potência programado é o que se conhece por erro ou desvio de potência nas interligações, ou Desvio de Intercâmbio Líquido Programado, como é comumente chamado na Literatura de Controle Suplementar⁸.

Embora a presença destes erros estáticos já tenha sido verificada qualitativamente, nada ainda foi dito a respeito da natureza quantitativa dos mesmos. Neste capítulo serão deduzidas as equações que descrevem quantitativamente estes erros a partir da investigação do comportamento dos reguladores de velocidade em Áreas isoladas e interligadas e após isso serão estabelecidos os objetivos das filosofias de controle suplementar. A partir destes objetivos e levando em conta as características de regulação natural do regulador de velocidade será então modelado o último bloco funcional da FIG.2, precisamente aquele denominada "Controle Suplementar".

3.1 - A RESPOSTA DO REGULADOR DE VELOCIDADE - ÁREA ISOLADA

Será agora examinado o comportamento transitório de um sistema de potência isolado sujeito a uma variação de carga, levando em conta apenas a resposta do sistema regulador de velocidade.

A FIG. 17 mostra os diagramas de bloco de duas Áreas de controle, sendo que uma delas recebe a sua potência motriz de uma turbina a vapor sem reaquecimento e a outra de uma turbina hidráulica.

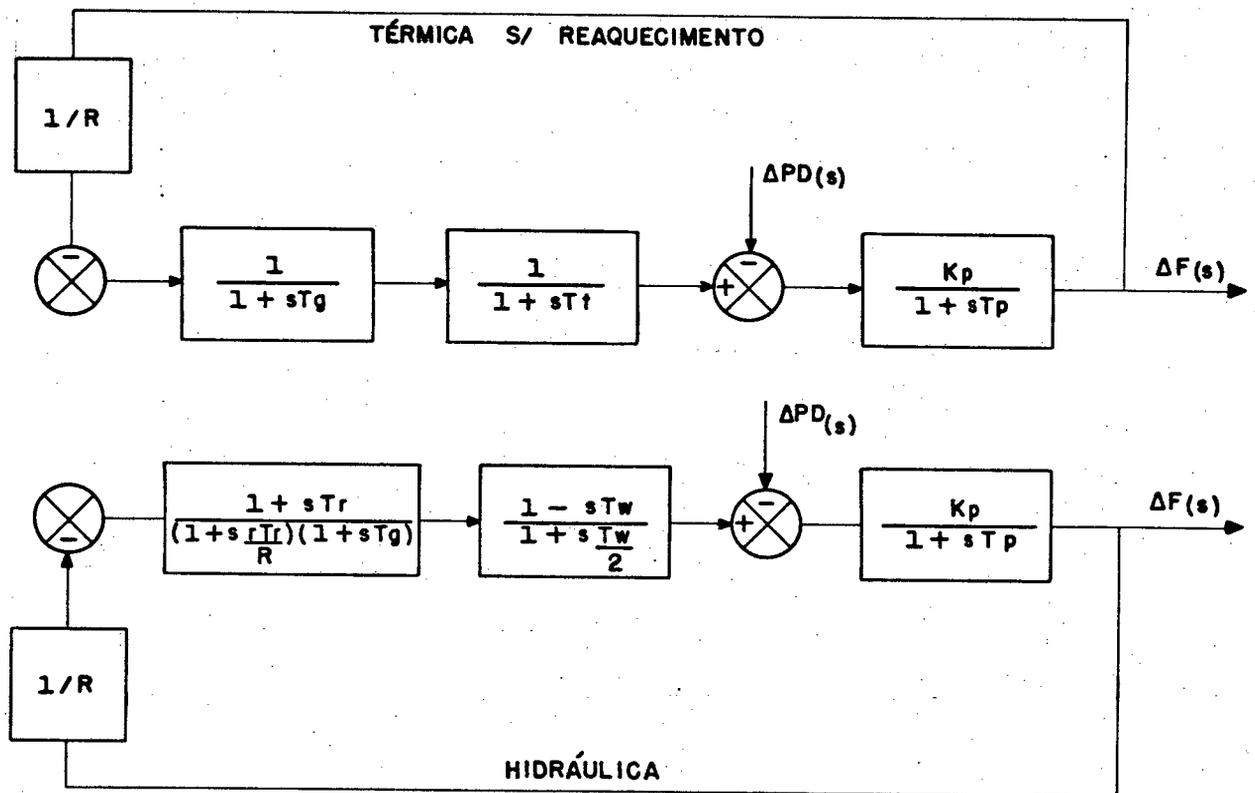


FIG.17-SISTEMAS COM DIFERENTES TIPOS DE REGULADORES E TURBINAS.

A FIG. 18 é uma representação simplificada da FIG. 17. O objetivo é relacionar as variações de frequência às variações de carga, através de uma função de transferência, levando-se em conta apenas o sistema de potência e as características de regulação do sistema motriz primário.

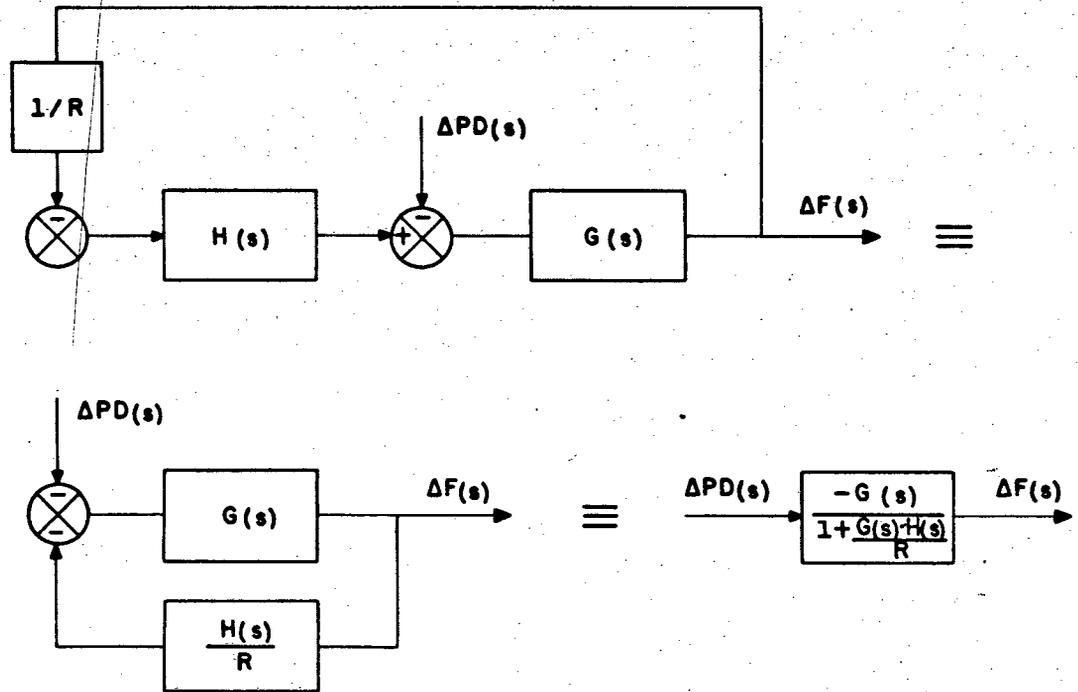


FIG. 18- DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA.

Na FIG. 18 G é a função de transferência do sistema de potência e H é a função de transferência do regulador e da máquina motriz. Nestas condições para um degrau ΔPD de entrada

$$\frac{\Delta F(s)}{\Delta PD(s)} = \frac{-G(s)}{1 + \frac{G(s) \cdot H(s)}{R}} \quad (63)$$

O valor do desvio de frequência em regime permanente, em função do tempo, $\Delta f(t)$, que segue uma variação de carga de um degrau, $\Delta PD(t)$ para estes sistemas, pode ser determinado tomando a transformada inversa da Eq. (63) ou resolvendo numericamente a equação diferencial em computador ou manualmente.

Utilizando o teorema do valor final, segue que

$$\Delta f(t) = s \left\{ \frac{\Delta PD(s)}{s} \cdot \frac{-G(s)}{1 + \frac{G(s) \cdot H(s)}{R}} \right\}_{s=0} \quad (64)$$

ou

$$\Delta f(t) = \frac{-\Delta PD(t)}{D + \frac{1}{R}} \quad \text{Hz} \quad (65)$$

e

$$D = \frac{1}{K_P}$$

para qualquer um dos sistemas mostrados na FIG. 17.

Embora o desvio estático na frequência seja o mesmo para valores iguais de R e D, há, porém, diferenças marcantes no comportamento transitório (valores de pico e tempo de recuperação) entre turbinas hidráulicas e térmicas. Esta afirmação é enfatizada na FIG.19 onde, com a finalidade de acentuar o efeito da regulação natural, foi incluída a resposta de frequência para uma variação de carga em um sistema com os reguladores bloqueados entendendo-se por tal aquele regulador em que $R \approx \infty$, ou seja a potência da máquina motriz permanece invariável.

A Eq. (65) apresenta um fato bastante importante. Ela basicamente, estabelece que em regime permanente o desvio estático na frequência depende da constante de regulação natural do regulador (o ganho de regime permanente $1/R$) e da característica de amortecimento da carga do sistema. É, possivelmente, devido a este fato que o fator $(1/R + D)$ é definido como "Característica de Regulação Composta da Área" e será mostrado mais adiante que ele coloca uma regra importante no comportamento da regulação suplementar.

3.2 - RESPOSTA DO REGULADOR DE VELOCIDADE - ÁREAS INTERLIGADAS

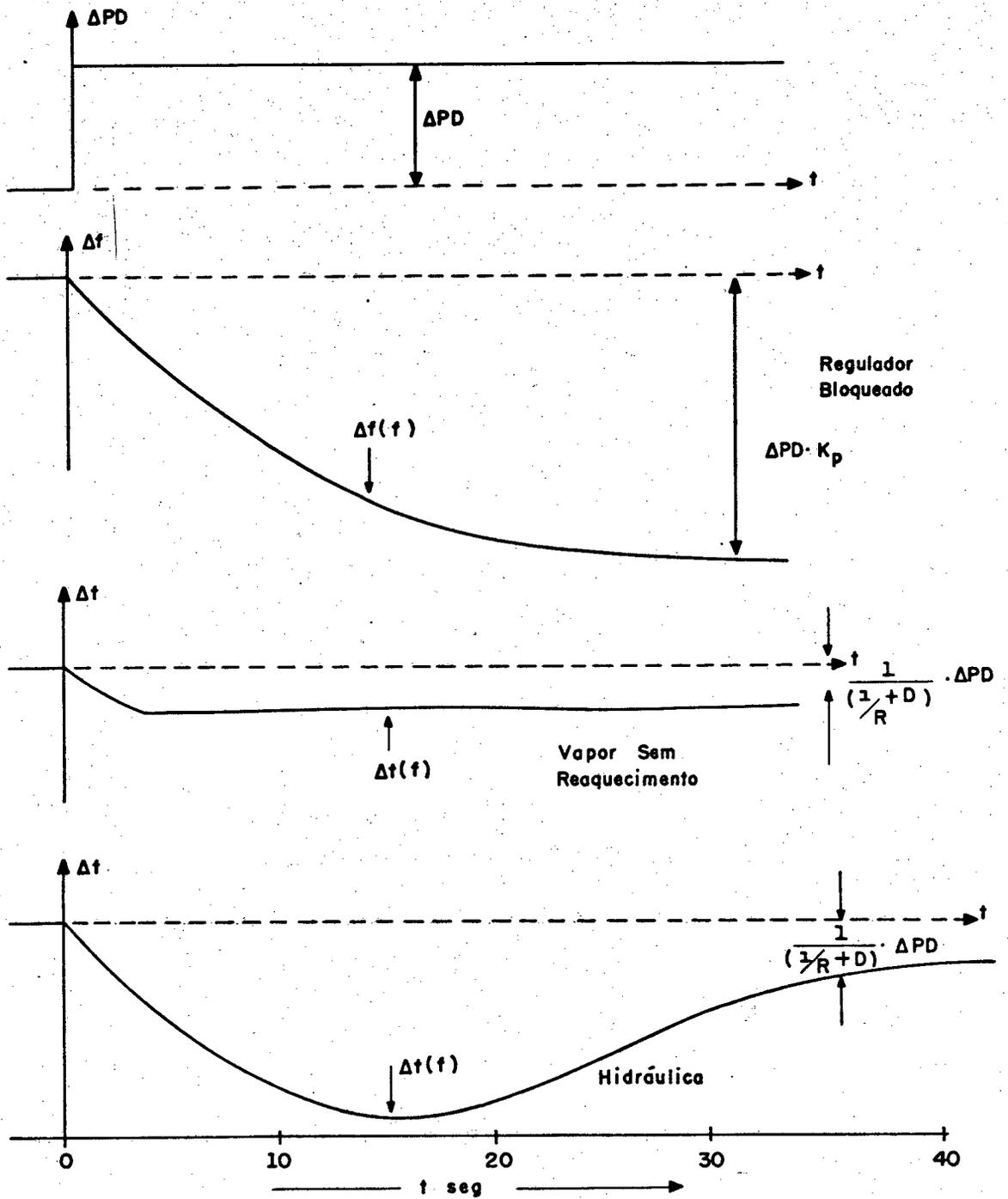


FIG. 19 — RESPOSTA DA REGULAÇÃO NATURAL PARA DIFERENTES TIPOS DE MÁQUINA MOTRIZ

Basicamente a forma da resposta dos reguladores de velocidade em Áreas interligadas não é diferente daquela para Áreas isoladas. Porém neste caso há uma certa elasticidade entre as Áreas que deve ser levada em conta*.

A FIG. 20 mostra duas áreas interconectadas através de uma linha de interligação, cujo coeficiente de torque sincronizante é T_{12} .

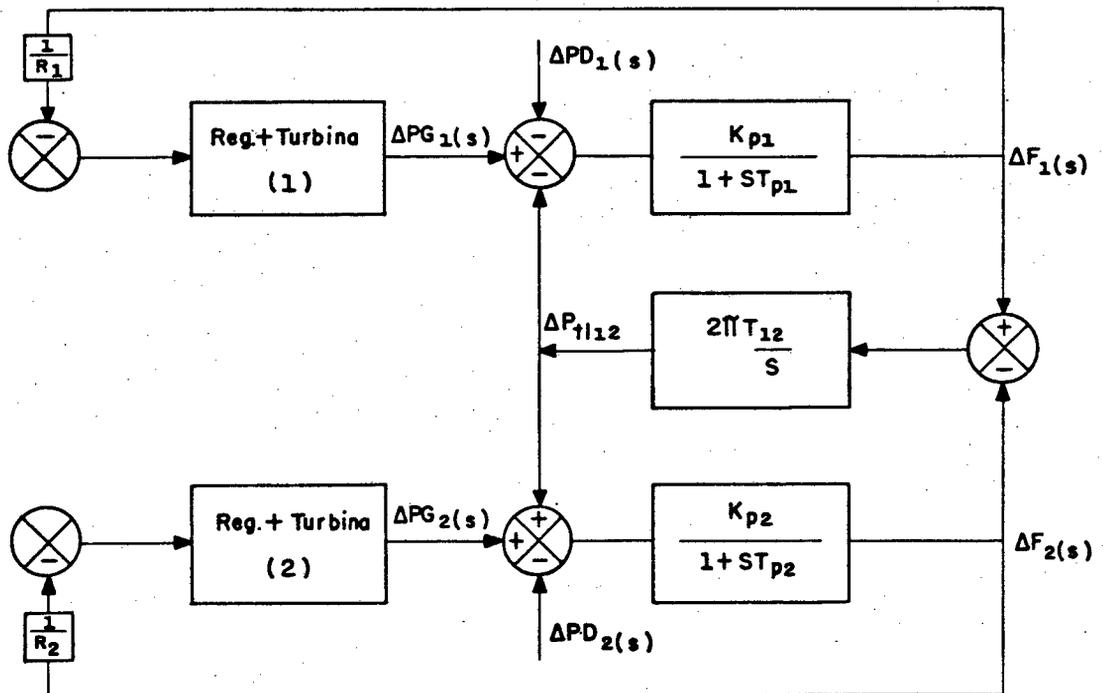


FIG.20 - DUAS ÁREAS INTERLIGADAS

* Isto significa que as frequências individuais podem diferir transitoriamente, embora elas tenham que manter o mesmo valor médio se os sistemas estiverem e permanecerem sincronizados.

Este sistema, independente do tipo de máquina motriz utilizada, apresenta as seguintes relações de estado permanente, para uma alteração de carga ΔPD_1 , na Área 1

$$\Delta f_1(t) = \Delta f_2(t) = \Delta f(t) \quad \text{Hz} \quad (66)$$

$$\Delta PG_1(t) - \Delta PTL_{,12}(t) - \Delta PD_1(t) = \Delta f(t)/kP_1 \quad \text{p.u. MW} \quad (67)$$

$$\Delta PG_2(t) + \Delta PTL_{,12}(t) = \Delta f(t)/KP_2 \quad \text{p.u. MW} \quad (68)$$

$$\Delta PG_1(t) = - \Delta f(t)/R_1 \quad \text{p.u. MW} \quad (69)$$

$$\Delta PG_2(t) = - \Delta f(t)/R_2 \quad \text{p.u. MW} \quad (70)$$

Substituindo a Eq. (69) na Eq. (67) e a Eq. (70) na Eq. (68) e omitindo por enquanto a variável t , segue que

$$- \Delta PTL_{,12} - \Delta PD_1 = \Delta f \left(\frac{1}{KP_1} + \frac{1}{R_1} \right) \quad \text{p.u. MW} \quad (71)$$

$$\Delta PTL_{,12} = \Delta f \left(\frac{1}{KP_2} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{p.u. MW} \quad (72)$$

A solução simultânea do conjunto formado pelas Eqs. (71) e (72) conduz às relações de estado permanente

$$\Delta f(t) = - \frac{\Delta PD_1(t)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right)} \quad \text{Hz} \quad (73)$$

$$\Delta PTL_{,12}(t) = - \frac{\Delta PD_1(t) \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1 \right) \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right)} \quad \text{p.u. MW} \quad (74)$$

Estas equações mostram que para uma alteração de carga similar na Área 2 o erro estático da frequência será exatamente o mesmo no sistema interligado e para o erro de fluxo de potência a

afirmação só seria válida se as características de regulação composta das Áreas bem como suas capacidade nominais fosse iguais.

3.3 - OBJETIVOS DA REGULAÇÃO SUPLEMENTAR

No capítulo 2 foi estabelecido que os reguladores estáticos apresentam duas fases distintas de atuação. A primeira destas fases, conhecida por regulação natural, é caracterizada, no seu final, pela presença de erros estáticos na frequência e/ou no fluxo de potência nas interligações. A segunda fase, denominada regulação ou controle suplementar, tem como função principal o restabelecimento, tanto da frequência de operação, quanto do fluxo de potência programado nas interligações, e isto é conseguido através da atuação comandada do mecanismo de referência carga/velocidade, o motor de sincronização.

É desejável que a Área em que ocorreu a variação de carga seja a única responsável pela correção dos erros estáticos pertinentes. Esta afirmação conduz algumas vezes a se definir o objetivo da regulação suplementar como sendo basicamente o ajuste das variações de geração às variações de carga na Área. A utilização de tal definição conduziria à necessidade das Áreas usarem filosofias de controle suplementar com a habilidade de discriminar a origem do problema, o que na prática, é muitas vezes contrariado pelos acordos operacionais.

Tendo em mente então que o objetivo da regulação suplementar é pura e simplesmente a anulação dos erros estáticos na frequência e no fluxo de potência nas interligações, é possível visualizar várias maneiras de se atingir tal objetivo, no caso de um sistema com duas Áreas:

- a. Assinalar a Área 1 para correção de frequência e a Área

- 2 para correção de intercâmbio.
- b. Assinalar a Área 2 para correção de frequência e a Área 1 para correção de intercâmbio.
 - c. Assinalar ambas as Áreas para correção de uma grandeza formada por combinação linear dos erros de frequência e de potência.

A adoção de diferentes filosofias de controle suplementar significa diferentes valores e significados para a grandeza de regulação, conhecida por ERRO DE CONTROLE DE ÁREA (ECA), a variável independente para o bloco funcional denominado "CONTROLE SUPLEMENTAR" na FIG. 2. Assim, se a uma área é dada a tarefa de corrigir apenas os desvios de frequência, somente este sinal entrará na formação de seu ECA e por conseguinte se diz que esta área está operando em "CONTROLE PLANO DE FREQUENCIA". Por outro lado "CONTROLE PLANO DE INTERLIGAÇÃO" é o nome que se dá àquela filosofia de controle suplementar, cujo objetivo é corrigir o erro de potência nas interligações e, logicamente, este é o único sinal relevante para a formação do ECA em tal situação. Porém, se a uma certa área se dá a tarefa de corrigir concomitantemente os dois desvios, o seu ECA deve ser formado por uma combinação linear dos dois sinais. Esta é a modalidade de controle suplementar conhecida por "CONTROLE DE CARGA-FREQUÊNCIA PONDERADO".

Considere-se novamente as Áreas da FIG 20, sendo a situação assumida exatamente a mesma que conduziu às Eqs. (73) e (74). Nestas condições verifica-se que o incremento de carga ΔPD_1 na Área 1 foi atendido às custas de alterações na geração de potência em ambas as Áreas, como demonstram as Eqs. (71) e (72). É patente portanto que no fim da regulação natural a Área 1 apresenta uma deficiência de geração e a Área 2 um excesso, sendo este igual a

$$\Delta PTL_{,21}(t) = -K_{12} \cdot \Delta PTL_{,12}(t) \text{ p.u. MW} \quad (75)$$

e a deficiência na Área 1

$$DEF(t) = \Delta PD_1(t) + \Delta PTL_{,12}(t) + D_1 \Delta f(t) \text{ p.u. MW} \quad (76)$$

com a constante K_{12} dependendo da relação entre as potências bases nas duas áreas.

Os fatos apresentados nas Eqs. (75) e (76) conduzem algumas vezes a se definir o ECA de um modo mais geral como sendo "a grandeza que define um excesso ou deficiência de geração em uma dada Área e que deve ser anulada pela atuação da regulação suplementar". Esta definição, na verdade, não exclui a apresentada antes no texto, antes pelo contrário elas se completam. Assim, com estes fatos em mente, e levando em conta que a expressão mais geral do ECA é uma combinação linear dos desvios de frequência e de potência nas interligações se chega a

$$ECA_1 = A_1 \Delta PTL_{,12}(t) + B_1 \cdot \Delta f(t) \text{ p.u. MW} \quad (77)$$

$$ECA_2 = A_2 \Delta PTL_{,21}(t) + B_2 \cdot \Delta f(t) \text{ p.u. MW} \quad (78)$$

onde

ECA_1 = erro de controle de área, na Área 1

ECA_2 = erro de controle de área, na Área 2

Valores particulares das constantes A_i e B_i determinam cada uma das filosofias de controle suplementar detectadas antes, embora quaisquer valores não nulos conduzam, matematicamente, ao resultado esperado de

$$ECA_1 = ECA_2 = 0 \quad (79)$$

Porém, é de especial importância aquela combinação linear em que

os A_i 's são valores unitários e os B_i s são tomados iguais às características compostas de regulação das áreas ou seja

$$A_1 = A_2 = 1 \quad (80)$$

$$B_i = \frac{1}{R_i} + D_i \quad (81)$$

pois neste caso, levando em conta as Eqs. (73) e (74), as Eqs.(77) e (78) forneceriam, respectivamente

$$ECA_1 = - \Delta PD_1 (t) \text{ p.u. MW} \quad (82)$$

e

$$ECA_2 = 0 \quad (83)$$

As Eqs. (82) e (83) mostram, do ponto de vista de controle suplementar, um fato de excepcional importância, pois elas indicam que Área deve exercer o esforço de controle suplementar e qual é o valor deste esforço. Na prática a adoção de tal filosofia de controle pressupõe que as Áreas possuam, isoladamente, certos requisitos operacionais, cujo tratamento foge ao escopo deste trabalho, mas que devem ser levados em conta numa análise mais elaborada. De resto, as Eqs. (82) e (83) apresentam um resultado que já era de se esperar ao se acrescentar aos objetivos da regulação suplementar o conceito de não interação entre as Áreas, ou seja, cada Área deve ser única e exclusivamente responsável pela correção dos problemas ocorridos dentro de suas fronteiras. É facilmente verificável que se esta fosse uma premissa assumida a priori as Eqs. (77) e (78) teriam fornecido os valores dos parâmetros B_i 's exatamente iguais àqueles assumidos.

A filosofia de controle suplementar em que o ECA é calculado com os valores das constantes A_i 's e B_i 's dadas pelas Eqs.

(80) e (81), respectivamente, é denominado "CONTROLE DE CARGA - FREQUÊNCIA PONDERADO". Por outro lado se

$$A_1 = A_2 = 1 \quad (84)$$

$$B_1 = B_2 = 0 \quad (85)$$

as Áreas estarão operando na modalidade conhecida por "CONTROLE PLANO DE INTERLIGAÇÃO"; e finalmente se

$$A_i = 0 \quad (86)$$

$$B_i = \alpha ; 0 < \alpha < \infty \quad (87)$$

as Áreas estarão operando em "CONTROLE PLANO DE FREQUÊNCIA".

Evidentemente os objetivos da regulação suplementar não serão atingidos se ambas as Áreas operam na mesma modalidade de controle suplementar, a menos que o modo seja "CONTROLE DE CARGA-FREQUÊNCIA PONDERADO".

Independente do modo de controle em que as áreas estejam operando, segundo a Eq. (79) o que se espera do bloco funcional denominado "Controle Suplementar" na FIG. 2 é uma ação de "reset" sobre o ECA. Esta ação de "reset" é, na sua forma matemática mais simples, uma integral ponderada por um ganho, ou seja

$$Uc_i = - \int Kc_i \text{ ECA}_i \text{ dt} \quad \text{p.u. MWh} \quad (88)$$

onde Uc é a variável dependente para o bloco funcional denominado "Controle Suplementar" na FIG. 2 e representa o sinal de comando para o motor de sincronização do regulador de velocidade e o sinal menos (-) indica que um ACE negativo significa deficiência de geração na Área e portanto o comando para o motor de sincronismo deve ser no sentido de aumentá-la.

A transformada de Laplace da Eq. (88) é

$$Uc_i(s) = - \frac{Kc_i}{s} \cdot \text{ECA}_i(s) \quad (89)$$

A FIG. 21 é a representação em diagrama de blocos da Eq.

89.

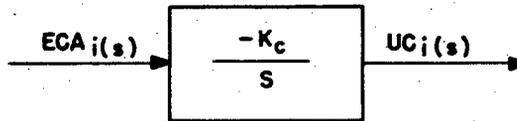


FIG. 21 - ESQUEMA DE CONTROLE INTEGRAL - DIAGRAMA DE BLOCOS

Independente do tipo de máquina motriz sob consideração, a FIG. 22 mostra o diagrama de blocos completo para um sistema de potência composto de duas Áreas de controle.

Existe um compromisso evidente entre a constante de ganho integral K_c e o parâmetro B introduzido na Eq. (81) no que diz respeito à estabilidade da malha de controle e do sistema de potência, porque enquanto B é o parâmetro que indica quão rápido o sistema pode "andar", K_c é aquele que "empurra" o mesmo.

Portanto mister se faz comentar, ainda que brevemente, a natureza da relação entre estas constantes.

Antes de mais nada, a experiência indica que a melhor maneira de ajustar a constante de ganho integral K_c é com as Áreas isoladas, pois esta é a condição operacional mais restritiva e em sendo assim a estabilidade será garantida mesmo se isto vier a acontecer. Para tal considere-se na FIG. 22 que as duas Áreas de controle estão operando isoladamente, ou seja $T_{12} = 0$ e considere-se ainda que a função de transferência do bloco denominado "Reg + Turbina" é unitária. Esta última hipótese significa que as constantes de tempo do regulador de velocidade e da turbina, T_G e T_t , respectivamente serão desprezadas*.

* Evidentemente a turbina em questão é térmica sem reaquecimento.

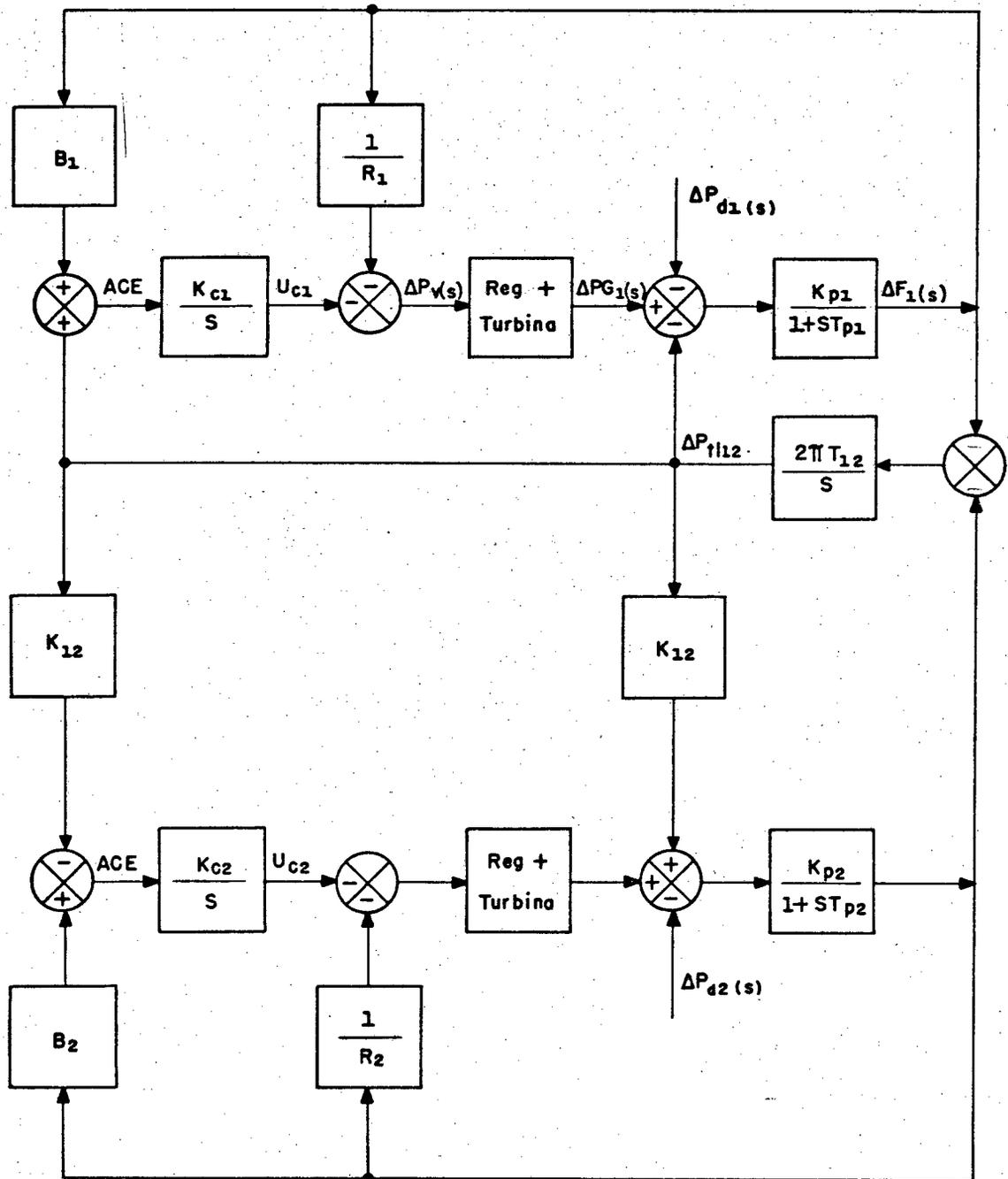


FIG. 22 - SISTEMA DE POTÊNCIA COMPOSTO DE DUAS ÁREAS

Para a análise que será feita a seguir a hipótese de desprezar estas duas constantes de tempo não é crítica porque, se por um lado elas influenciam apenas na resposta transitória, por outro lado a análise será muito mais qualitativa que quantitativa. Assim, considerando a Área 1 isolada da Área 2, com a ocorrência de uma variação de carga ΔPD_1 na Área 1, e cuja magnitude será considerada igual a um degrau e ainda levando em conta a Eq. (77) onde, por força da situação assumida, $A_1=0$ e $B_1=1$, então

$$ECA_1 = \Delta f_1(t) \quad (90)$$

a partir da FIG. 22 é possível escrever

$$\Delta F_1(s) = (\Delta PG_1(s) - \frac{\Delta PD_1(s)}{s}) \left(\frac{K_D}{1+sT_p} \right) \quad (91)$$

Por outro lado

$$\Delta PG_1(s) = -\Delta F_1(s) \left(\frac{K_{c1}}{s} + \frac{1}{R_1} \right) \quad (92)$$

Substituindo a Eq. (92) na Eq. (91) e fazendo um pouco de algebra chega-se a

$$\Delta F_1(s) = \frac{K_{P1}}{T_{P1}} \cdot \frac{\Delta PD_1(s)}{s^2 + s\left\{ \frac{(1+K_{P1}/R_1)}{T_{P1}} \right\} + K_{c1}K_{P1}/T_{P1}} \quad (93)$$

A resposta do desvio de frequência em função do tempo $\Delta f_1(t)$ é obtida pela transformação inversa da Eq. (93). Desde que a forma de $\Delta f_1(t)$ depende dos auto-valores da malha fechada, é importante analisar o polinômio de segundo grau do denominador da Eq. (93), que pode ser escrito como

$$\left(s + \frac{1+K_{P1}/R_1}{2T_{P1}} \right)^2 + \frac{K_{c1} \cdot K_{P1}}{T_{P1}} - \left(\frac{1+K_{P1}/T_{P1}}{2T_{P1}} \right)^2 \quad (94)$$

Claramente os zeros da Eq. (94) são influenciados pelo va-

lor da constante integral Kc_1 . Se

$$Kc_1 = \frac{1}{4KP_1TP_1} (1+KP_1/R_1)^2 \quad (95)$$

então o polinômio do denominador da Eq. (93) pode ser escrito como

$$(s + \gamma)^2$$

com γ real e positivo. Neste caso a expressão de $\Delta F_1(s)$ teria apenas um polo real na parte estável do plano s e a resposta oscilatória $\Delta f_1(t)$ conteria apenas um termo do tipo

$$e^{-\gamma_1 t}$$

e portanto $\Delta f_1(t)$ teria um amortecimento considerado crítico. Nestas condições o valor de Kc_1 definido pela Eq. (95) seria considerado crítico.

Se por outro lado

$$Kc_1 > Kc_1 \text{ , crítico} \quad (96)$$

a Eq. (94) poderia ser fatorada como

$$(s + \alpha)^2 + \omega^2$$

com α e ω^2 positivos e reais. Nesta situação a expressão de $\Delta F_1(s)$ conteria um par de polos complexos conjugados na parte estável do plano s e $\Delta f_1(t)$ teria oscilações amortecidas dos tipos

$$e^{-\alpha t} \text{ e } \text{sen}(\omega t) \quad \text{e} \quad e^{-\alpha t} \text{ e } \text{cos}(\omega t)$$

Segundo indica a Eq. (96), este seria o caso supercrítico.

No caso subcrítico, ou seja para

$$Kc_1 < Kc_1 \text{ , crítico} \quad (97)$$

o denominador da Eq. (93) poderia ser escrito como um produto de fatores $(s + \beta_1)(s + \beta_2)$, com β_1 e β_2 ambos positivos e reais e

a correspondente resposta não oscilatória $\Delta f_1(t)$ conteria apenas termos dos tipos

$$e^{-\beta_1 t} \quad e^{-\beta_2 t}$$

Qualquer que seja o valor escolhido para a constante K_c , a análise qualitativa feita antes mostra que o período de tempo que o esquema de controle integral gasta para agir e eventualmente anular o desvio de frequência está intimamente ligado a esta mesma constante. Nos casos em que

$$K_c < K_{c, \text{crítico}} \quad (98)$$

a resposta $\Delta f_1(t)$ é uma exponencial suave, o que é altamente satisfatório na prática, porém o tempo de "reset" de $\Delta f_1(t)$ seria bastante elevado, o que poderia provocar problemas operacionais, no mínimo desagradáveis. Por outro lado a tentativa de diminuir este "tempo de espera", tomando

$$K_c > k_{c, \text{crítico}} \quad (99)$$

torna a resposta $\Delta f_1(t)$ bastante oscilatória e a taxa de variação nestas oscilações poderia tentar fazer o sistema "andar" mais rápido que o permitido pela sua constante de regulação composta. Neste caso a perda de estabilidade seria inevitável.

Há ainda o compromisso tácito do produto $K_c B_i$ ser finito, fato, que de resto, é claramente enfatizado na Eq. (88).

A conclusão que mais se adapta aos fatos historiados nesta análise é que esta constante K_c deve ser escolhida de tal forma a satisfazer os requisitos de um tempo de resposta razoável e ao mesmo tempo garanta um comportamento estável do esquema de controle integral e, em consequência, do sistema de potência também.

Os problemas operacionais desagradáveis que poderiam advir

ao se escolher um valor subcrítico para a constante K_c estão intimamente relacionados à restauração da energia cinética inicial (nominal) do sistema. Para que tal aconteça K_c deve ser escolhida de tal forma que o sistema de controle restaure a frequência de operação usando um tempo exatamente igual aquele que a mesma esteve desviada de seu valor nominal e exatamente na mesma taxa de variação em que ocorreu o desvio. Este é o motivo pelo qual a resposta à pergunta feita no início do trabalho relativa a este fato não poderia ser afirmativa.

Capítulo 4

CASOS SIMULADOS

Os capítulos anteriores apresentaram os modelos apropriados e as variáveis relacionadas ao problema de controle suplementar. Neste capítulo está dada ênfase à implementação das diferentes filosofias em computadores digitais, bem como se discutirá os resultados obtidos na simulação com a intenção básica de sugerir uma filosofia particular para cada área. Ao final serão feitas sugestões que, se adotadas em trabalhos futuros, permitirão uma abordagem mais realista do problema de controle suplementar. Note-se também que, embora se tenha apresentado modelos para turbinas hidráulicas e térmicas, as deduções a seguir fazem referência apenas aos modelos deduzidos para estas últimas.

4.1 - DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE ESTADO

O método de integração numérica utilizado no trabalho, do qual uma descrição resumida é apresentada no Apêndice 1, exige que as equações de estado sejam inequivocamente determinada, isto é, a derivada de cada componente do vetor de estado, cuja resposta no tempo é para ser determinada, deve ser explicitada por alguma relação matemática.

Tendo usado somente matemática operacional na modelagem, o desafio que se impões agora é passar destes modelos escritos no domínio da frequência complexa s para o domínio do tempo com a menor quantidade possível de esforço físico. Este desafio foi superado usando o artifício simples descrito a seguir com a ajuda do diagrama de bloco da FIG. 23.

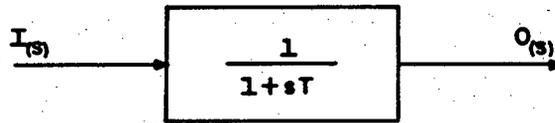


FIG. 23 - DIAGRAMA DE BLOCO EM MALHA ABERTA

A relação entre $I(s)$ e $O(s)$ nesta figura é dado por

$$O(s) = I(s) \left(\frac{1}{1+sT} \right) \quad (100)$$

ou

$$\{I(s) - O(s)\} = sT O(s) \quad (101)$$

ou ainda

$$O(s) = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{s} \{I(s) - O(s)\} \quad (102)$$

A FIG. 24 é o diagrama de bloco representativo da Eq.(102)

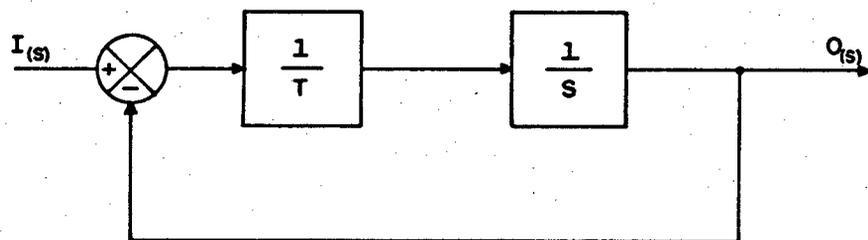


FIG. 24 - MALHA FECHADA REPRESENTATIVA DA FIG. 23

O artifício utilizado é baseado no fato que correspondente à cada malha aberta existe sempre uma malha fechada equivalente onde, via de regra, é mais fácil isolar cada integrador e portanto identificar os estados do sistema e suas respectivas derivadas e assim a partir daí escrever imediatamente as equações de estado no domínio do tempo.

Seja, por exemplo, o sistema de potência da FIG. 25

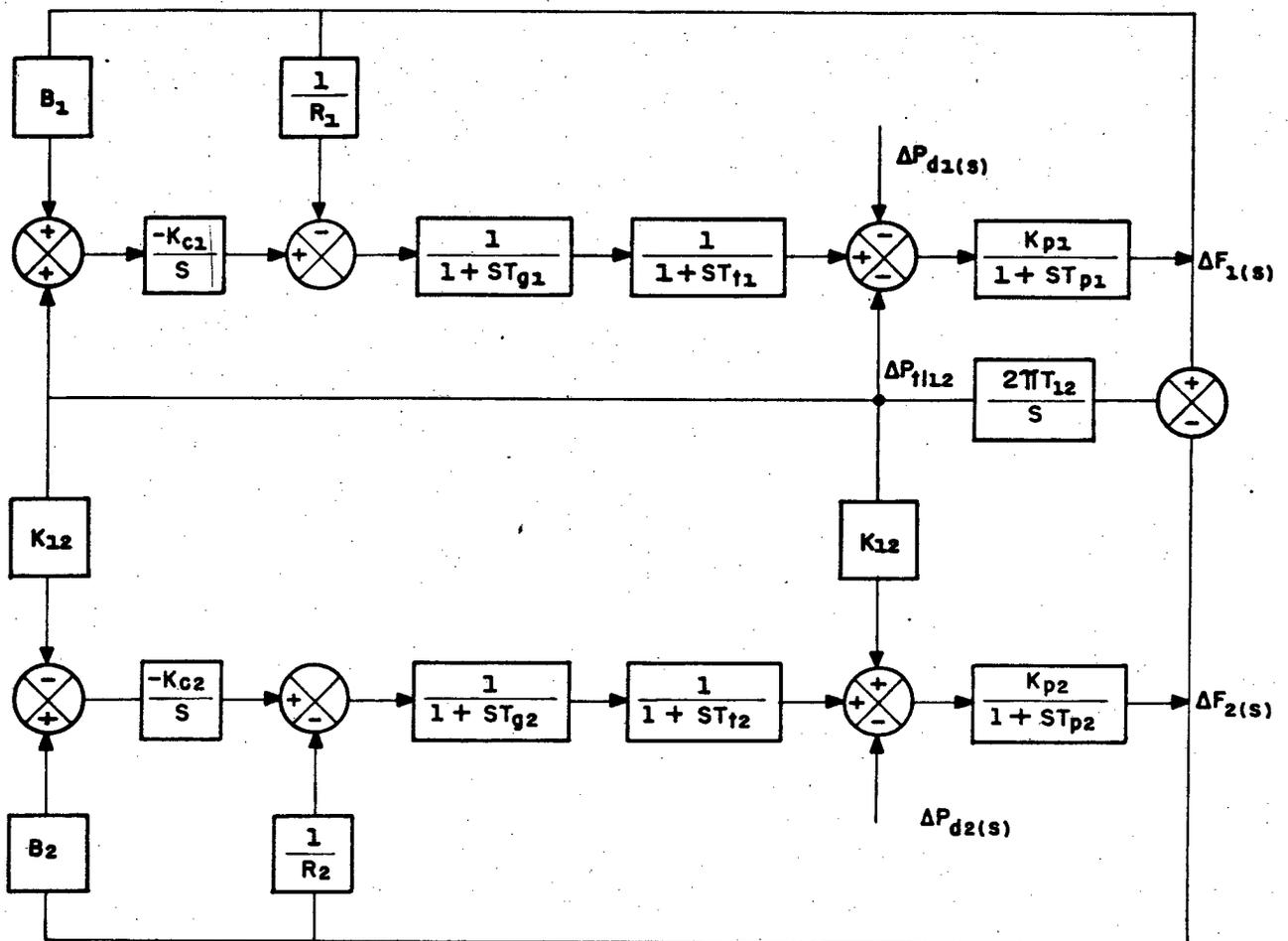


FIG. 25 - SISTEMA DE POTÊNCIA COM DUAS ÁREAS (TURBINAS TÉRMICAS)

A este sistema de duas áreas, e que será o mesmo nos casos a serem simulados, foi aplicado o expediente de transformar todas as malhas abertas em malhas fechadas de acordo com o artifício descrito antes. O resultado é o diagrama de blocos da FIG. 26 .

De acordo com a FIG. 26 as equações de estado para este sistema podem ser escritas do domínio do tempo como:

$$\text{ENT}(1) = \{ \text{SAI}(4) * B1 + \text{SAI}(5) \} * K1$$

$$\text{ENT}(2) = \{ -\text{SAI}(1) - \text{SAI}(4)/R1 - \text{SAI}(2) \} * 1/TG1$$

$$\text{ENT}(3) = \{ \text{SAI}(2) - \text{SAI}(3) \} * 1/TT1$$

$$\text{ENT}(4) = \{ \text{SAI}(3) - \text{SAI}(4)/K1 - \text{SAI}(5) - \Delta PD1 \} * K1/TP1$$

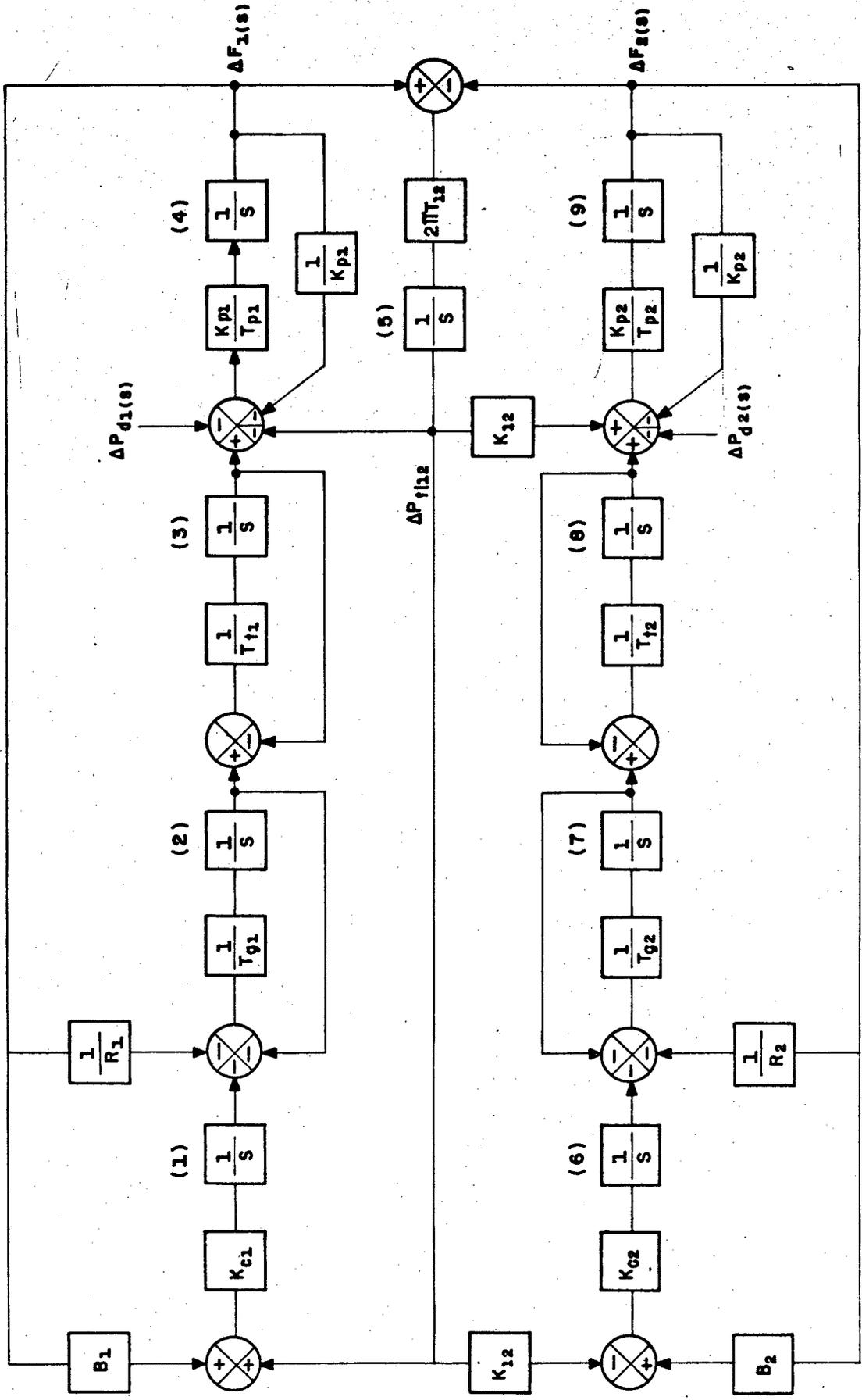


FIG. 26 - REPRESENTAÇÃO DA FIG. 25 EM MALHA ABERTA

$$\text{ENT}(5) = \{ \text{SAI}(4) - \text{SAI}(9) \} * 2\pi * T_{12}$$

$$\text{ENT}(6) = \{ \text{SAI}(9) * B2 - \text{SAI}(5) \} * KC2$$

$$\text{ENT}(7) = \{ -\text{SAI}(6) - \text{SAI}(9)/R2 - \text{SAI}(7) \} * 1/TG2$$

$$\text{ENT}(8) = \{ \text{SAI}(7) - \text{SAI}(8) \} * 1/T_{T2}$$

$$\text{ENT}(9) = \{ \text{SAI}(8) + \text{SAI}(5) - \text{SAI}(9)/KP2 - \Delta PD2 \} * KP2/TP2$$

onde ENT(I) e SAI(I) representam a derivada e o vetor de estado, respectivamente. O Apêndice 2 apresenta a descrição e os valores tomados para todas as variáveis utilizadas no programa de computação.

Na formulação das equações acima observa-se que a derivada do vetor de estado no tempo $t=t_n$, por exemplo, deve ser calculada usando componentes do vetor de estado em $t=t_n$ também. Certamente não existe integrador digital discreto capaz de conseguir tal façanha e à primeira vista parece que o cálculo do vetor de estado está atrasado do cálculo de sua derivada de pelo menos um intervalo de integração. Entretanto, embutida na rotina de integração utilizada, existe uma maneira simples de corrigir o problema, como pode ser verificado na sua descrição no Apêndice 1.

4.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROGRAMA DE COMPUTADOR

O programa de computador desenvolvido para integrar as equações de estado apresenta em sua estrutura um programa principal e duas subrotinas, tendo a primeira delas a finalidade básica de formular as equações de estado para cada área, de acordo com seu tipo - hidráulica ou térmica - e com seu modo de operação, bem como integrar estas equações. A segunda subrotina, chamada pela primeira, foi desenvolvida especialmente para plotar curvas em impressora de linha comum, e portanto sua única finalidade é construir as curvas que se deseja ver e plotá-las com o sinal gráfico escolhido

para tal o programa foi escrito em FORTRAN, e sua listagem é apresentada no Apêndice 3.

A FIG. 27 apresenta o fluxograma geral usado.

O sistema simulado consiste de nove equações diferenciais ordinárias de primeira ordem, transformadas em equações algébricas com a utilização da técnica de espaço de estado. Para evitar problemas de instabilidade numérica com o algoritmo de integração, estabeleceu-se a princípio que o passo de integração ficaria entre dez e vinte por cento da menor constante de tempo presente no sistema. Como não houve problema algum neste intervalo adotou-se o maior valor, com a finalidade de minimizar o tempo de computação. O espaço de memória utilizado foi em torno de 60 K palavras, o que é, de certa forma, elevado. Porém, a passagem de argumentos para as subrotinas em áreas comuns reduziria consideravelmente a alocação de memória.

4.3 - CASOS SIMULADOS

O sistema usado nos casos simulados é aquele de duas áreas iguais da FIG. 25. Os parâmetros fixos, com os respectivos valores adotados no trabalho, se encontram no Apêndice 2.

Em todas as simulações feitas com o sistema plotaram-se os primeiros vinte segundos para as quatro variáveis de interesse, nominalmente o ECA nas duas áreas e o desvio de frequência e potência nas interligações, após a aplicação do degrau de carga na área 1. A suposição inicial era que imediatamente antes da variação de carga o sistema estava operando em 60 Hertz e com uma potência interligada de zero Megawatts.

Foram simulados os seguintes casos

CASO 1 - Área 1 operando em CONTROLE DE CARGA- FREQUÊNCIA

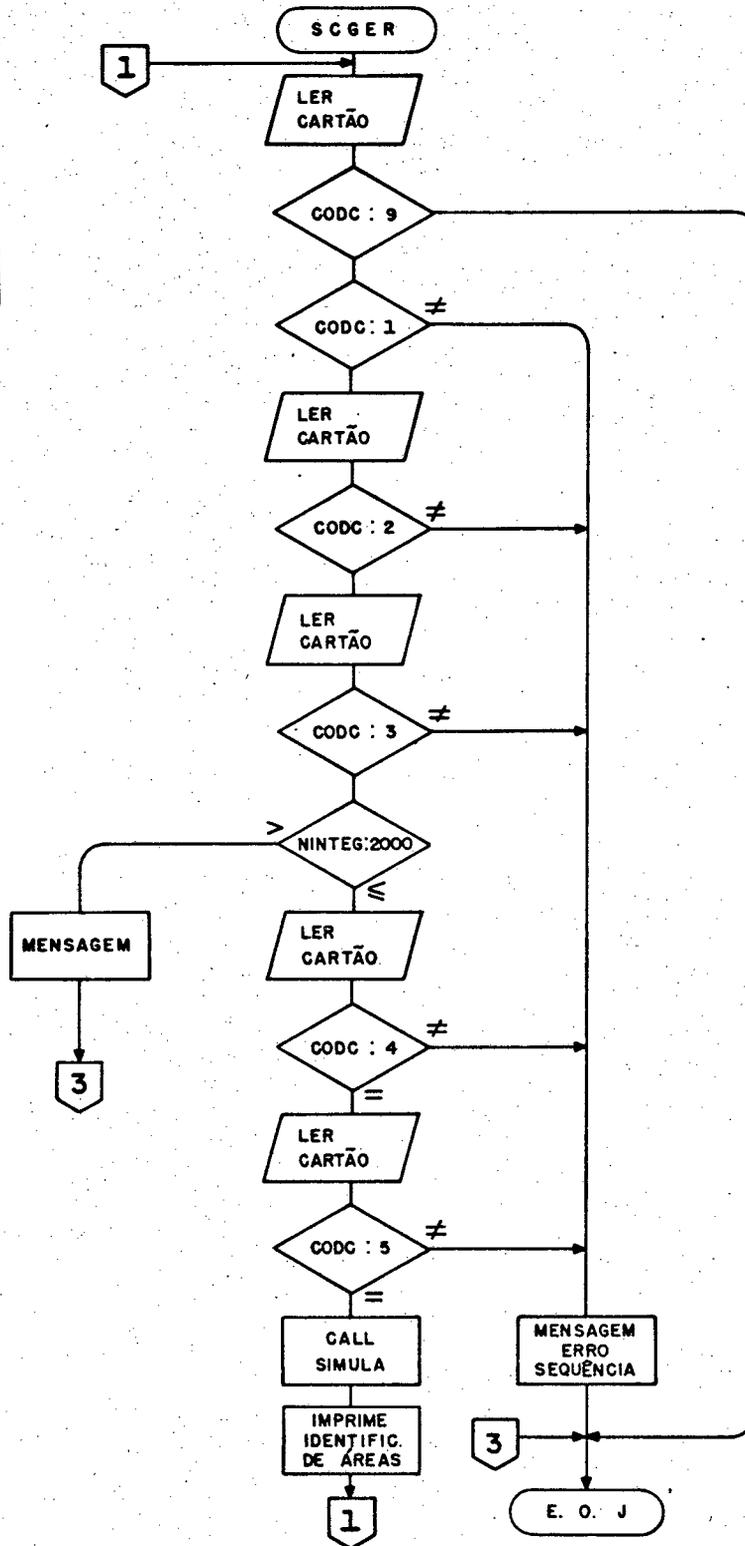


FIG. 27 - SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE GERAÇÃO (SCGER) -
FLUXOGRAMA GERAL

PONDERADO.

Área 2 operando em CONTROLE DE CARGA- FREQUÊNCIA
PONDERADO.

CASO 2 - Área 1 operando em CONTROLE DE CARGA - FREQUÊNCIA
PONDERADO

Área 2 operando em CONTROLE PLANO DE INTERLIGAÇÃO

CASO 3 - Área 1 operando em CONTROLE DE CARGA - FREQUÊNCIA
PONDERADO

Área 2 operando em CONTROLE PLANO DE FREQUÊNCIA

CASO 4 - Área 1 operando em CONTROLE PLANO DE INTERLIGAÇÃO

Área 2 operando em CONTROLE PLANO DE FREQUÊNCIA

CASO 5 - Área 1 operando em CONTROLE PLANO DE INTERLIGAÇÃO

Área 2 operando em CONTROLE PLANO DE INTERLIGAÇÃO

CASO 6 - Área 1 operando em CONTROLE PLANO DE FREQUÊNCIA

Área 2 operando em CONTROLE PLANO DE FREQUÊNCIA

As curvas que representam a resposta de cada caso simulado estão mostradas no Apêndice 4. Como pode ser visto lá os casos 5 e 6, muito embora o ECA seja anulado nas duas áreas, apresentam, no fim da regulação suplementar, erros estáticos na frequência e potência interligada, respectivamente, fatos estes que negam aplicabilidade prática a estas combinações de filosofias.

4.4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apresentou-se e discutiu-se o problema de Controle Suplementar neste trabalho em sua forma convencional. Em outras palavras, as especificações e objetivos da regulação suplementar surgiram de considerações de regime permanente apenas: anulação do ECA nas áreas, ou mais precisamente anulação dos erros de potência e frequência provocados por distúrbios no sistema. Assim chegou-

se à Eq. (88), representativa da estratégia adotada, usando por assim dizer, um raciocínio quase heurístico. De acordo com as deduções apresentadas no capítulo 3 nada há que limite a quantidade U_c , a energia de controle, calculada a partir da equação referida antes, o que pode conduzir a aplicações de esforços de controle tão elevados quando desnecessários ao mecanismo de referência carga / velocidade.

Modernamente, a tendência é generalizar o problema. Assim ao invés de se definir U_c como sendo apenas a integral do ECA, procura-se obter esta quantidade a partir da minimização de um funcional, incluindo também especificações de regime transitório, o que inibirá a atividade do sistema de controle suplementar para desvios de duração efêmera. Por outro lado a utilização da técnica de espaço de estado, um método poderoso e de fácil utilização, sugere o uso de modelos linearizados, mesmo para processos não lineares como é aquele que se verifica em um sistema de potência. Portanto a estratégia de controle U_c , obtida em tal meio ambiente não garante a estabilidade do sistema³¹. Assim, em trabalhos onde se pretenda um alcance maior, a inclusão de aspectos de estabilidade do sistema é uma imposição.

Como já foi enfatizado antes, o trabalho abordou o problema na sua versão convencional, utilizando um modelo linear para o sistema de potência, o que limita a validade da análise dos resultados obtidos ao domínio das pequenas oscilações. Para efeito de comparação entre as estratégias fixou-se a combinação de parâmetros nas duas áreas, mais precisamente, o fator de polarização da frequência (ou "bias") e a constante de ganho integral, o que significa que para uma combinação de parâmetros que não aquela adotada a análise pode levar a sugestões diferentes daquela que se

faz ao final do trabalho.

Para ter um melhor sentimento do comportamento do esquema de controle integral as curvas do Apêndice 4 incluem também a plotagem da integral do ECA. Este sinal é indicativo da inabilidade da área em atender seus compromissos de regulação para com o sistema interligado, através de seu esquema de controle complementar³². A plotagem deste valor é também útil no sentido de detectar as causas da inabilidade do esquema de controle, bem como para indicar quanto e em que extensão os compromissos da área não estão sendo cumpridos.

A análise dos resultados levará em conta não apenas o comportamento dinâmico do sistema, mas também a suavidade da regulação complementar, ou seja, a não interação entre os sistemas de controle das duas áreas, a capacidade de auxílio mútuo e o tempo de resposta, entendendo-se por tal o tempo total gasto pela regulação complementar para anular os desvios de potência e frequência.

Antes de analisar cada um dos casos simulados apresentam-se as unidades em que estão plotadas cada uma das curvas do Apêndice 4.

- a) Frequência - Hz
- b) Potência interligada - p.u. MW
- c) ECA - p.u. MW
- d) Integral do ECA - p.u. MWh

O erro de controle de área está mostrado em uma escala ampliada por um fator três (3).

4.4.1 - CASO 1

Nas condições apresentadas no trabalho, esta combinação de filosofias caracteriza-se por apresentar um número acentuado de

de oscilações no ECA nas duas áreas, bem como interação entre as ações de controle suplementar até, aproximadamente 5,5 segundos. Daí para frente, embora continuem as oscilações nos ECA's, a ação suplementar faz-se presente apenas na área 1, onde ocorreu a variação de carga, o que caracteriza um comportamento geral bom. Nota-se que embora haja interação entre as áreas, a ação da regulação suplementar é uma ação de efeito estabilizante, desde que a taxa de variação na ação de controle em uma área é sempre oposta àquela da outra, o que significa a procura de um ponto de equilíbrio.

Os objetivos da regulação suplementar, como estabelecidos nesta tese, são atingidos e o tempo de resposta para este esquema é de aproximadamente 16 segundos.

A FIG. 36 (Apêndice 4) mostra as curvas obtidas.

4.4.2 - CASO 2

Esta combinação apresenta um comportamento dinâmico semelhante ao do caso 1, com oscilações no ECA nas duas áreas e interação entre os respectivos controles suplementares. Há porém, uma diferença marcante. Enquanto a combinação usada no caso 1 apresenta oscilações na ação de controle na área 2, neste caso a reação do sistema de controle suplementar na mesma área é executada a partir de 1,2 segundos, em taxa decrescente e de maneira bastante suave, com uma característica essencialmente exponencial, o que é benéfico para o sistema. A interação entre as duas áreas faz-se presente até aproximadamente os 4,5 segundos. O tempo de resposta neste esquema é de 10 segundos, bem melhor que no caso anterior, e os objetivos da regulação suplementar são também atingidos.

As curvas de resposta encontram-se na FIG. 37 do Apêndice

4.

4.4.3 - CASO 3

Este caso é também caracterizado pela presença de oscilações no ECA nas duas áreas e interação entre as regulações suplementares. Nota-se que a taxa de variação positiva na ação de controle exercida na área 1 (FIG. 38 - curva C) significa produção excessiva de potência nesta área. A resposta da área 2 (FIG. 38 - curva D) é no sentido de injetar mais potência no sistema, pois que a mesma apresenta também, inicialmente, uma taxa de variação crescente no seu esforço de controle. Logo em seguida as duas áreas são comandadas para diminuir suas gerações, com as interações entre as mesmas persistindo até 7,5 segundos, aproximadamente. O ponto de importância parece ser que a modalidade CONTROLE PLANO DE FREQUÊNCIA (CPF), por ser responsiva apenas ao comportamento da frequência, age de uma maneira que nem sempre é ou pode ser a melhor para o sistema interligado, como mostra a FIG. 38 do Apêndice 4.

A combinação de filosofias usada neste caso, embora, inicialmente, apresente uma ação de controle aparentemente indevida, na área 2, atende aos objetivos da regulação suplementar com um tempo de resposta de aproximadamente 13,0 segundos. Destaque-se a eficácia da modalidade usada na área 1, cuja medida pode ser dada pelo comportamento do fluxo de potência na interligação.

4.4.4 - CASO 4

A utilização desta combinação de filosofias resultou também em interação entre os controles suplementares das duas áreas e oscilações peculiares nos ECA's. Nota-se que, na área 2, por exemplo, o erro de controle de área apresenta oscilações de sinal po-

sitivo de 1,8 a 6,6 segundos , e de sinal negativo de 6,6 a 11,5 segundos. A ação de controle exercida nesta área, curva D- FIG.39, apresenta uma taxa de variação positiva até 2,0 segundos, aproximadamente quando muda de sinal e, na ausência de um fator de amortecimento adequado passa para o semi-plano negativo aos 5,0 segundos. Finalmente aos 9,0 segundos anula-se, deixando que, toda a ação de controle suplementar seja exercida na área onde ocorreu a variação de carga. Embora este esquema atenda aos objetivos, a ação da área 2 dificulta o esforço de controle exercido na área 1. O tempo de resposta para este esquema é pouco inferior aos 13,0 segundos.

Existem algumas características peculiares à modalidade CPF, que estão implícitas nas curvas apresentadas na FIG. 39. A utilização desta modalidade exige um fator de polarização de frequência (bias) elevado , por causa da definição desta filosofia, o que implica em uma escolha bastante cuidadosa para a constante de ganho integral K_c . Além disso, a área , na qual se utiliza tal filosofia deve ter elevada capacidade de regulação. No caso em questão a área 2 deve responder com aproximadamente duzentos (200) megawatts para o desvio de um décimo (1/10) de hertz na frequência. Esta é uma restrição operacional importante, e, hoje, no Brasil , muito poucas companhias teriam condições de operar em tal modalidade.

Quanto à assistência mútua umas das mais fortes razões para interligar sistemas individuais, as curvas do Apêndice 4 mostram que as ações simultâneas da regulação suplementar nos casos 1 e 2 se compensam, na tentativa de encontrar rapidamente um ponto de equilíbrio, enquanto que nos casos 3 e 4 as ações necessitam de uma maior coordenação para evitar que o sistema seja levado à ins-

tabilidade na presença de oscilações um pouco maiores.

4.4.5 - CASO 5

Como já era de se esperar, esta combinação de estratégias não atende aos objetivos da regulação suplementar, desde que a operação em CONTROLE PLANO DE INTERLIGAÇÃO (CPI) responde apenas a variações de fluxo de potência nas interligações e portanto haverá um erro estático na frequência ao final da ação de controle suplementar, como mostra a FIG. 40. Este fato nega aplicação a este esquema. Note-se, porém, a ação suave desta modalidade de controle; a acomodação da variação de carga na área 1 e o excelente tempo de resposta do esquema. A FIG. 40 apresenta os resultados obtidos.

4.4.6 - CASO 6

Esta combinação de filosofias também não satisfaz às necessidades do sistema, no que diz respeito a regulação suplementar. Este caso, bem como o anterior foi apresentado apenas para provar que o esquema de regulação suplementar não satisfaz aos objetivos de regime permanente do sistema quando se usa modos de operação iguais nas áreas, a menos que este modo seja CONTROLE DE CARGA FREQUÊNCIA PONDERADO (CCFP).

Na FIG. 41, que apresenta os resultados obtidos com esta combinação de filosofias, nota-se ainda que o acréscimo de carga é absorvido conjuntamente pelas suas áreas e o tempo de resposta, de certa forma elevado.

CONCLUSÕES

De acôrdo com o que foi estabelecido na introdução este trabalho se propõe a atingir quatro metas:

- a) Produzir as curvas que representem o comportamento dinâmico de um Sistema de Potência sob diferentes modalidades de regulação suplementar;
- b) Analisar os resultados obtidos;
- c) Apresentar aspectos do sistema nacional de transmissão para fins de operação automatizada;
- d) Apresentar o esquema de Controle desenvolvido para aplicação no sistema elétrico da COPEL.

Para atingir o primeiro objetivo um relativo esforço foi dispendido no desenvolvimento do modelo apropriado para cada equipamento elétrico envolvido no processo de controle e na resolução dos problemas computacionais pertinentes, quais sejam integração das equações de estado e plotagem dos resultados. É importante notar que estes problemas foram resolvidos sem perder de vista a compreensão do problema, ou seja sempre que julgado necessário foram introduzidos, paralelamente aos desenvolvimentos matemáticos, conceitos e definições pertinentes ao problema de regulação suplementar.

Na análise dos resultados mostra-se que várias combinações de estratégias satisfazem as exigências de regime permanente da regulação suplementar. Portanto esta não pode ser a única medida para a escolha de uma dada modalidade. Dêste modo incluíram-se na análise dos resultados considerações sobre o comportamento dinâmico das respostas (a presença ou não de oscilações na consecução dos objetivos estabelecidos), a suavidade das ações

de regulação (não interação entre os controles suplementares das áreas) e o tempo de resposta de cada combinação. Sob todos estes aspectos, o esquema que apresentou melhor comportamento é aquele do caso 2.

Este é, porém, um resultado que não pode ser generalizado porque as filosofias de controle foram aplicadas em cima de um controlador com uma combinação fixa de parâmetros (K_c e B) e uma escolha diferente, no sentido ótimo ou não, pode mudar os resultados obtidos. Por exemplo, no trabalho foi usado um valor de B exatamente igual à característica de regulação natural. Esta escolha permite desacoplamento, ou não interação, em baixas frequências, o que é claramente enfatizado nas curvas do Apêndice 4. Porém, a atribuição de um valor maior a esta variável, para possibilitar assistência mútua entre as áreas, possivelmente, alteraria o comportamento dos esquemas de controle em baixas frequências. Do mesmo modo, a adoção de melhores valores para a constante K_c no caso 3, melhores no sentido de aperfeiçoar a coordenação das ações de controle entre as áreas, poderia fazer este esquema apresentar um desempenho geral bem melhor, o que poderia resultar, inclusive, na sua escolha.

De modo geral, embora os resultados numéricos sejam relativos, os passos básicos para análise e interpretação dos resultados de uma dada filosofia de controle suplementar, como apresentados neste trabalho, permanecem válidos.

O capítulo a seguir é introduzido para satisfazer aos demais objetivos desta tese.

SUGESTÕES

Para abordar o problema de controle suplementar de uma maneira mais próxima do que são as implementações digitais modernas, sugere-se que os seguintes aspectos sejam investigados e/ou utilizados em trabalhos futuros:

- 1 - Modelar o sistema de potência por grupos geradores para permitir que dentro de uma determinada área seja possível distinguir os efeitos provocados por unidade com responsabilidade de controle suplementar e as não comandadas.
- 2 - Basear os sinais de controle suplementar em erros de controles das unidades (ECU) - a diferença entre a saída real da unidade e aquela desejada para mesma. Nesta situação o ECA seria usado como uma medida para implementação on-line de modalidades de controle tais como "Controle de Comando", "Controle Permissivo" e "Controle Integral"*.
- 3 - Incluir, na estratégia de controle adotada, especificações de regime transitório para melhorar a qualidade do controle exercido, bem como aspectos de estabilidade para garantir um comportamento estável do sistema para qualquer tipo de oscilação.

* Para definição de tais modalidades de controle ver referência 7.

- 4 - Incluir, no programa de simulação , lógica para suportar aspectos econômicos do problema, tais como minimização de custos de produção em sistemas predominantemente técnicos, coordenação eletro-hidráulica em sistemas mistos ou ainda utilização racional de disponibilidades de água em sistemas predominantemente hidráulicos.

Capítulo 5

IMPLEMENTAÇÃO

Nos capítulos anteriores mostrou-se o instrumental utilizado na investigação de um Sistema de Potência quando submetido a uma dada combinação de estratégias de controle suplementar.

Existem, entretanto, diferenças marcantes entre uma simulação e a implantação prática de um esquema de controle. Na vida real, o sistema a ser controlado existe, o que dispensa o desenvolvimento de modelo, o esquema de controle deve ser desenvolvido para controlar várias unidades geradoras ao mesmo tempo, o que evidentemente se opõe à idéia de uma máquina equivalente na área, os pontos de interligação são vários e geralmente bastante separados uns dos outros, o que implica na necessidade de telemedir estes pontos a fim de obter o intercâmbio líquido de uma dada área, e, finalmente, a frequência também deve ser telemedida, pois desde que não se utilizam modelos é impossível obtê-la a partir da solução de equações matemáticas.

A simulação, porém, apresenta fatos importantíssimos, porque é a partir dela que se pode estabelecer com clareza a melhor modalidade de operação para as várias áreas que compõem um sistema interligado bem como averiguar o ajuste correto do "bias" para as várias situações de carga e geração do sistema*.

* Estes fatos são tão importantes que o GCOI-Sul decidiu criar a CEMO, comissão cuja finalidade principal é estudar a modalidade de operação para as áreas que compõem o sistema interligado do Sul do país bem como apresentar subsídios para o ajuste do "bias" de cada sistema individual e ainda investigar aspectos operativos comerciais decorrentes da operação automatizada. O autor participa desta comissão como representante da COPEL.

Neste capítulo pretende-se apresentar a situação do sistema brasileiro em termos de operação automatizada bem como a implementação prática de um sistema de controle automático de geração em tempo-real.

5.1 - A realidade brasileira hoje

A Fig. 28 apresenta uma concepção daquilo que será o sistema nacional de transmissão para fins de operação interligada.

A necessidade de dividir em áreas de controle um sistema de aproximadamente 35 mil megawatts decorre da impraticabilidade de responsabilizar uma única usina pela regulação do sistema inteiro devido às diversas limitações técnicas, econômicas e comerciais existentes, sendo portanto a divisão um imperativo com cada área devendo absorver suas próprias variações de carga em condições normais de operação.

No Brasil o conceito de área de controle confunde-se com o conceito de área de concessão, na maioria absoluta dos casos, porque, via de regra, cada sistema individual constitui uma área de controle, salvo casos particulares onde a ausência de equipamentos automáticos de controle e/ou a falta de capacidade regulativa determina que as instalações de determinada empresa, para efeito de controle apenas, fiquem dentro da área de controle de outras concessionárias, como é o caso da CELESC na região sul, por exemplo, cuja regulação suplementar a nível de sistema interligado, será responsabilidade da ELETROSUL, possivelmente.

5.2 - A necessidade de operação automática

A rigor, operando manualmente, a uma dada área só é possível controlar a frequência do sistema ou o intercâmbio de po-

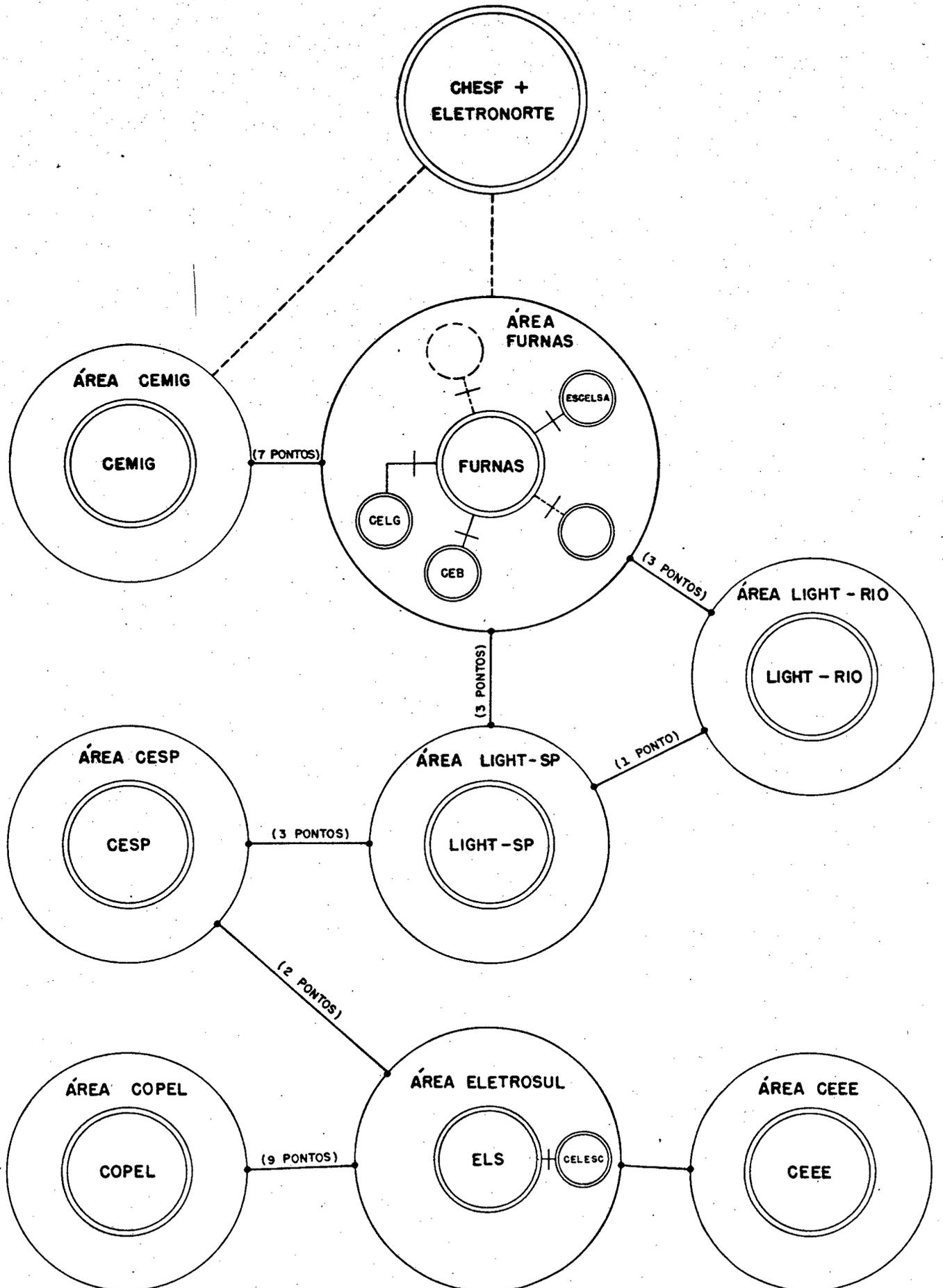


FIG. 28 - CONCEPÇÃO DO SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISSÃO PARA FINS DE OPERAÇÃO.

tência. Nesta situação a área que tem a função de controlar a frequência recebe encargos regulativos muito pesados dado que ela será, indiretamente, responsável pela correção de acréscimos de carga tanto remotos quanto locais. Por outro lado a correção de intercâmbio apenas afigura-se como um modo de regulação egoísta, desde que a única preocupação da área é com o que se passa dentro de suas fronteiras, prejudicando-se assim uma das mais importantes razões, se não a mais importante, para interligar sistemas individuais, que é a assistência mútua. Além do mais a descoordenação de ações regulativas, exercidas individualmente é notória. O caso particular da COPEL é um exemplo típico disto, onde a operação manual é feita com o intuito único de controlar o intercâmbio líquido da área. O operador do sistema coleta informações de fluxo de potência das interligações a cada 10 ou 15 minutos, calcula o valor líquido e compara com o programado para a hora. Se a diferença estiver dentro de 15 megawatts nenhuma ação de controle é executada. A inatividade no caso decorre do facto de as leituras não terem sido simultâneas e serem de precisão discutível e além do mais nada assegura que no instante da ação de controle a situação do sistema seja a mesma do momento em que ocorreu a primeira leitura, pois deste instante até a decisão final se terão passados aproximadamente dois minutos. Existe, porém, um motivo bem mais poderoso para que o operador assim proceda. Ele simplesmente não sabe o que estarão fazendo os operadores dos sistemas vizinhos, ou seja, não há garantia alguma de que as ações de controle serão coordenadas.

Este tipo de controle, evidentemente inadequado, terá grandemente contribuído para as oscilações assimétricas de potência, observáveis em pontos do sistema, cuja consequência mais

desagradável é o fluxo involuntário de energia, totalmente incontrolável com os recursos atualmente disponíveis *.

A melhoria da qualidade do controle de geração, é, portanto, uma imposição na empresa hoje.

O sistema automático de controle, atualmente em testes na COPEL, permitirá executar não apenas 4 ou 5 ações de controle por hora, mas uma média de 600 a 800 ações, com tempos de varredura de 3 segundos. Esta melhoria trará, inegavelmente, reflexos econômicos positivos para a empresa, além de dar mais segurança à operação do sistema interligado e possibilitar a aquisição de uma série enorme de dados facilitando sobremaneira a análise da operação.

5.3 - Um caso real

Será apresentado agora o esquema básico de um caso real, nominalmente aquele que será implementado na COPEL, um sistema completamente digital onde todas as decisões lógicas são tomadas nos computadores da estação central a partir de valores que chegam, produto de varreduras feitas no sistema de potência. Neste tipo de sistema as unidades são comandadas individualmente com o sinal de controle proporcional aos seus próprios erros e não ao erro da área em si, o que traz vantagens evidentes, do ponto de vista de qualidade do controle e distribuição de geração entre as unidades.

* Segundo o balanço geral da empresa, em 1977, 26 por cento do total da energia vendida foi comprada de outras concessionárias. A otimização em hum por cento permitiria economizar aproximadamente 20 milhões de cruzeiros.

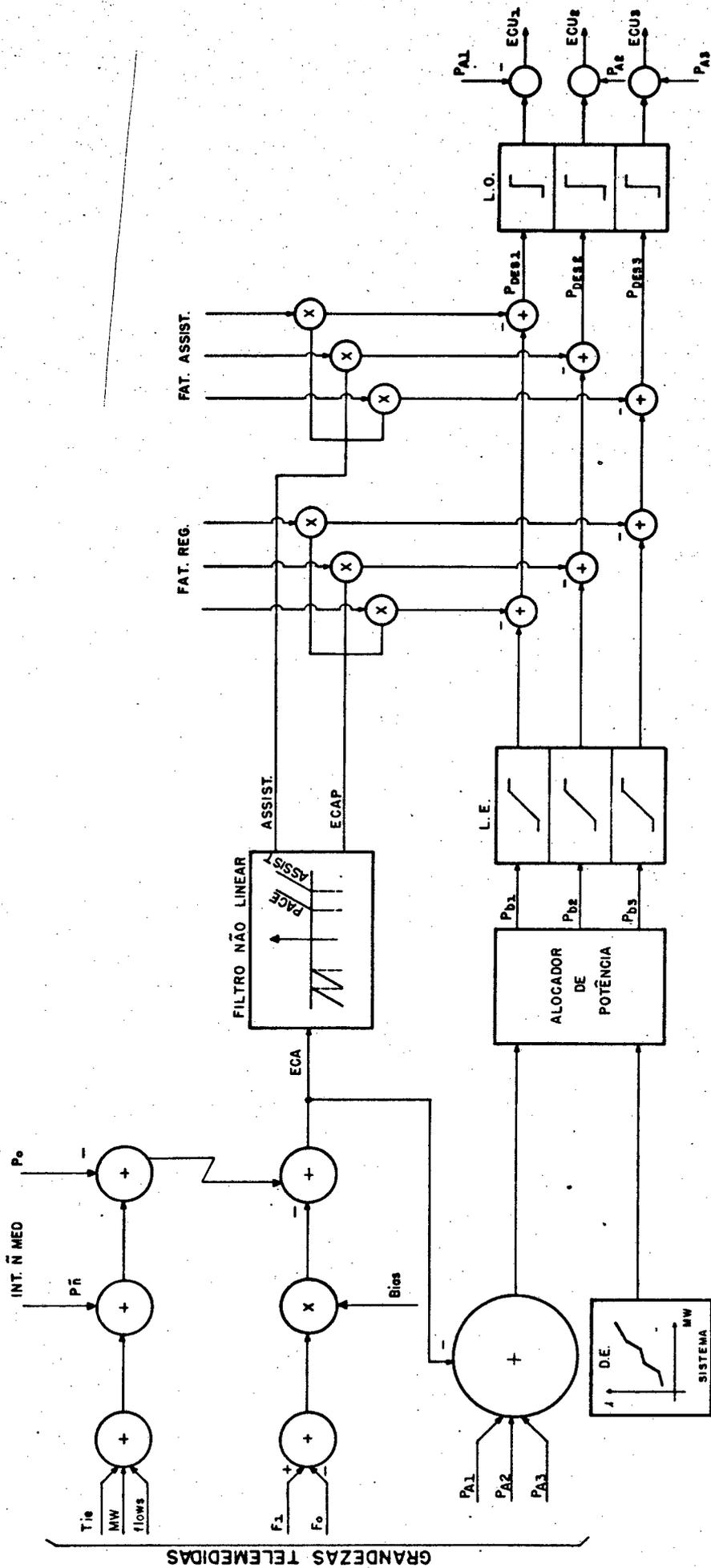


FIG. 29 - CÁLCULO DE ECU
 FLUXO DE DADOS PARA TRES UNIDADES
 EM CONTROLE AUTOMÁTICO

A Fig. 29 apresenta o fluxo de dados, através do "software" do sistema de controle, para o cálculo do ERRO DE CONTROLE DE UNIDADES (ECU) no caso de 3 unidades sob controle automático. A partir da telemedição do fluxo de potência nas interligações, da telemedição da frequência real e das entradas manuais do intercâmbio líquido não medido (ou telemedido), do intercâmbio programado para a hora em questão e da frequência programada para o sistema é possível calcular o ERRO DE CONTROLE DE ÁREA (ECA), qualquer que tenha sido a modalidade de operação da área sugerida pela simulação feita.

Como pode ser observado o ECA é calculado a partir de quantidades que flutuam continuamente, oscilando no período de uns poucos segundos. A ação de controle suplementar aplicada em um sistema de potência não deve procurar controlar ou responder a oscilações de períodos tão breves, pois considerando as constantes de tempo de turbinas e reguladores de velocidade, qualquer tentativa de controle tais oscilações seriam totalmente inefetivas e portanto desnecessárias.

Usam-se, tipicamente, dois métodos para remover do ECA tais tipos de oscilação: suavização temporal do sinal e filtragem com zona morta. No caso da COPEL utiliza-se o segundo método, o que está ilustrado na Fig. 30. O filtro apresentado nesta figura permite que o ECA flutue dentro da zona morta de controle (ou regulação) sem que haja ação alguma de controle. Este é o modo de operação normal e corresponde à região I na Fig. 30. Se porém, o ECA exceder o ECA ZM duas vezes consecutivas na mesma direção, então o valor do ECA processado (ECA P) é feito igual a

$$ECA P = \pm (ECA - ECA ZM) * GR$$

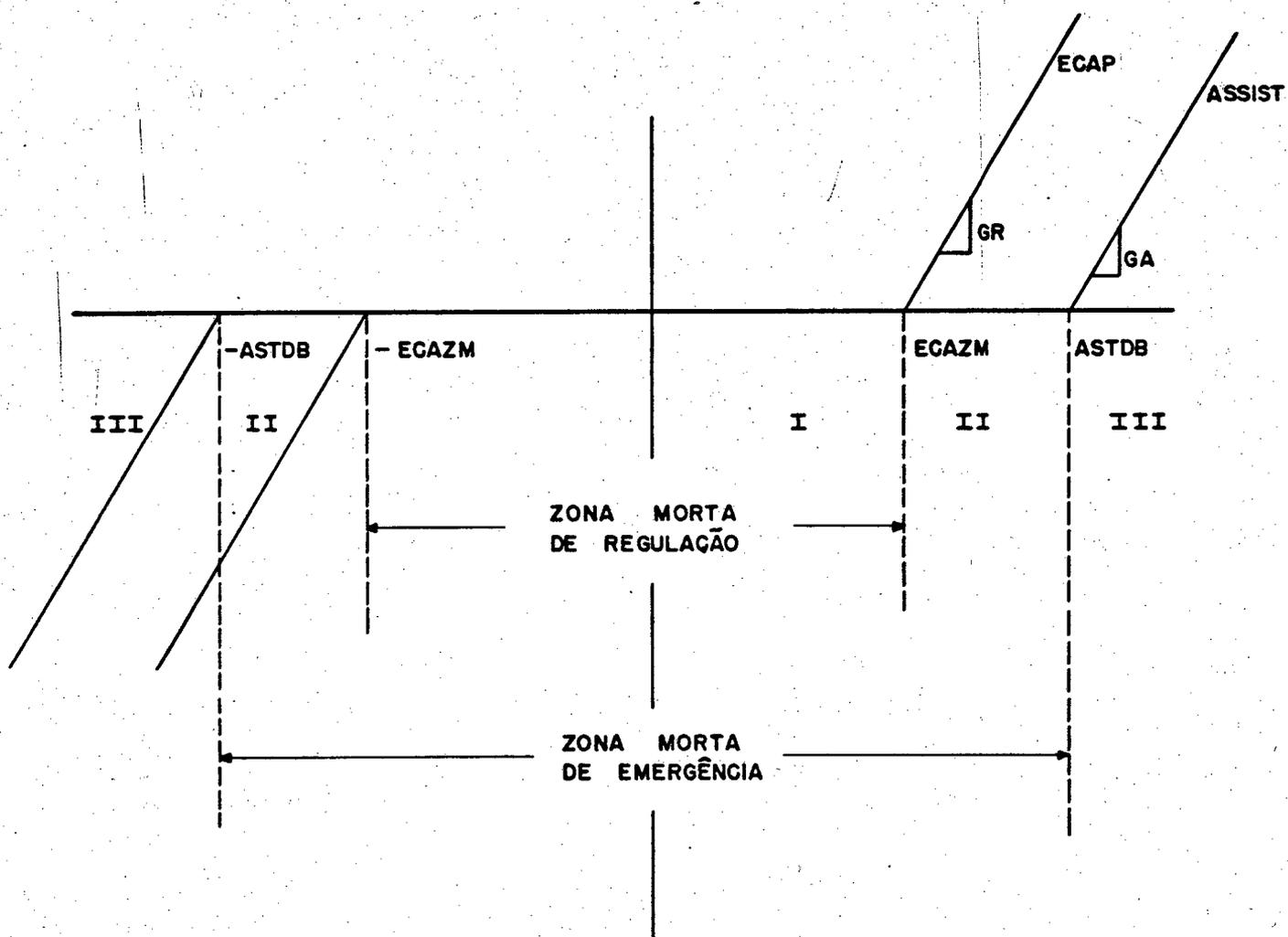


FIG. 30 - FILTRO NÃO LINEAR PARA O ECA

Este modo de operação é normalmente referido como modo de regulação e corresponde a região II na Fig. 30.

Se, ainda o ECA exceder a zona morta de emergência ASTDB, considerada de emergência para efeito de controle apenas, então haverá uma segunda componente a ser corrigida e cujo valor é dado por

$$\text{ASSIST} = \frac{1}{GR} \cdot (\text{ECA} - \text{ASTDB}) * \text{GA}$$

Os valores GR e GA são multiplicadores que dependem do sistema e são usados apenas para acelerar a resposta daquelas unidades às quais se atribuem ações de regulação.

Uma vez calculado o ECA e tendo telemedido as gerações ativas das unidades sob controle automático é então possível fornecer ao bloco denominado Alocador de Potência na Fig. 29, a geração a ser despachada economicamente, o que em outras palavras significa o montante de geração a ser distribuído como pontos bases econômicos das unidades segundo alguma regra de distribuição econômica. Em adição o Alocador distribui o ECAP e/ou o ASSIST entre todas as unidades sob controle automático determinando então uma geração desejada para cada unidade segundo a equação

$$\text{PDES (I)} = \text{PB(I)} - \text{ECAP} * \text{FREG(I)} - \text{ASSIST} * \text{FASSIST(I)}$$

onde

PDES(I) = geração desejada para a unidade I (MW)

PB (I) = ponto base econômico para a unidade I (MW)

ECAP = ECA filtrado (MW)

FREG (I) = fator de regulação normalizado para a unidade I
(calculado em base individual)

ASSIST = componente "ASSIST" do ECA (MW)

FASSIST (I) = fator "ASSIST" normalizado para a unidade I
(calculado em base individual).

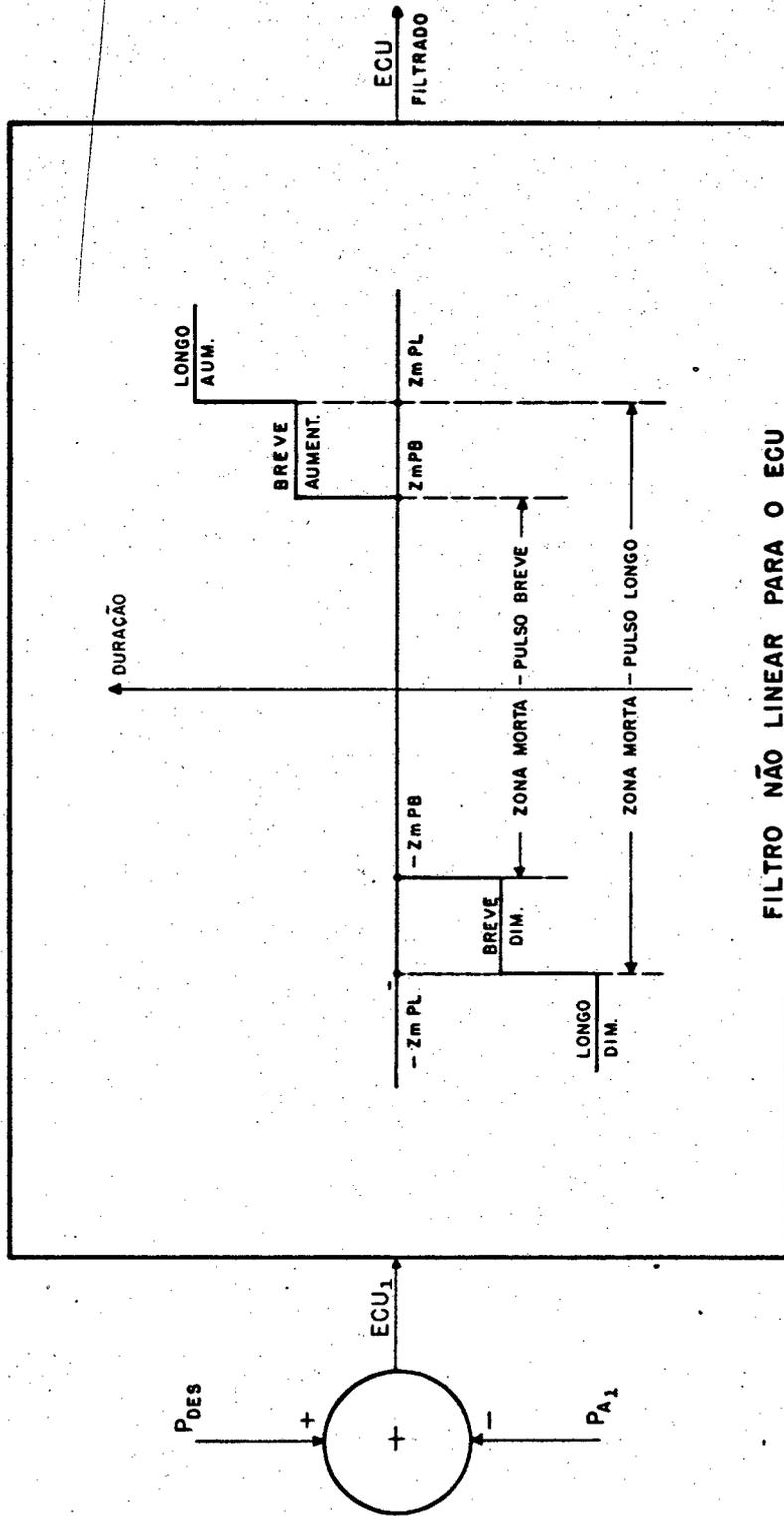


FIG.31 - DECISÕES LÓGICAS DO CONTROLADOR DE UNIDADES

O passo seguinte é determinar que ação de controle exercer para fazer a unidade passar de seu nível atual de geração para o nível desejado. Isto é feito através do cálculo e filtragem do ERRO DE CONTROLE DE UNIDADE (ECU). Qualquer ação de controle resultante tomará a forma de pulsos a serem enviados as unidades no sentido de aumentar ou diminuir suas gerações. Segundo a Fig. 29 o ECU para uma certa unidade é dado por

$$\text{ECU (I)} = \text{PDES (I)} - \text{PA (I)}$$

onde:

ECU (I)=erro de controle da unidade I

PDES (I)=geração desejada da unidade I

PA (I) =geração atual da unidade I

O módulo e a direção do ECU é o fator governante na determinação da ação do controle a ser exercida, com uma certa ação de bloqueio exercida pelo ECA. Nesta situação o ECU é então filtrado com a finalidade de determinar a direção e a duração do pulso a ser enviado à unidade geradora. A ação do filtro do ECU é enfatizado na Fig. 31. Nesta figura observa-se novamente a presença de duas zonas mortas: uma para pulso breve e outra para pulso longo. A decisão tomada neste bloco não é, contudo, definitiva ainda, pois que, como citado antes, o ECA exerce uma certa ação de bloqueio. Esta ação está ilustrada na Fig.32 A. Esta figura mostra que uma vez processado o ECU a decisão a seguir é saber se o valor atual deste ECU requer ou não ação de controle, ou seja se ele pelo menos excede a sua ZMPB. Se a resposta for negativa o sistema simplesmente ignora todo o cálculo executado até este ponto e espera o próximo ciclo do controle. Se a resposta, porém for positiva o passo seguinte é saber se o controle será executado no modo comandado (COMAND CONTROL) ou permissivo (PERMIS-

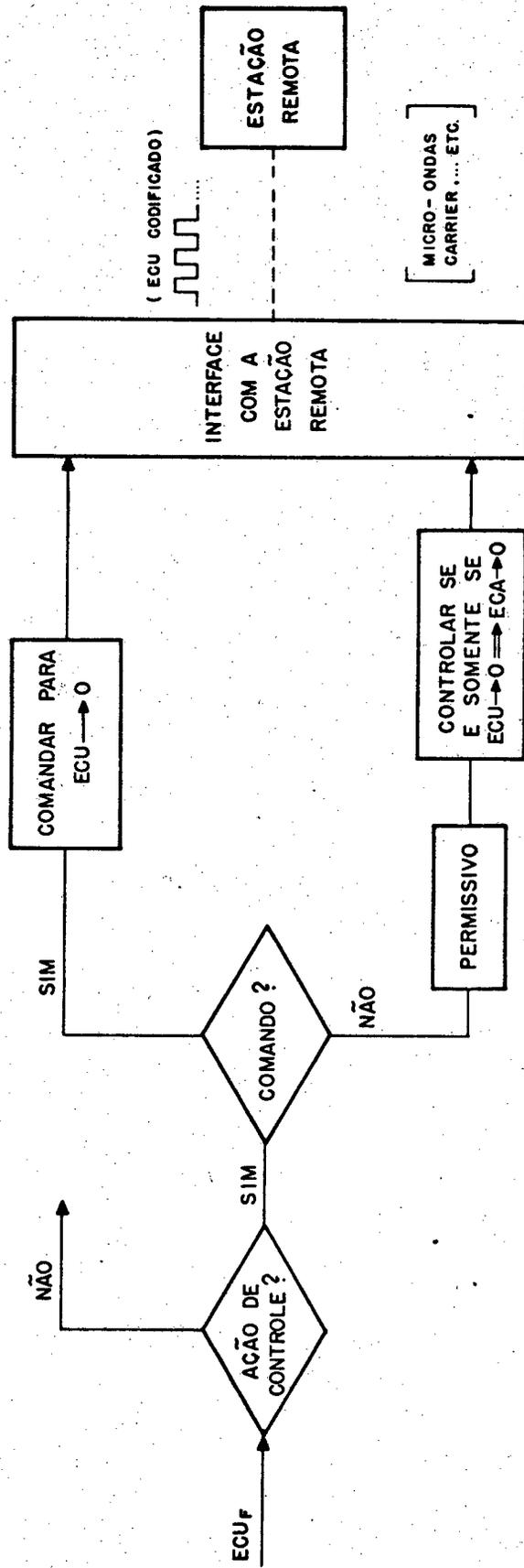


FIG. 32-A - AS POSSIBILIDADES DE COMANDO

SIVE CONTROL), Para tal testa-se o valor do ECA contra uma zona morta permissiva*. Quando o ECA é menor ou igual a esta zona morta as unidades são controladas no modo de comando o que permite executar a ação de controle com a finalidade única de anular o ECU. Fora desta zona morta o controle das unidades é feito permissivamente, ou seja, o controle será executado se e somente se a ação for no sentido de reduzir o ECA.

A Fig.32A mostra ainda que uma vez decidida a ação de controle a ser executada, esta ação é codificada em forma de pulsos e enviada à estação remota. Com a finalidade de ilustrar a ação final em cima da unidade geradora inclui-se a Fig.32 B. Nesta figura mostra-se que o ECU codificado, ao chegar a estação remota, é decodificado na forma de pulsos de duração longa ou curta, nos sentidos "aumentar ou diminuir". Este sinal é injetado no equipamento conhecido por Controlador de Unidade. Este por sua vez integra o pulso recebido e emite para o servo motor que movimenta as agulhas dos injetores (no caso de uma turbina Pelton) uma série de pulsos mais curtos de frequência e duração definidos. Esta integração é que permite "sintonizar" o Controlador da Unidade para obter a resposta desejada (em MW) da unidade. Ou, em outras palavras, é neste equipamento que se ajusta a constante de ganho integral K_c apresentada na Eq. 88.

Finalmente a Fig. 33 apresenta uma visão geral do "software" através do qual é possível tomar todas as decisões lógicas descritas até aqui com a finalidade de possibilitar o controle de geração de forma automática.

*Esta zona morta pode ser igual a qualquer uma daquelas apresentadas na Fig. 30. Não existe porém restrições quanto a escolha.

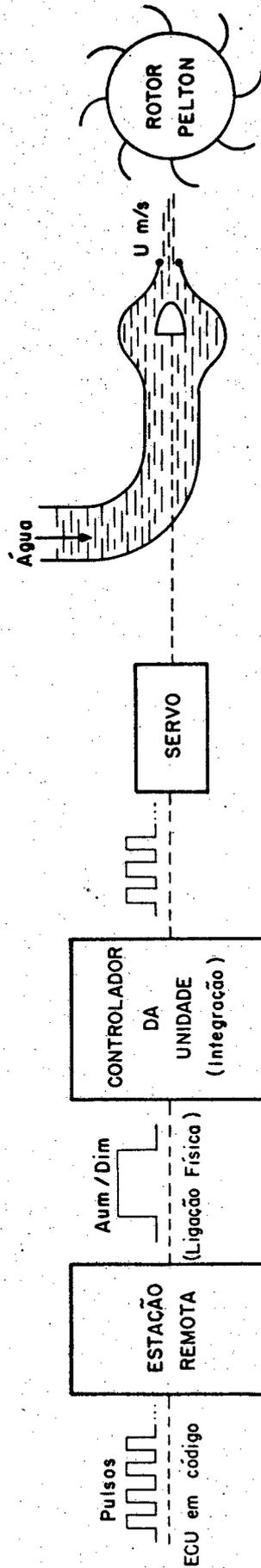


FIG. 32-B - A AÇÃO FINAL EM CIMA DA UNIDADE GERADORA

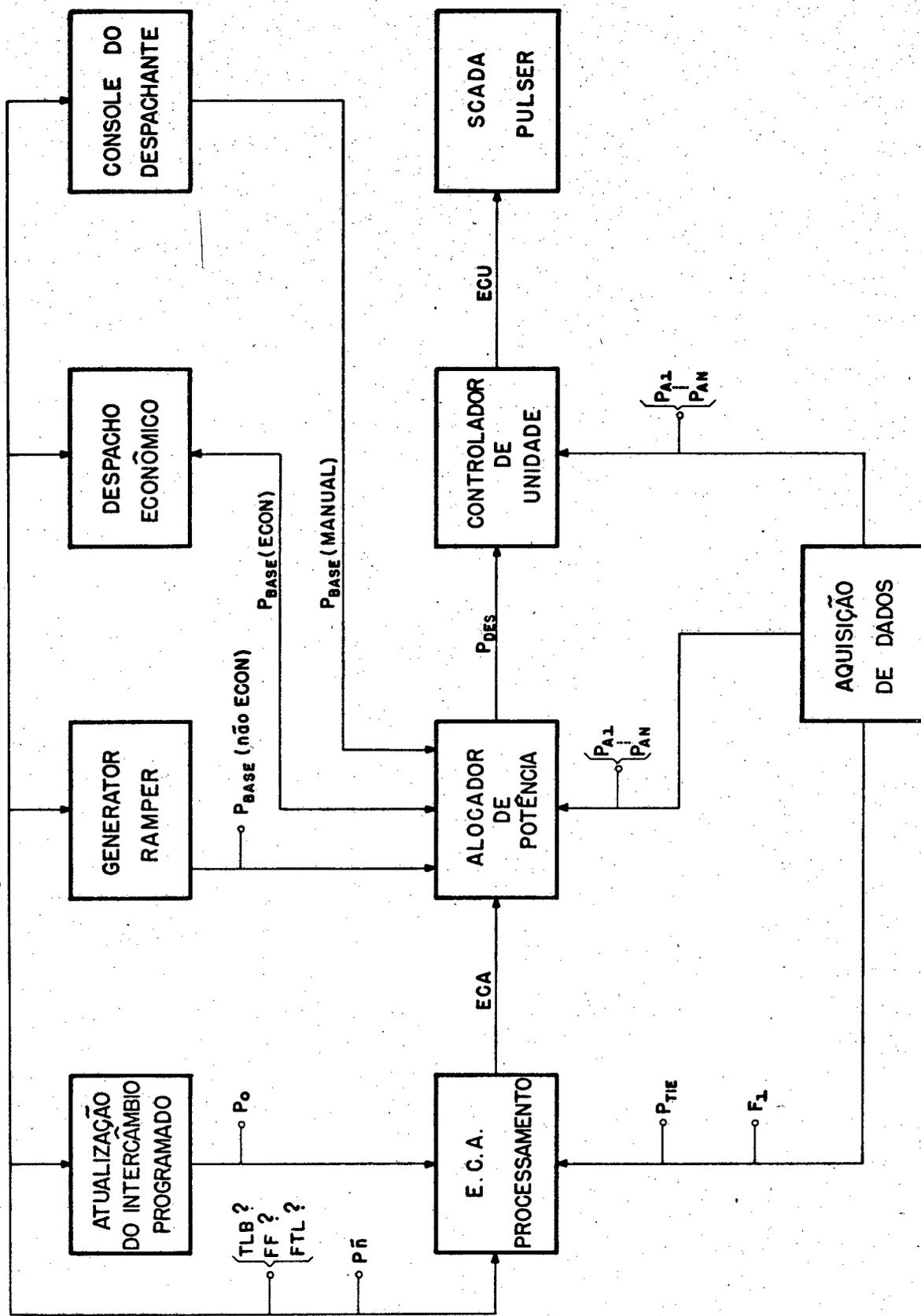


FIG. 33 - VISÃO GERAL DO SOFTWARE PARA CAG

BIBLIOGRAFIA

- 1 - Elgerd, O.I.: "Electric Energy Systems Theory: An Introduction" ,
MC Graw Hill Book Company, New York, 1971
- 2 - Stagg, G.H., and A.H. El-Albiad: "Computer Methods in Power Sys-
tem Analysis", MC Graw-Hill book Company, N.Y., 1968
- 3 - Stevenson, W.D.: "Elements of Power System Analysis" 2d ed.,
MC Graw-Hill Book Company, N.Y., 1962
- 4 - Kirchmayer, L.K.: "Economic Operation of Interconnected Systems",
John Wiley and Sons, Inc, N.Y., 1959
- 5 - B'Relis, W.F.; Reppen, N.D.; Ringlee, R.J.; Undrill, J.M.: "Sche-
duling and Economic Operation-Course Notes", PTI, N.Y., 1973
- 6 - Mokarzel, H.: "Controle de Carga e Frequencia em Sistemas Elé-
tricos", FUPAI, Itajubá, 1976
- 7 - "Definitions of Terminology for AUTOMATIC GENERATION CONTROL ON
Electric Power System", IEEE, System Engineering Committee, N.Y.
1965
- 8 - "Terminologia de Operação", GCOI, Sub-Comitê de Operação Região
Centro-Sul, R.J. , 1972
- 9 - Sauer, R.: "Controle Frequência-Potência em Sistemas Elétri-
cos", IME, R.J., 1967
- 10 - Ewart, D.N.; de Mello, F.P.: "FACE- A Digital Analysis Program",
PICA conf., May 1967
- 11 - Concordia, C.; de Mello, F.P.; Kirchmayer, L.K.; Schultz, R.P.
"Effect of Prime-mover Response and Governing Characteristics
on System Dynamic Performance", Proceedings of APC, 1966

- 12 - de Mello, F.P.; Mills, R.J.; B'Rells, W.F.: " Automatic Gene -
ration Control Part I- Process Modeling"IEEE PES Summer
Meeting, S.Francisco, Cal., 1972
- 13 - de Mello, F.P.; Mills.; R.J.; B'Rells,W.F.: " Automatic Gene-
tion Control Part II - Digital Control Techniques"IEEE PES
Summer Meeting, S.Francisco, Cal., 1972
- 14 - Ross, C.W.: Adaptive Control Computer for Interconected Power
Systems", IEEE Trans. PAS, July 1966
- 15 - Kwatny, H.G.; Kalnitsky, K.C.; Bhatt, A.: "An Optinal trac
king Approach to Load-frequency Control", IEEE PES Summer
Meeting, Anaheim, Cal., 1974
- 16 - Willems, J.L.:"Sensivity Analysis of the Optimum Performance
of Conventional Load-Frequency Control", IEEE PES Winter Mee
ting, N.Y. 1974
- 17 - Barcelo, W.R.: "Effect of Power Plant Response on Optimum Load
Frequency Control System Design", IEEE PES Winter Meeting ,
N.Y., 1971
- 18 - "Economy-Security Functions in Power System Operations -A sum
mary Introduction",IEEE Committee Report, 1975
- 19 - Prakasa Rao, K.S.; Probhu, S.S.; Aggarwal, R.P.: " A Two Level
Approach for Optimal Scheduling in Hydro-Termal Power Sys-
tem , IEEE Trans.on PAS, Nov. 1974
- 20 - Undrill, J.M.; Strauss, W.: "Influence of Hydro Plant Design
on Regulating and Reserve Response Capacity", IEEE Trans.
on PAS, Nov. 1973
- 21 - Thorne, D.H.; Hill.E.F.:" Field Testing and Simulation of

- hydraulic Turbine Governor Performance"IEEE Trans. on PAS, May, 1973
- 22 - Smith, L.M.; Fink, L.H.; Schultz, R.P.: "Use of Computer Model of Interconnected Power System to Asses Generation Control Strategies", IEEE Transactions on PAS, Nov. 1974
- 23 - Leum, M.: "The Development and Field Experience of a Transistor Electric Governor for Hidro Turbines", IEEE Trans. on, April 1966
- 24 - Usry, R.: "Inadvertend Energy Interchange: Causes, Remedies and Balancing", IEEE Trans. on PAS, Feb. 1968
- 25 - Aggarwall, R.P.; Bargseth, F.R.:" Dynamic of Load- frequency Control System", pts I and II, IEEE Trans. on PAS, Feb.1968
- 26 - Ross, C.W.: "Comprehensive Direct Digital Load Frequency Controller", PICA conf., 1967
- 27 - Concordia, C.:"Performance of Interconected System Following Disturbances", IEEE Spectrum, Vol I, June 1965
- 28 - Hovey, L.M.: "Optimum Adjustment of Hydro Governors on Manitoba Hydro System", AIEE Trans. on PAS, 1962
- 29 - Undrill, L.M.; Wodward, J.L.:" Nonlinear Hydro Governing Model and Improved Calculation for Determining Temporary Droop", IEEE Trans. on PAS, April 1967
- 30 - "Dynamic Models for steam and Hydro Turbines in Power System Studies", IEEE Committee Report, Dec. 1972
- 31 - Doraiswami, R.:"A Nonlinear Load-Frequency Control Design" , IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y., 1977

- 32 - Ross, C.W.; Green, T.A.: "Dynamic Performance Evaluation of Computer-Controlled Electric Power System", IEEE PES Summer Meeting, Portland, Ore., 1971

Apêndice 1

A rotina de integração utilizada neste trabalho é parte de um programa de análise dinâmica digital chamado "FORTRAN ANALOG COMPUTER EQUIVALENT", ou de forma abreviada FACE, o qual foi desenvolvido para resolver problemas de dinâmica em geral, no sentido de pequenas e grandes oscilações, e para ser usado por pessoas familiarizadas com a solução de problemas em computador analógico e com conhecimento de FORTRAN.

Embora o FACE seja um pacote constituído de várias rotinas para tratar os dados de entrada, processá-los e fornecer uma saída conveniente, será descrito aqui apenas a parte usada no trabalho, o algoritmo de integração. A sua descrição completa pode ser encontrada na referência 10.

A utilização de um algoritmo de integração passo-a-passo, que é o caso do programa FACE, onde a entrada do integrador é isolada de sua saída permite que as entradas em um dado intervalo de tempo sejam calculadas a partir das saídas obtidas no intervalo de tempo anterior. Inerentemente, então, existe um atraso de tempo introduzido pelo integrador digital, o qual em sua forma mais simples é um acumulador. No programa FACE se introduz uma modificação neste acumulador para compensar o atraso de tempo citado.

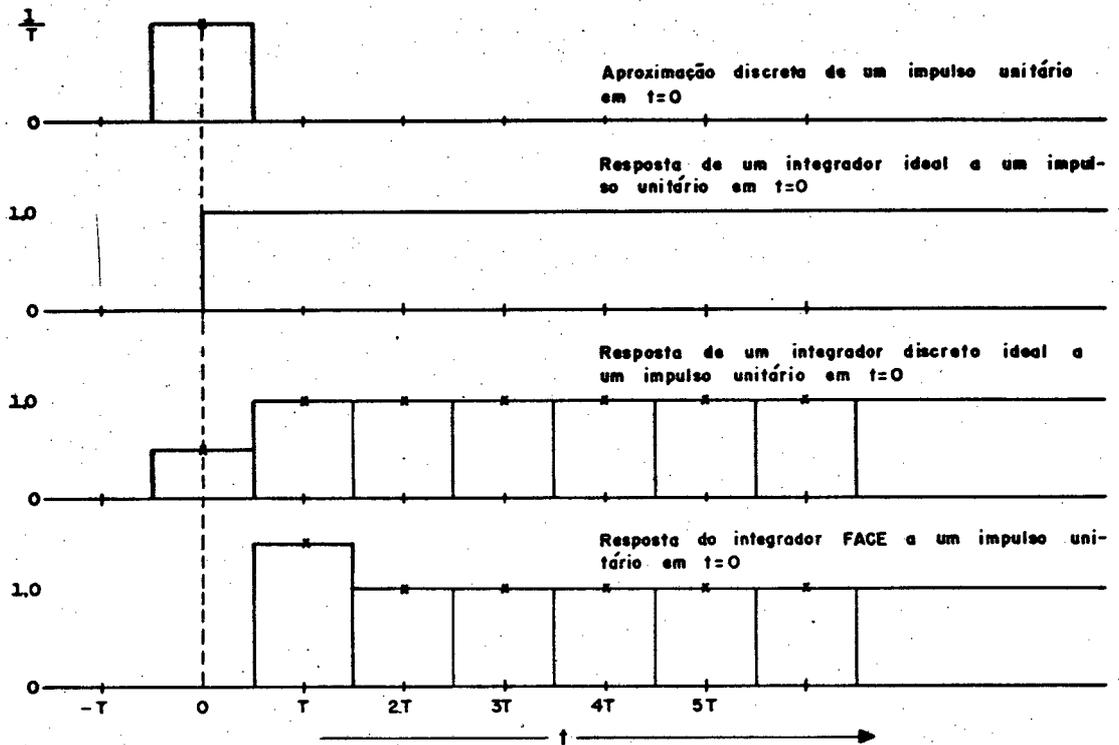


FIG. 34 - RELAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO ILUSTRANDO A RESPOSTA DO INTEGRADOR FACE.

A FIG. 34 mostra as respostas de um integrador ideal (contínuo) e de seu fac-simile discreto a um impulso unitário centrado ao redor de zero. O equivalente discreto da resposta do integrador contínuo em um ponto no tempo $t = nT$ é interpretado como o valor médio que se integrando sobre o intervalo $nT - T/2$ a $nT + T/2$ fornece a mesma área que aquela sob a função contínua para o mesmo intervalo de tempo. Com esta interpretação de equivalência entre um integrador contínuo e um discreto, pode ser verificado que a resposta do integrador discreto é a série $1/2 + Z^{-1} + Z^{-2} + \dots$, expressa na notação de transformada Z, com $Z^{-1} = e^{-sT}$.

O ponto significativo é que para o integrador ideal discreto existe uma resposta instantânea no tempo zero em resposta a um impulso unitário. Desde que na implementação digital haverá o atra

so de um intervalo de tempo T , entre a entrada e a saída do integrador, a melhor coisa que pode ser feita para preservar as áreas é adicionar a saída o $1/2$ que faltará no próximo intervalo de tempo. E isto é efetivamente feito no programa FACE, cuja resposta a um impulso unitário centrado ao redor de zero é também apresentada na FIG. 34, com a finalidade de ilustrar tal fato.

A FIG. 35 apresenta o diagrama de blocos do integrador FACE e seu equivalente em instruções FORTAN pode ser verificado na listagem apresentada no Apêndice 3.

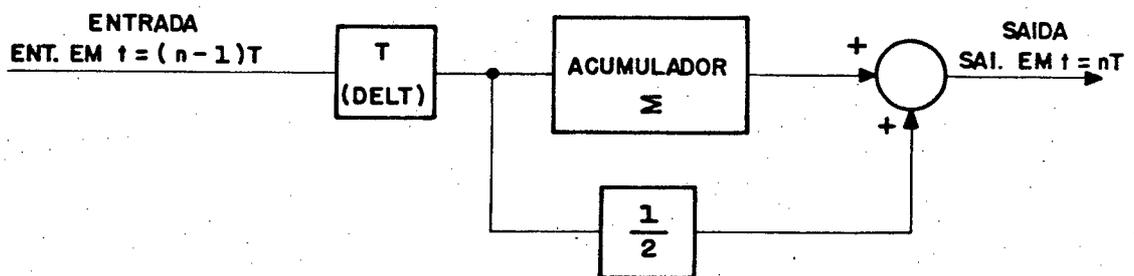


FIG. 35 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO INTEGRADOR FACE

Apêndice 2

1.0 - Valores das constantes do sistema usadas no programa de simulação.

1.1 - Valores Fixos para todos os casos

Potência nominal de cada área

$$P1=P2 = 2.000 \text{ MW}$$

Situação de Carga

$$PD1=PD2 = 1.600 \text{ MW}$$

Constante de Inércia

$$H1=H2 = 5 \text{ segundos}$$

Frequência do Sistema

$$f = 60 \text{ Hz}$$

Característica de carga-frequência

$$D1=D2 = 0,0133 \text{ p.u. MW/Hz}$$

1.2 - Valores variáveis adotados em cada caso simulado

1.2.1 - CASO 1

Fator de polarização da frequência (bias)

$$B1=B2 = 0,430 \text{ p.u. MW/Hz}$$

Constante de ganho integral

$$K1=K2 = 1,000$$

Regulação

$$R1=R2 = 2,400 \text{ Hz/p.u. MW}$$

1.2.2 - CASO 2

Fator de polarização da frequência

$$B1=B2 = 0,430 \text{ p.u. MW/Hz}$$

Constante de ganho integral

$$K1=K2 = 1,000$$

Regulação

$$R1=R2= 2,400 \text{ Hz/p.u.MW}$$

1.2.3 - CASO 3

Fator de polarização da frequência

$$B1= 0,430 \text{ p.u.MW/Hz} ; B2= 1,000 \text{ p.u. MW/Hz}$$

Constante de ganho integral

$$K1= 1,000 ; K2= 0,430$$

Regulação

$$R1 = 2,400 \text{ Hz/p.u. MW} ; R2= 1,017 \text{ Hz/p.u MW}$$

1.2.4 - CASO 4

Fator de polarização da frequência

$$B1= 0,430 \text{ p.u. MW/Hz} ; B2= 1,000 \text{ p.u. MW/Hz}$$

Constante de ganho integral

$$K1= 1,0 ; k2= 0,430$$

Regulação

$$R1= 2.400 \text{ Hz/p.u. MW} ; R2= 1,017 \text{ Hz/p.u MW}$$

1.2.5 - CASO 5

Fator de polarização da frequência

$$B1 = B2 = 0,430 \text{ p.u. MW/Hz}$$

Constante de ganho integral

$$K1 = k2 = 1,0$$

Regulação

$$R1 = R2 = 2,400 \text{ Hz/p.u. MW}$$

1.2.6 - CASO 6

Fator de polarização da frequência

$B1 = B2 = 1,000$ p.u. MW/Hz

Constante de ganho integral

$K1 = K2 = 0,430$

Regulação

$R1 = R2 = 1,017$ Hz/p.u. MW

2.0 - Definição das variáveis usadas no programa de computação

$SIM(J), J=1,12$ = IDENTIFICA A SAÍDA DO INTEGRADOR QUE DESEJA PLOTAR

$GRA(J), J=1,12$ = SÍMBOLOS GRÁFICOS PARA PLOTAGEM

$CODA1$ = TIPO DA ÁREA 1

$CODA2$ = TIPO DA ÁREA 2

$CODM1$ = MODO DE OPERAÇÃO DA ÁREA 1

$CODM2$ = MODO DE OPERAÇÃO DA ÁREA 2

$LIST$ = PARAMETRO QUE CONTROLA A IMPRESSÃO TABULAR DOS RESULTADOS

$NCUR$ = NÚMERO DE CURVAS A SEREM PLOTADAS

$INTPLO$ = INTERVALO DE PLOTAGEM

$NINTEG$ = NÚMERO DE INTEGRAÇÕES A SEREM EXECUTADAS

TS = COEFICIENTE DE TORQUE SINCRONIZANTE ENTRE AS ÁREAS

STP = PASSO DE INTEGRAÇÃO

$SCLA$ = ESCALA PARA PLOTAGEM

$INTT$ = PARAMETRO QUE CONTROLA A IMPRESSÃO DE TEMPO NA SUB-ROTINA PLOT

$AREA1(J), J=1,12$ = PARAMETROS ELÉTRICOS DA ÁREA 1

$AREA2(J), J=1,12$ = PARAMETROS ELÉTRICOS DA ÁREA 2

$CODC$ = VARIÁVEL QUE CONTROLA A SEQUÊNCIA DOS CARTÕES DE DADOS.

Apêndice 3

Listagem do programa usado na simulação

LEVEL 2.10 (REV 12)

```

COMPILER OPTIONS - NAME= MAIN,OPT=00,LINCONT=50,SIZE=0000K,
SOURCE,EBCDIC,NOLIST,NODECK,LOAD,NOMAP,NOMEDIT,ID,NOXREF
ISN 0002 REAL*4 AREA(11),AREA2(11),CON1(12,2000),CON2(12,2000),TEMPO(2000) SCGER010
ISN 0003 REAL*8 TEXT0A,TEXT0B,TEXT01,TEXT02 SCGER020
ISN 0004 INTEGER*4 SIM(12),GRA(12),CODC SCGER030
ISN 0005 DATA TEXT01/HTDRAUL.*/TEXT02/TERMIGA */ SCGER040
ISN 0006 10 READ(5,2) CODC,(SIM(J),J=1,12) SCGER050
ISN 0007 2 FORMAT(11,1212) SCGER060
ISN 0008 IF(CODC.EQ.91) GO TO 30 SCGER070
ISN 0009 IF(CODC.NE.1) GO TO 20 SCGER080
ISN 0010 READ(5,2) CODC,(GRA(J),J=1,12) SCGER090
ISN 0011 IF(CODC.NE.2) GO TO 20 SCGER100
ISN 0012 READ(5,3) CODC,CODA1,CODA2,CODM1,CODM2,LIST,NCURV,INTPLO,NINTEG,TS SCGER120
ISN 0013 1,STP,SCLA,INT SCGER130
ISN 0014 3 FORMAT(611,12,13,14,3F6.4,F3.1) SCGER140
ISN 0015 IF(CODC.NE.3) GO TO 20 SCGER150
ISN 0016 IF(NINTEG.GT.2000) GO TO 25 SCGER160
ISN 0017 READ(5,4) CODC,(AREA1(J),J=1,11) SCGER170
ISN 0018 4 FORMAT(11,11F7.3) SCGER180
ISN 0019 IF(CODC.NE.4) GO TO 20 SCGER190
ISN 0020 READ(5,4) CODC,(AREA2(J),J=1,11) SCGER200
ISN 0021 IF(CODC.NE.5) GO TO 20 SCGER210
ISN 0022 CODI1=CODA1
ISN 0023 CODI2=CODA2
ISN 0024 CALL SIMULAT(AREAL,AREA2,CODA1,CODA2,CODM1,CODM2,TS,NINTEG,STP,SIM,SCGER220
ISN 0025 LIST,SCLA,INTPLO,INTT,CON1,CON2,TEMPO,NCURV,GRA) SCGER230
ISN 0026 TEXT0A=TEXT01 SCGER240
ISN 0027 IF(CODI1.EQ.2) TEXT0A=TEXT02 SCGER250
ISN 0028 TEXT0B=TEXT01 SCGER260
ISN 0029 IF(CODI2.EQ.2) TEXT0B=TEXT02 SCGER270
ISN 0030 WRITE(1,7) TEXT0A,TEXT0B SCGER280
ISN 0031 7 FORMAT(1H0,'AREA-1 PREDOMINANTE ',A8,'---AREA-2 PREDOMINANTE SCGER290
ISN 0032 1,MENTE ',A8) SCGER300
ISN 0033 GO TO 10 SCGER310
ISN 0034 20 WRITE(1,5) SCGER320
ISN 0035 5 FORMAT(1H1,'SIMULACAO CANCELADA DEVIDO A ERRO DE SEQUENCIA NOS CAR SCGER330
ISN 0036 1,TJES DE DADOS') SCGER340
ISN 0037 GO TO 30 SCGER350
ISN 0038 25 WRITE(1,6) SCGER360
ISN 0039 6 FORMAT(1H1,'SIMULACAO CANCELADA. PROGRAMA DEVE SER REDEFINIDO PARA SCGER370
ISN 0040 1,MAIS DE 2000 INTEGRACOES') SCGER380
ISN 0041 30 STOP SCGER390
ISN 0042 END SCGER400

```

```

*OPTIONS IN EFFECT* NAME= MAIN,OPT=00,LINCONT=50,SIZE=0000K,
*OPTIONS IN EFFECT* SOURCE,EBCDIC,NOLIST,NODECK,LOAD,NOMAP,NOMEDIT,ID,NOXREF
*STATISTICS* SOURCE STATEMENTS = 45 ,PROGRAM SIZE = 201674

```

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------|----------|
| ISN 0099 | SAI(15)={ENT(6)/PAR2(3)} | SM00866 |
| ISN 0100 | SAI(15)=3*SAI(15) | SMC0870 |
| ISN 0101 | GO TO 130 | SMJ0880 |
| ISN 0102 | 75 ENT(6)={SAI(5)-SAI(10)*T | SM00890 |
| ISN 0103 | IM=10 | SM00900 |
| ISN 0104 | VAR2=SAI(6) | SMG0910 |
| ISN 0105 | VAR3=SAI(5) | SM00920 |
| ISN 0106 | VAR4=SAI(10) | SM00930 |
| ISN 0107 | IF(MOD2.EQ.1) GO TO 85 | SM00940 |
| ISN 0109 | IF(MOD2.EQ.2) GO TO 80 | SM00950 |
| ISN 0111 | TEXT8=TEXT3 | SM00960 |
| ISN 0112 | ENT(7)=SAI(10)*PAR2(3) | SM00970 |
| ISN 0113 | GO TO 90 | SM00990 |
| ISN 0114 | 80 TFXTH=TEXT2 | SM03980 |
| ISN 0115 | ENT(7)=-SAI(6)*PAR2(3) | SM01000 |
| ISN 0116 | GO TO 90 | SM01010 |
| ISN 0117 | 85 TEXT8=TEXT1 | SM01020 |
| ISN 0118 | ENT(7)={SAI(10)*PAR2(1)-SAI(6)}*PAR2(3) | SM01030 |
| ISN 0119 | ENT(8)={-SAI(7)-SAI(10)/PAR2(12)-SAI(8)}/PAR2(4) | SM01040* |
| ISN 0120 | ENT(9)={SAI(8)-SAI(9)}/PAR2(5) | SM01050 |
| ISN 0121 | ENT(10)={SAI(9)+SAI(6)-SAI(10)/PAR2(6)-PAR2(11)}*(PAR2(6)/PAR2(7)) | SM01055 |
| ISN 0122 | SAI(13)=SAI(9)-ENT(10)*(PAR2(7)/PAR2(6)) | SM01056 |
| ISN 0123 | SAI(15)=ENT(7)/PAR2(3) | |
| ISN 0124 | SAI(15)=3*SAI(15) | |
| ISN 0125 | GO TO 130 | SM01060 |
| ISN 0126 | 95 IF(TIPO1.EQ.1) GO TO 115 | SM01070 |
| ISN 0128 | ENT(5)={SAI(4)-SAI(10)*T | SM01080 |
| ISN 0129 | IM=10 | SM01090 |
| ISN 0130 | VAR2=SAI(5) | SM01100 |
| ISN 0131 | VAR3=SAI(4) | SM01110 |
| ISN 0132 | VAR4=SAI(10) | SM01120 |
| ISN 0133 | IF(MOD2.EQ.1) GO TO 105 | SM01130 |
| ISN 0135 | IF(MOD2.EQ.2) GO TO 100 | SM01140 |
| ISN 0137 | TEXT8=TEXT3 | SM01150 |
| ISN 0138 | ENT(6)=SAI(10)*PAR2(3) | SM01160 |
| ISN 0139 | GO TO 110 | SM01170 |
| ISN 0140 | 100 TEXT8=TEXT2 | SM01180 |
| ISN 0141 | ENT(6)=-SAI(5)*PAR2(3) | SM01190 |
| ISN 0142 | GO TO 110 | SM01200 |
| ISN 0143 | 105 TEXT8=TEXT1 | SM01210 |
| ISN 0144 | ENT(6)={SAI(10)*PAR2(1)-SAI(5)}*PAR2(3) | SM01220 |
| ISN 0145 | V1=-SAI(6)-SAI(10)/PAR2(2) | SM01230 |
| ISN 0146 | V2=V1*(PAR2(2)/PAR2(3))-SAI(7) | SM01240 |
| ISN 0147 | ENT(7)={V1-V2)*(PAR2(2)/(PAR2(8)*PAR2(9))) | SM01250 |
| ISN 0148 | ENT(8)={V2-SAI(8)}/PAR2(4) | SM01260 |
| ISN 0149 | V3=SAI(9)-SAI(8)*2.0 | SM01270 |
| ISN 0150 | ENT(9)={SAI(8)-V3}*(2.0/PAR2(10)) | SM01280 |
| ISN 0151 | ENT(10)={V3+SAI(5)-SAI(10)/PAR2(6)-PAR2(11)}*(PAR2(6)/PAR2(7)) | SM01290 |

```

ISN 0202 310 CONTINUE
ISN 0203 00 305 L=1,NC
ISN 0204 SIMB(L)=SMBL(SIMBOL(L))
ISN 0205 305 CONTINUE
ISN 0206 KK=MM*K
ISN 0207 00 320 L=1,NC
ISN 0208 IK=1
ISN 0209 00 315 I=1, KK, INT
ISN 0210 CUNJ2(L, IK)=CONJ1(L, I)
ISN 0211 315 IK=IK+1
ISN 0212 320 CONTINUE
ISN 0213 M=KK/INT
ISN 0214 DELT=DELT*INT
ISN 0215 CALL PLOT(CONJ2, M, NC, O, DELT, SIMBOL, O, O, 1, C, INTX, ESCALA)
ISN 0216 00 501 L=1, NC
ISN 0217 IF((TIPO1.EQ.1).AND.(TIPO2.EQ.1)) GO TO 360
ISN 0219 IF((TIPO1.EQ.1).AND.(TIPO2.EQ.2)) GO TO 360
ISN 0221 IF((TIPO1.EQ.2).AND.(TIPO2.EQ.1)) GO TO 360
ISN 0223 IF(GRAF(L).EQ.4) GO TO 330
ISN 0225 IF(GRAF(L).EQ.5) GO TO 323
ISN 0227 IF(GRAF(L).EQ.9) GO TO 322
ISN 0229 321 IF(GRAF(L).EQ.12) GO TO 331
ISN 0231 IF(GRAF(L).EQ.13) GO TO 332
ISN 0233 IF(GRAF(L).EQ.14) GO TO 333
ISN 0235 IF(GRAF(L).EQ.15) GO TO 334
ISN 0237 WRITE(1,21) SIMB(L),GRAF(L)
ISN 0239 21 FORMAT(1H0,'CURVA DE SIMBOLO ('',AL,'') CORRESPONDE A SAIDA DO INTEG
      1RADOF ',I1)
      GO TO 501
ISN 0239 322 WRITE(1,22) SIMB(L)
ISN 0240 22 FORMAT(1H0,'CURVA DE SIMBOLO ('',AL,'') CORRESPONDE A FREQUENCIA NA
ISN 0241 1AREA-2 ')
      GO TO 501
ISN 0242 323 WRITE(1,23) SIMB(L)
ISN 0243 23 FORMAT(1H0,'CURVA DE SIMBOLO ('',AL,'') CORRESPONDE A FLOW NO TIE LI
ISN 0244 1NE')
      GO TO 501
ISN 0245 330 WRITE(1,24) SIMB(L)
ISN 0246 24 FORMAT(1H0,'CURVA DE SIMBOLO ('',AL,'') CORRESPONDE A FREQUENCIA NA
ISN 0247 1AREA-1 ')
      GO TO 501
ISN 0248 331 WRITE(1,26) SIMB(L)
ISN 0249 26 FORMAT(1H0,'CURVA DE SIMBOLO ('',AL,'') CORRESPONDE A POTENCIA ELETR
ISN 0250 1ICA GERADA NA AREA-1')
      GO TO 501
ISN 0251 332 WRITE(1,27) SIMB(L)
ISN 0252 27 FORMAT(1H0,'CURVA DE SIMBOLO ('',AL,'') CORRESPONDE A POTENCIA ELETR
ISN 0253 1ICA GERADA NA AREA-2')

```

```

SM01680
SM01690
SM01695
SM01700
SM01720
SM01730
SM01710
SM01735
SM01740
SM01750
SM01760
SM01770
SM01780
SM01790
SM01800
SM01801
SM01802
SM01803
SM01804
SM01805
SM01806
SM01807
SM01808
SM01809
SM01810
SM01811
SM01812
SM01813
SM01814
SM01815
SM01816
SM01817
SM01818
SM01819
SM01820
SM01821
SM01822
SM01823
SM01824
SM01825
SM01826
SM01827
SM01828
SM01829
SM01830
SM01831
SM01832
SM01833

```



```

ISN 0104 ALINE(1CNTP)=ZERO
ISN 0105 80 DO 81 L=1,KURVS
ISN 0106 IY(L)=(DATA(L,J)*SCALE)+CENTR
ISN 0107 ALINE(IY(L))=SYMBL(ISYM(L))
ISN 0108 81 CONTINUE
ISN 0109 DO 83 M=1,KURVS
ISN 0110 DO 82 N=1,KURVS
ISN 0111 82 IF(((IY(M),EQ,IY(N)),AND.(M.NE.N)),AND.(.NOT.((ISYM(N),EQ,12)
1.0R.(ISYM(M),EQ,12)))) ALINE(IY(M))=SYMBL(11)
ISN 0113 83 CONTINUE
ISN 0114 VARX=VARX+XSTEP
ISN 0115 ADATA=DATA(1,J)
ISN 0116 IF(MAN.EQ.1) XVAL=XDATA(I,J)
ISN 0118 IF(KURVS.NE.1) GO TO 100
ISN 0120 IF(NO.EQ.1) GO TO 95
ISN 0122 WRITE(1,4) ADATA,ALINE
ISN 0123 4 FORMAT(1X,F8.4,5X,101A1,8X,F8.4)
ISN 0124 GO TO 105
ISN 0125 100 IF(NO.EQ.1) GO TO 101
ISN 0127 WRITE(1,8) ALINE
ISN 0128 8 FORMAT(14X,101A1,8X,F8.4)
ISN 0129 GO TO 105
ISN 0130 101 WRITE(1,8) ALINE,XVAL
ISN 0131 GO TO 105
ISN 0132 95 WRITE(1,4) ADATA,ALINE,XVAL
ISN 0133 105 NU=NO+1
ISN 0134 IF(NO.EQ.IN) NO=1
ISN 0136 IF(MAN.NE.1)XVAL=XVAL+XSTEP
ISN 0138 110 CONTINUE
ISN 0139 130 RETURN
ISN 0140 END

```

OPTIONS IN EFFECT NAME= MAIN,OPT=00,LINECNT=50,SIZE=00JOK,

OPTIONS IN EFFECT SOURCE,EBCDIC,NOLIST,NODECK,LOAD,NOMA?,NOEDIT,IO,NDXREF

STATISTICS SOURCE STATEMENTS = 139 ,PROGRAM SIZE = 4280

STATISTICS NO DIAGNOSTICS GENERATED

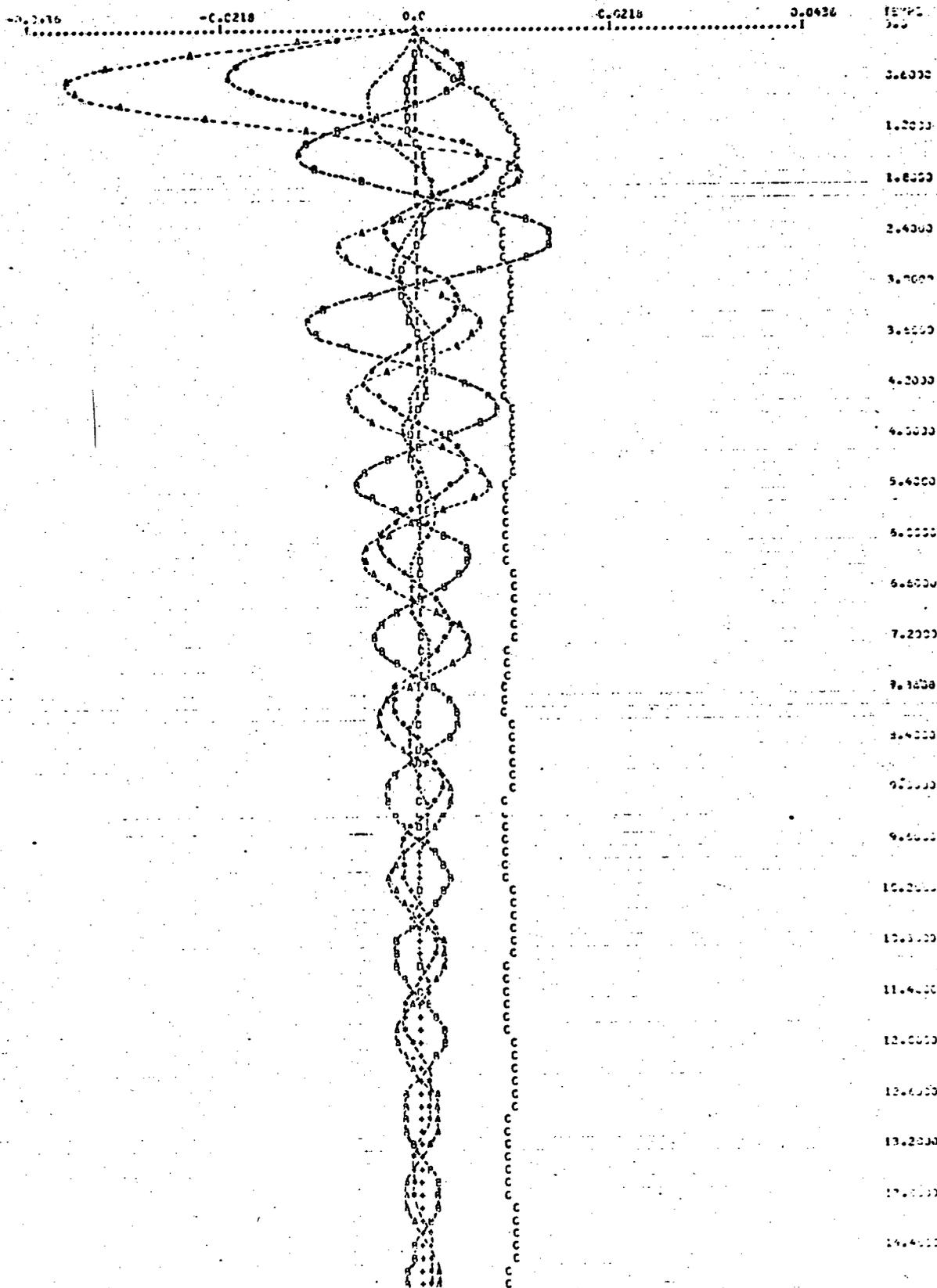
***** END OF COMPILATION *****

STATISTICS NO DIAGNOSTICS THIS STEP

375K BYTES OF CORE NOT USED

Apêndice 4

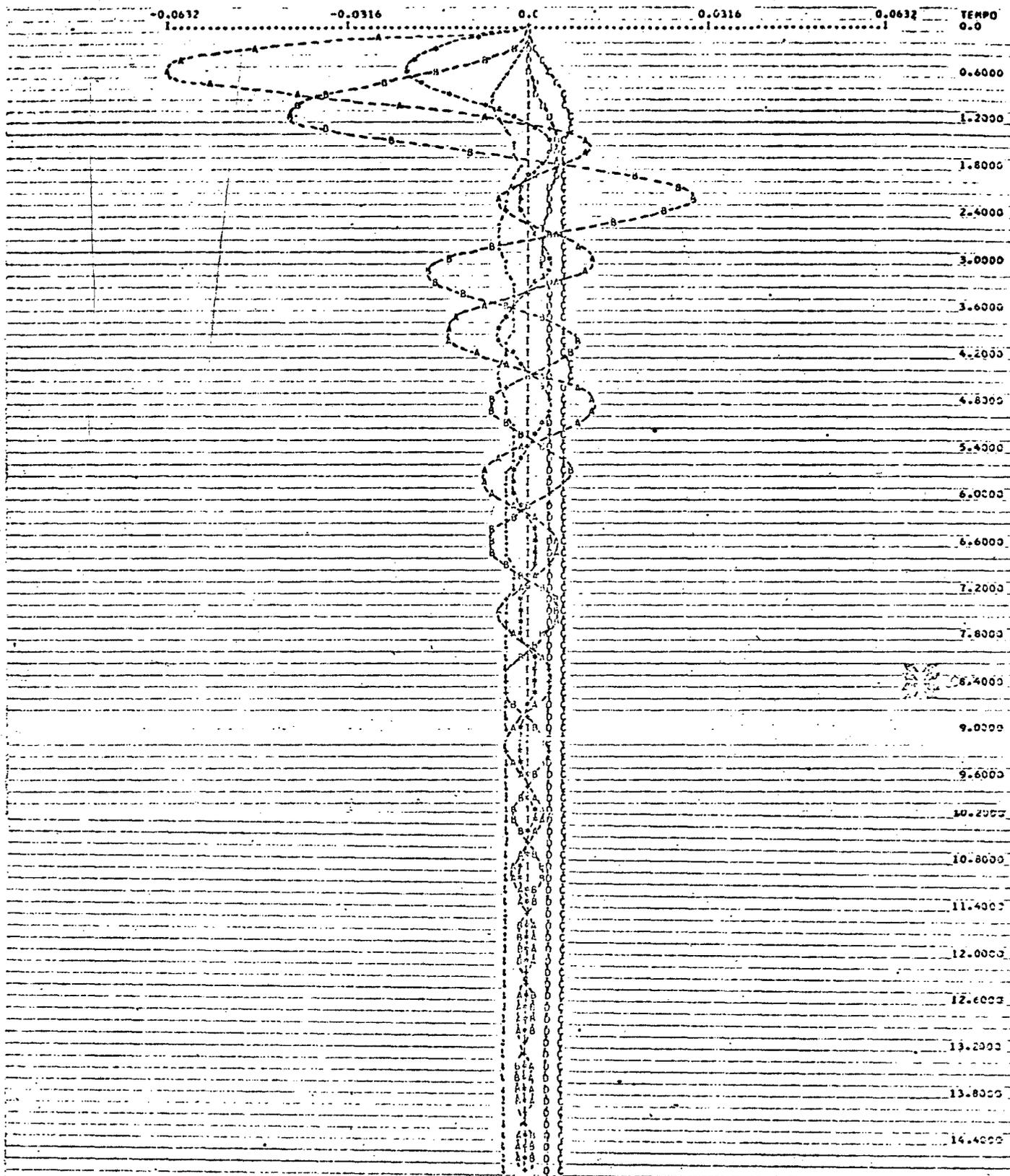
Resultados obtidos nos casos simulados



CURVA DE SIMBOLO (*) CORRESPONDE A FREQUENCIA NA AREA-1
 CURVA DE SIMBOLO (.) CORRESPONDE A FLEN NO TIE LINE
 CURVA DE SIMBOLO (A) CORRESPONDE A ACE NA AREA-1
 CURVA DE SIMBOLO (B) CORRESPONDE A ACE NA AREA-2
 CURVA DE SIMBOLO (C) CORRESPONDE A SAIDA DO INTEGRADOR 1
 CURVA DE SIMBOLO (D) CORRESPONDE A SAIDA DO INTEGRADOR 2
 AREA-1 OPERANDO EM TL1-----AREA-2 OPERANDO EM TL2

FIG. 36 - RESPOSTA DO SISTEMA À COMBINAÇÃO CCFP - CCFP

ESCALA ESCOLHIDA NAJ COMPORTA VALORES EXTREMOS DA(S) CURVA(S). PLOTAGEM EXECUTADA COM ESCALA REDEFINIDA



CURVA DE SIMBOLO (A) CORRESPONDE A FREQUENCIA NA AREA-1

CURVA DE SIMBOLO (B) CORRESPONDE A FLOW NO TIE LINE

CURVA DE SIMBOLO (A) CORRESPONDE A ACE NA AREA-1

CURVA DE SIMBOLO (B) CORRESPONDE A ACE NA AREA-2

CURVA DE SIMBOLO (C) CORRESPONDE A SAIDA DO INTEGRADOR 1

CURVA DE SIMBOLO (D) CORRESPONDE A SAIDA DO INTEGRADOR 2

AREA-1 OPERANDO EM FF --- AREA-2 OPERANDO EM FF

FIG. 41 - RESPOSTA DO SISTEMA A COMBINAÇÃO CPF - CPF