TESE
43

C 670m
ed
1

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

EFEI

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
BIBLIOTECA

USO CONJUGADO "OFF-LINE" DE ANALISADORES DE CIRCUITOS E COMPUTADORES ANALÓGICOS

Tese de Mestrado do
Eng. Carlos Alberto Dias Coelho

1972

USO CONJUGADO "OFF-LINE" DE

ANALISADORES DE CIRCUITOS E COMPUTADORES ANALÓGICOS

USO CONJUGADO "OFF-LINE" DE ANALISADORES DE CIRCUITOS E COMPUTADORES ANALÓGICOS

Por Carlos Alberto Dias Coelho
Engenheiro Eletricista

O presente trabalho foi feito para ser apresentado como Tese de Mestrado, visando a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

Itajubá, outubro de 1972

Carlos Alberto Dias Coelho

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão de Exame da Tese de Mestrado "USO CONJUGADO OFF-LINE DE ANALISADORES DE CIRCUITOS E COMPUDORES ANALÓGICOS" do candidato Carlos Alberto Dias Coelho , em sessão de Decisão realizada após a defesa de Tese em 04 / 11/72, às 0900 horas, decidiu atribuir o conceito 1 (Hum)* à mesma, na forma do Art. 16 do Regulamento da Tese de Mestrado.

* 1 (Hum) = Aprovada com louvor.

EFEI, 04 de Novembro de 1972

Assinaturas dos Membros :

Engº José Alceu Brasil Falleiros - SÃO PAULO LIGHT

Prof. Francisco Rennó Neto - EFEI

Prof. Amadeu Casal Caminha - EFEI

A meus pais, Jair e Yvonne, pelo carinho com que acompanharam e incentivaram a realização deste trabalho e por tudo de bom que deles tenho recebido até hoje, ofereço, com eterna gratidão, este trabalho.

Muitas vezes um cientista brilhante leva a sua vida inteira para descobrir e compreender um simples fenômeno de um ramo da ciência, enquanto, milhões de outros desses fenômenos mantém o Universo em perfeito funcionamento. Nada melhor do que este fato para provar a existência e a grandeza de Deus, a Quem, humildemente, agradecemos por ter nos permitido terminar este trabalho.

A G R A D E C I M E N T O S

- Ao Conselho Nacional de Pesquisas, CNPq, que me proporcionou a oportunidade de fazer o curso de Pós-Graduação, e de realizar este trabalho, através da concessão de uma Bolsa de Estudos;

- Ao Prof. Francisco Rennó Neto, Orientador da Tese, pela consciência profissional e boa vontade com que orientou a realização deste trabalho;

- Ao Acadêmico José Maciel de Melo, pela eficiência e dedicação com que datilografou este trabalho;

- Aos meus amigos e colegas, pelo estímulo que me deram e pelo interesse que demonstraram durante o desenvolvimento deste trabalho.

ÍNDICE

Pag.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Os Problemas da Análise dos Sistemas Elétricos de Potência 2

1.2 - O Analisador de Circuitos 2

1.3 - Limitações do Analisador de Circuitos 3

1.4 - Sistemas de Controle..... 5

1.5 - O Computador Analógico 6

1.6 - Objetivo deste Trabalho 6

CAPÍTULO 2 - O ANALISADOR DE CIRCUITOS

2.1 - Descrição 10

2.2 - Aplicações do Analisador de Circuitos 12

CAPÍTULO 3 - ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

3.1 - Generalidades 16

3.2 - Transferência de Potência Elétrica..... 16

3.3 - A Equação de Balanço 23

3.4 - Solução da Equação de Balanço - A Curva de Balanço 25

3.5 - Limitações do Analisador no Cálculo de Curvas de Balanço de Geradores 36

3.6 - Representação dos Reguladores de Tensão e de Velocidade 38

CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÃO DA REGULAÇÃO DE TENSÃO

4.1 - Preliminares 41

4.2 - Considerações Sobre a Função Saturação 42

4.3 - Diagramas de Blocos para Representação de Sistemas de Excitação 44

4.4 - Representação do Gerador 49

4.5 - Simulação da Saturação 56

4.6 - Simulação Analógica dos Geradores e Sistemas de Excitação 59

4.7 - Exemplo Numérico 75

CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO DA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

5.1 - Diagrama de Blocos 85
5.2 - Obtenção do Erro de Velocidade 87
5.3 - Simulação Analógica da Regulação de Velocidade... 88
5.4 - Exemplos de Sistemas de Energia e Reguladores de Velocidade 93
5.5 - Exemplo Numérico de Preparação para Simulação.... 95
5.6 - Comentários Sobre Reguladores de Turbinas Hidráulicas 99

CAPÍTULO 6 - USO CONJUGADO "OFF-LINE" DE ANALISADOR DE CIRCUITOS E COMPUTADOR ANALÓGICO

6.1 - Introdução 102
6.2 - Descrição da Metodologia 102

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

7.1 - Observações sobre Precisão 114
7.2 - Comparação com o Sistema Digital 116
7.3 - Perspectivas do Uso Conjugado "On-Line" de Analisador de Circuitos e Computador Analógico 117
7.4 - Comentário Final 120

APÊNDICE A - SUBSÍDIOS DE CONTROLES E SERVOMECANISMOS

A.1 - Generalidades 123
A.2 - Transformadas de Laplace 125
A.3 - Função de Transferência 128
A.4 - Diagrama de Blocos 130
A.5 - Constante de Tempo e Ganho de um Sistema 132

APÊNDICE B - SUBSÍDIOS DE COMPUTAÇÃO ANALÓGICA

B.1 - Introdução 136
B.2 - Elementos do Computador Analógico 136
B.3 - Controle e Medida dos Computadores Analógicos.... 139
B.4 - Simulação 141
B.5 - Escalamento 143

B. 6 - Função Limitação 149
B. 7 - Função Valor Absoluto 151
B. 8 - Multiplicadores Variáveis 152
B. 9 - Geradores de Funções Ajustáveis 153
B.10 - Comparadores 153

BIBLIOGRAFIA 155

C A P Í T U L O 1

I N T R O D U Ç Ã O

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

1.1 - OS PROBLEMAS DA ANÁLISE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.

O constante crescimento dos Sistemas Elétricos de Potência torna cada vez maior e mais complexo o trabalho que se faz necessário para estudá-los sob os mais diversos ângulos. Nos sistemas atualmente em operação, qualquèr modificação que se deseja fazer, seja ela a ligação de novas cargas, entrada em serviço de novas usinas ou de novas linhas de transmissão, ou a interligação de dois ou mais sistemas deve ser cuidadosamente estudada sob todos os ângulos: devem ser examinadas as condições de fluxo de carga desejadas, bem como as diversas faltas que podem ocorrer. Principalmente o estudo das faltas deve ser muito meticuloso, sob o ponto de vista da Estabilidade. Os tempos limites de duração das faltas mais severas que podem ocorrer num sistema, além dos quais esse Sistema perde a estabilidade e entra em colapso, são os dados mais importantes que se necessita para a escolha e a calibração de um Sistema de Proteção que atue antes do Sistema de Potência atingir seu limite de estabilidade.

Antes do advento dos Computadores Digitais, os cálculos necessários aos diversos estudos dos sistemas deveriam ser feitos manualmente. Evidentemente, para o tamanho dos sistemas existentes, tais cálculos seriam desencorajadoramente trabalhosos e complicados, e assim que os sistemas começaram a atingir tais dimensões, começaram também os estudos visando achar um meio de evitar esses cálculos ou, pelo menos, de reduzi-los substancialmente.

1.2 - O ANALISADOR DE CIRCUITOS

A solução encontrada para resolver o problema de estudo dos sistemas foi construir um aparelho que permitisse a montagem do sistema em escala reduzida, isto é, um modelo, onde teríamos representados os geradores, as cargas, as linhas e

demais elementos que compõem o sistema. Desta forma, os valores de corrente, tensão, ângulo de fase e potência que teriam os diversos elementos do sistema, para uma determinada condição de operação ou de falta, seriam lidos no modelo, no qual estaria simulada a condição que devesse ser estudada. - Surgiram então os Analisadores de Circuitos, que também foram chamados de Quadros de Cálculo de C.A. (Corrente Alternada) e Calculador de Circuitos de C.A. Todavia, o nome Analisador de Circuitos prevaleceu, tendo em vista que no Aparelho não são feitos cálculos, mas sim leituras nos elementos do modelo representativo do sistema em estudo.

O aparecimento e o início do desenvolvimento dos Analisadores de Circuitos, bem como as técnicas do seu uso na Análise de Sistemas, deu-se na década de 1920-1930. Desde então sua aplicação nos Estudos e Planejamentos dos Sistemas de Potência tem sido frequente, e é impossível negar a grande contribuição que o Analisador de Circuitos deu aos Estudos de Sistemas, tornando-os mais rápidos, precisos e, principalmente, dotando-os de grande visualização, permitindo que a construção e expansão desses sistemas fossem feitas das maneiras mais racionais e econômicas possíveis.

O Analisador de Circuitos pode ser utilizado para os principais tipos de estudo que se deseja fazer em um sistema elétrico de Potência: Fluxo de Carga ("Load-Flow"), Curto - Circuito, Estabilidade Permanente e Estabilidade Transitória. Nos estudos de faltas simétricas, "Load-Flow" e Estabilidade Permanente, os resultados são lidos diretamente no painel de medição do Analisador. Nos estudos de condições desequilibradas nos Sistemas, e de Estabilidade Transitória, necessitamos fazer alguns cálculos, que por vezes podem ser trabalhosos, para obtermos a solução do problema a ser estudado.

1.3 - LIMITAÇÕES DO ANALISADOR DE CIRCUITOS

O Analisador de Circuitos apresenta uma série de limitações que sacrificam a precisão de alguns estudos e impossi

bilitam a realização de outros.

Uma dessas limitações está no fato do Analisador não poder fornecer, no tempo, os valores das grandezas elétricas que aparecem no Sistema em estudo. Desta forma, não é possível obter diretamente no Analisador as formas de onda de sobretensões devido a manobras, perdas súbitas de carga, descargas atmosféricas, etc... Também não é possível conseguir o comportamento das correntes de falta durante os períodos subtransitório e transitório destas correntes.

A representação dos geradores nos Analisadores de Circuitos também não é perfeita. Não é possível considerar a saliência das máquinas síncronas de polos salientes, que constituem a grande maioria das máquinas síncronas. Também não é possível representar a queda transitória de fluxo, nas máquinas rotativas em geral, que é a responsável pelos períodos subtransitório e transitório das correntes de falta, a que já nos referimos antèriormente.

No campo da Estabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência o Analisador de Circuitos passou a ter mais uma séria restrição com o desenvolvimento dos reguladores de tensão para os geradores, e dos reguladores de velocidade para as máquinas motrizes. Antes do desenvolvimento desses reguladores e para os tempos de atuação dos relés, que detetam e comandam o desligamento de uma condição anormal, os quais são bastante curtos, eram satisfatórios os resultados obtidos nos estudos de estabilidade transitória, em que as reatâncias das máquinas eram supostas constantes, e iguais às suas reatâncias transitórias, e a ação dos reguladores de tensão e velocidade era desprezada. Hoje em dia, a primeira suposição pode continuar sendo feita sem grandes erros, mas a segunda não. Os reguladores de tensão e velocidade foram aperfeiçoados de maneira a atuarem rapidamente, e nos estudos de estabilidade suas influências tem de ser consideradas. Se assim não for feito, o estudo pode inclusive levar a uma conclusão errada de que, para uma condição anormal de certa duração, o

sistema perde a estabilidade, quando na realidade isso não ocorre, em razão da ação dos reguladores, a qual não foi considerada no referido estudo.

Portanto, o fato de não poder ser considerada a influência dos reguladores de tensão e velocidade nos estudos de estabilidade transitória, levados a efeito em Analisadores de Circuitos, constitui uma séria limitação desses aparelhos que, desta maneira, ou são completados com algum equipamento auxiliar, ou apenas são utilizados em estudos preliminares de baixa precisão, que sirvam de ponto de partida para estudos mais acurados de estabilidade transitória.

1.4 - SISTEMAS DE CONTROLE

Existe uma infinidade de equipamentos cujo perfeito funcionamento está, muitas vezes, condicionado a que certas grandezas físicas desses equipamentos tenham valores fixos, ou variáveis segundo leis impostas pela operação desejada. Em condições em que esses valores estejam sujeitos a muitas variações, e necessitem ser constantemente corrigidos, os equipamentos são dotados de sistemas de controle, capazes de manter a grandeza controlada, também chamada de valor real (output), com o valor correto desejado, chamado valor referência (input).

A Teoria dos Controles e Servomecanismos permite que qualquer influência de um sistema de controle num sistema qualquer possa ser examinada, sem que sejam necessários conhecimentos de detalhes construtivos desses sistemas de controle. Cada sistema desses é perfeitamente caracterizado por uma expressão, em termos da variável complexa da transformação de Laplace, denominada FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA do sistema de Controle. A Função de Transferência é independente da entrada (valor referência) ou saída (valor real) do sistema, e para qualquer tipo de valor referência que seja escolhido é possível determinar perfeitamente qual será o comportamento do valor real, valendo-se da função de Transferência do sistema de controle, a qual é uma característica do equipamento que deve

ser fornecida pelo seu fabricante.

Portanto, pelo que foi exposto acima, é evidente que num estudo de estabilidade, no qual se deseja considerar a ação dos reguladores de tensão e velocidade, a Função de Transferência desses reguladores será um dado indispensável à realização desse estudo, que pode ser feito analiticamente ou por simulação, com a grande vantagem de não ser necessária a mínima referência a detalhes construtivos dos sistemas reguladores considerados.

1.5 - O COMPUTADOR ANALÓGICO

Inicialmente denominado "Analisador Diferencial", é um equipamento que permite a montagem de análogos de sistemas quaisquer, de maneira muito simples, possibilitando a variação dos parâmetros envolvidos facilmente, e tendo facilidades de medida e registro automáticos. A maneira pela qual se conseguiu esta simplicidade foi a construção de análogos de operações matemáticas (adição, multiplicação, integração, etc...) conectáveis entre si, permitindo a construção de um modelo a partir das equações matemáticas, ou dos diagramas de blocos representativos das funções de transferência, que regem o comportamento do sistema em estudo.

Ao método que representa um sistema num Computador Analógico, a partir do diagrama de blocos desse sistema, dá-se o nome de SIMULAÇÃO. Este método facilita extremamente o estudo do comportamento dos sistemas de controle cujos diagramas de blocos são conhecidos, com ótima visualização. Se o diagrama de blocos do sistema de controle, que queremos considerar em um estudo qualquer, nos é fornecido, com o auxílio do Computador Analógico ser-nos-á possível examinar o comportamento desse sistema em todos os detalhes, e sem que seja necessário, como já dissemos, conhecer detalhes construtivos dos sistemas de controle.

1.6 - OBJETIVO DESTE TRABALHO

Este trabalho se destina a apresentar u'a maneira de

se considerar os reguladores de tensão e velocidade em estudos de estabilidade transitória realizados em Analisadores de Circuitos; mais especificamente no cálculo das curvas de balanço' das diversas máquinas que compõem um sistema, cuja estabilidade deva ser examinada.

Esse método que pretendemos apresentar consiste na utilização do Computador Analógico como um equipamento auxiliar . Nele serão representados os reguladores de tensão e velocidade que aparecem no sistema. O Computador Analógico não será acoplado fisicamente com o Analisador de Circuitos. As correções de tensão e velocidade, que os reguladores deverão fazer no sistema real, serão lidas pelo operador no Computador Analógico, e ajustadas manualmente no Analisador de Circuitos, para o cálculo de cada ponto das curvas de balanço das máquinas. O método a ser apresentado é, na realidade, um refinamento que pretendemos introduzir nos estudos de estabilidade transitória feitos em Analisadores de Circuitos. Até aqui, estes estudos ' tem sido feitos ignorando-se os reguladores de tensão e velocidade, o que pode nos levar, como já dissemos, a prever um comportamento do sistema muito diferente do que na realidade vai ocorrer. Por isso vamos estudar como fazer o cálculo ponto por ponto das curvas de balanço, utilizando o Analisador de Circuitos e o Computador Analógico, de modo a serem consideradas as influências dos reguladores de tensão e velocidade na estabilidade do sistema. Podemos adiantar que, a sistemática de cálculo dos diversos pontos das curvas de balanço será bastante ' semelhante àquela usada normalmente, nos estudos de estabilidade transitória feitos em Analisadores de Circuitos, quando não são considerados os efeitos dos reguladores. Apenas serão adicionados alguns tópicos que referir-se-ão à representação dos reguladores no Computador Analógico, e ao uso dos resultados ' fornecidos pelo Computador nos cálculos das curvas de balanço.

A compreensão do texto deste trabalho exige alguns conhecimentos de Controles e Servomecanismos, bem como de computação Analógica. Os dois assuntos são apresentados no final do

trabalho, em forma de apêndice, de maneira coerente com as convenções utilizadas no texto. Nesse apêndice, procurou-se desenvolver os referidos assuntos até o ponto em que julgamos necessário para a compreensão clara e completa do texto.

% % % %

CAPÍTULO 2

O ANALISADOR DE CIRCUITOS

CAPÍTULO "2"

O ANALISADOR DE CIRCUITOS

2.1 - DESCRIÇÃO

O Analisador de Circuitos é um aparelho capaz de representar um sistema elétrico de potência que deva ser estudado . Essa representação é feita na forma monofásica, e em escala reduzida, de modo que as grandezas correspondentes às do sistema real possam ser lidas diretamente no modelo.

Os elementos que constituem um Analisador de Circuitos são os mesmos que aparecem nos sistemas elétricos, exceto pelo fato de todos os elementos serem estáticos, ajustáveis, e susceptíveis de serem livremente interconectados entre si, de modo a permitir a representação de qualquer sistema elétrico compatível com o número de elementos de circuito disponível no Analisador. Este aparelho tem fontes de C.A., nas quais tanto a magnitude da tensão da fonte quanto seu ângulo de fase são ajustáveis; servem para representar as máquinas rotativas (motores e geradores). As impedâncias série, correspondentes às linhas e aos transformadores, são representadas por unidades ' padrão de linha, compostas de resistência e reatância indutiva ajustáveis. Algumas das unidades de linha possuem capacitores, um em cada terminal, para representar as capacidades para terra, através do circuito π nominal, das linhas de transmis - são. As unidades de carga possuem uma faixa de variação das impedâncias muito maior que a das unidades de linha. Cada unidade de carga possui também voltímetro individual, e um auto- ' -transformador, através do qual pode ser mantida constante a tensão na carga, independente de oscilações das tensões ($\pm$20%) que ocorram devido a mudanças no restante do circuito.

As leituras nos diversos nós e elementos do circuito são feitas num painel central de controle e medição. Através ' de botões de chamada localizados nesse painel, cada elemento ' que precise ser lido é conectado a um barramento de medição, no qual estão permanentemente ligados os instrumentos principais:

um voltímetro, um amperímetro, um wattímetro-varmetro e um leitor de ângulos de fase. Com esses instrumentos podem ser lidas tensões e correntes nas formas polar e algébrica, bem como potências ativas e reativas em qualquer ponto do circuito. Cabe ressaltar também que, geralmente, os instrumentos são conectados às barras de medição através de amplificadores, a fim de reduzir o consumo próprio dos instrumentos de medição, não permitindo, portanto, que a chamada de qualquer elemento para leitura altere as características de tensão, corrente, fase e potência do restante do circuito e do próprio elemento.

Os Analisadores trabalham com valores de tensão e corrente que possibilitem a adoção de uma base tal que as leituras podem ser facilmente transportadas para valores unitários ou percentuais. Assim, quando se adota uma tensão base de 100 volts, e uma corrente base de 1 Ampére, teremos nas leituras:

$$\begin{aligned} V\ [\ \text{Volts}\ ] &= V\% \\ I\ [\ \text{Amp}\ ] &= I\ \text{p.u.} \\ Z\ [\ \Omega\ ] &= Z\% \\ G\ [\ \text{VA}\ ] &= G\% \end{aligned} \qquad (2.1)$$

pois sabemos que:

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{100}{1} = 100\ [\ \Omega\ ]$$

$$G_B = V_B I_B = 100.1\ [\ \text{VA}\ ] \qquad (2.2)$$

Quando não é possível a adoção de valores base compatíveis com os valores de trabalho do Analisador, cujas leituras sejam facilmente transportáveis para valores p.u. ou percentuais, o próprio fabricante adota a base mais conveniente, e gradua todas as escalas de instrumentos e de ajuste dos elementos em valores p.u. ou percentuais, o que elimina o trabalho de conversão dos valores p.u. do sistema em estudo para o Analisador, e a reconversão dos resultados obtidos.

A maioria dos Analisadores opera com frequência de 440 ou 480 (hz), e nos mais modernos a frequência de operação pode chegar até 10 (KHz). Isto porque o uso de altas frequências permite o uso de componentes reativos muito menores,

A alimentação é fornecida por um grupo motor-gerador próprio do Analisador.

2.2.- APLICAÇÕES DO ANALISADOR DE CIRCUITOS

Os principais estudos, necessários à determinação do comportamento de um sistema de potência, podem ser realizados no Analisador. As limitações que ele apresenta de não dar respostas no tempo, e de não representar corretamente as máquinas síncronas, conforme exposto no item 1.3 são superadas com o auxílio de cálculos adicionais.

O ponto de partida para a realização de qualquer estudo num analisador é o diagrama unifilar do sistema a ser examinado, contendo todas as informações: impedâncias das linhas, transformadores e máquinas; potências e grupos de conexão das máquinas, transformadores e bancos de capacitores; susceptância das linhas de transmissão; e constantes de tempo de todas as máquinas rotativas. Quando forem ser estudadas condições desequilibradas, serão necessárias as impedâncias de sequência negativa e nula dos diversos elementos.

De posse desses dados, a partir dos quais obtém-se o diagrama p.u. do sistema, estaremos em condições de iniciar qualquer um dos estudos que possam ser realizados no Analisador, os quais passamos a comentar de forma suscinta.

2.2.1 - FLUXO DE CARGA ("Load-Flow"): um estudo de fluxo de carga consiste em determinar tensão, corrente, potência e fator de potência ou potência reativa, nos diversos pontos de um sistema que esteja operando numa condição normal existente ou futura. Os estudos de fluxo de carga são essenciais ao planejamento da expansão do sistema, que deve ser feita de modo que uma operação satisfatória do sistema seja conseguida depois de realizada a expansão. Para tanto, é necessário o conhecimento prévio dos efeitos da interconexão com outros sistemas, de novas cargas, novas usinas e novas linhas, antes de sua instalação.

Geralmente, as condições fixadas para o estudo de fluxo de carga são: cargas com potências ativa e reativa constantes, e estações geradoras com potência real e magnitude da tensão constantes. Essas condições conduzem a um sistema de equações não lineares, cuja solução analítica é obtida através de processos iterativos bastante trabalhosos.

No Analisador, a solução é obtida rapidamente em relação à cálculos manuais, e com ótima precisão. Oferece excelente visualização do problema, pois o "Load-Flow" é um dos estudos que o Analisador realiza com maior eficiência.

2.2.2 - CURTO-CIRCUITO: É um estudo que parte de uma condição normal de operação, com tensões internas das máquinas determinadas a partir do "Load-Flow" daquela condição. Por causa das impossibilidades que o Analisador tem de representar a queda transitória de fluxo e de não dar respostas no tempo, as correntes de curto-circuito subtransitória, transitória e permanente são obtidas uma de cada vez, ajustando-se no Analisador, respectivamente, as reatâncias subtransitória, transitória e síncrona das máquinas existente no sistema. Em seguida, conhecendo-se as constantes de tempo dessas máquinas, calcula-se as curvas de corrente em relação ao tempo, que estão sendo procuradas.

No estudo de faltas desequilibradas são montados no analisador os circuitos de sequência positiva, negativa e zero, e que são interligados de acordo com a condição que se quer estudar. As componentes simétricas, ou de Fortescue, são lidas diretamente, devendo as correntes que vão fluir no sistema real, serem calculadas pelas expressões das correntes (ou tensões) de um sistema trifásico desequilibrado em função de suas componentes simétricas.

2.2.3 - ESTABILIDADE PERMANENTE: Um estudo de estabilidade permanente consiste na determinação do limite de estabilidade dos diversos pontos do sistema. Segundo o IEEE, "Um limite de estabilidade é a máxima potência que pode circular através de

qualquer determinado elemento do sistema, quando todo o sistema, ou a parte dele a que se refere o limite de estabilidade', está operando com estabilidade." Para a determinação do limite de estabilidade em regime permanente, a potência que flui' através do elemento considerado é aumentada gradualmente. para que não haja oscilações, até chegar no ponto máximo, além do qual algum elemento da parte do sistema que está sendo estudada perde a estabilidade.

No Analisador, esse é um estudo que se faz com bastante facilidade, e sem as aproximações feitas quando o estudo é feito através de cálculos manuais. As leituras são feitas diretamente no painel central de medição, e sabe-se que o limite de estabilidade de um determinado elemento foi atingido ' quando o wattímetro do Analisador acusar uma máxima deflexão. Neste ponto faz-se as leituras que correspondem ao limite de' estabilidade do elemento considerado .

2.2.4 - ESTABILIDADE TRANSITÓRIA: Trataremos desta aplicação' de forma mais detalhada no Capítulo 3 deste trabalho, uma vez que seu objetivo é apresentar uma forma de melhorar os estudos de estabilidade transitória realizados em Analisadores de circuitos, através da consideração da influência dos reguladores de tensão e velocidade nos limites de estabilidade transitória de um sistema.

% % % % %

CAPÍTULO 3

ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

CAPÍTULO 3

ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

3.1 - GENERALIDADES

Como sabemos, a variável mais importante das expressões que regem o comportamento de u'a máquina síncrona, sob o ponto de vista da estabilidade, é o ângulo de fase da tensão interna' dessa máquina. Em condições normais, esse ângulo tem um valor constante, e que depende da magnitude da tensão interna da máquina, da potência que a máquina está entregando ou recebendo do sistema, das tensões das demais máquinas do sistema e das impedências de transferência da máquina considerada para o restante do sistema.

Em condições normais, e desprezando-se as perdas, há um equilíbrio entre as potências mecânica e elétrica de cada máquina. Quando ocorre uma perturbação qualquer, que pode ser uma súbita perda ou um súbito aumento de potência elétrica ou mecânica, ou então uma falta no sistema elétrico, haverá um desequilíbrio da potência elétrica com relação a potência mecânica da máquina, o que tenderá a acelerá-la ou retardá-la, conforme o tipo da perturbação, e dependendo da máquina ser motor ou gerador. A esta aceleração corresponderá u'a mudança no ângulo' de fase da tensão interna dessa máquina, e que poderá levá-la a perder sua estabilidade.

3.2 - TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA ELÉTRICA

A estabilidade de um sistema de potência vai depender' primeiramente, da possibilidade que as máquinas tiverem de trocarem potência entre si, conforme for exigido pelas condições ' do sistema. Cabe, portanto, que desenvolvamos aqui as expressões referentes a transferência e limite de transferência de po - tência. Partiremos do caso mais simples, do qual, por indução , obteremos a expressão do caso geral. A expressão do caso mais simples também será útil para que comprovemos a influência benéfica dos reguladores de tensão e velocidade na estabilidade.

3.2.1 - DUAS FONTES DE TENSÃO COM IMPEDÂNCIA EM SÉRIE: Consideremos um circuito trifásico como o da Fig. 3.1, com uma impedância simples $\dot{Z}$ em cada fase, entre as fontes de tensão 1 e 2. As tensões aplicadas nos pontos 1 e 2 são tensões senoidais trifásicas e equilibradas, defasiadas de 120° numa sequência de fases a,b,c.

Da teoria dos circuitos de C.A., o referido circuito trifásico pode ser representado, para fins de análise, por um circuito equivalente monofásico, como o da figura 3.2, onde $\dot{E}$, $\dot{I}$ e $\dot{Z}$ são quantidades vetoriais (complexas); γ é o ângulo da impedância $\dot{Z}(\gamma = tg^{-1} X/r)$. Durante todo este texto usaremos quantidades por unidade (p.u.), porque elas proporcionam a maneira mais simples de escrever as equações do sistema e de comportamento das máquinas.

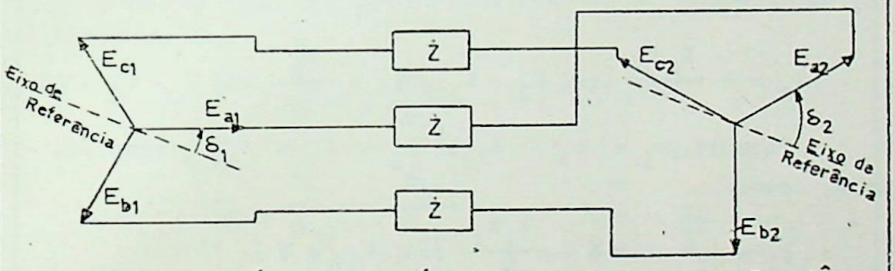


Fig. 3.1 - Duas máquinas trifásicas Interligadas por Impedâncias Iguais.

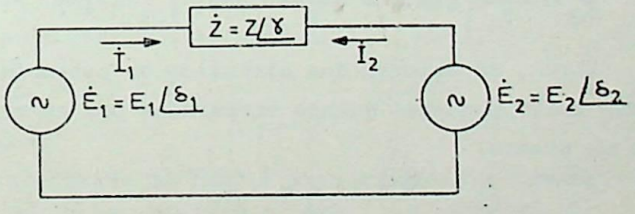


Fig. 3.2 - Representação Monofásica do Circuito da Fig. 3.1.

A potência trifásica p.u. é:

$$P_1 = \dot{E}_1 . \dot{I}_1 = E_1 I_1 \cos \varphi_1$$
$$P_2 = \dot{E}_2 . \dot{I}_2 = E_2 I_2 \cos \varphi_2 \qquad (3.1)$$

onde o ponto entre $\dot{E}$ e $\dot{I}$ indica produto escalar, e φ_1 e φ_2 os ângulos de fator de potência nos pontos 1 e 2, respectivamente. Temos ainda que:

$$\dot{I}_1 = \frac{E_1 \angle \delta_1}{Z \angle \gamma} - \frac{E_2 \angle \delta_2}{Z \angle \gamma} = -\dot{I}_2 \qquad (3.2)$$

ou,

$$\dot{I}_1 = \frac{E_1}{Z} \angle \delta_1 - \gamma - \frac{E_2}{Z} \angle \delta_2 - \gamma = -\dot{I}_2 \qquad (3.3)$$

A direção de corrente é considerada como positiva quando a corrente flui da fonte de tensão em direção ao sistema, e negativa quando a corrente flui do sistema para a fonte. Esta convenção é adotada também para transferência de potência.

Substituindo a eq. 3.3 na eq. 3.1 temos:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z} \cos(\delta_1 - \delta_1 + \gamma) - \frac{E_1 E_2}{Z} \cos(\delta_1 - \delta_2 + \gamma)$$

$$P_2 = -\frac{E_2 E_1}{Z} \cos(\delta_2 - \delta_1 + \gamma) + \frac{E_2^2}{Z} \cos(\delta_2 - \delta_2 + \gamma) \qquad (3.4)$$

Tomando $\delta_1 - \delta_2 = \delta_{12}$, $\delta_2 - \delta_1 = \delta_{21}$ e simplificando, temos:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z} \cos\gamma - \frac{E_1 E_2}{Z} \cos(\delta_{12} + \gamma)$$

$$P_2 = \frac{E_2^2}{Z} \cos\gamma - \frac{E_1 E_2}{Z} \cos(\delta_{21} + \gamma) \qquad (3.5)$$

Porém, na maioria dos circuitos de potência as resistências são muito pequenas quando comparadas com as reatâncias. Portanto, se usamos

$$\gamma = 90 - \alpha \qquad (3.6)$$

onde $\gamma = tg^{-1}(X/r)$; podemos também provar que $\alpha = tg^{-1}(r/X)$. Substituindo a eq. 3.6 nas eqs. 3.5 e simplificando, obteremos:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_2} \operatorname{sen}\alpha + \frac{E_1 E_2}{Z} \operatorname{sen}(\delta_{12} - \alpha)$$

$$P_2 = \frac{E_2^2}{Z} \operatorname{sen}\alpha + \frac{E_1 E_2}{Z} \operatorname{sen}(\delta_{21} - \alpha) \qquad (3.7)$$

3.2.2 - DUAS FONTES DE TENSÃO. CIRCUITO DE IMPEDÂNCIAS GENERALIZADO:

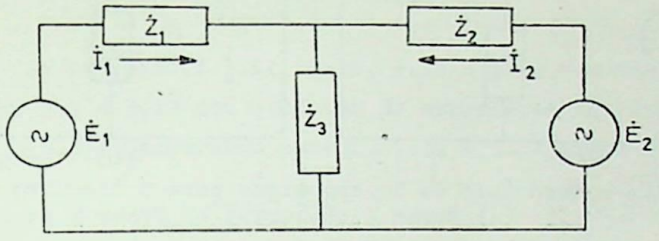


Fig. 3.3 - Duas Máquinas Interligadas por Circuito Qualquer

Consideremos o caso de um circuito do tipo mostrado na fig. 3.3, que é o tipo geral de qualquer circuito estático de três terminais. Para este caso, pelo teorema da superposição, as correntes são:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{11}} - \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{12}}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_{22}} - \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{12}} \qquad (3.8)$$

Cada uma das correntes é composta de duas parcelas: uma devida a ação da fonte 1 e outra devida a ação da fonte 2. Façamos o cálculo da corrente no ramo 1:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{11} + \dot{I}_{21} \qquad (3.9)$$

Definimos:

I_{11} = corrente que passa no ramo 1 quando apenas a tensão E_1 está agindo no circuito ($\dot{E}_2 = 0$)

I_{21} = corrente que passa no ramo 1 quando apenas a tensão E_2 está agindo no circuito ($\dot{E}_1 = 0$)

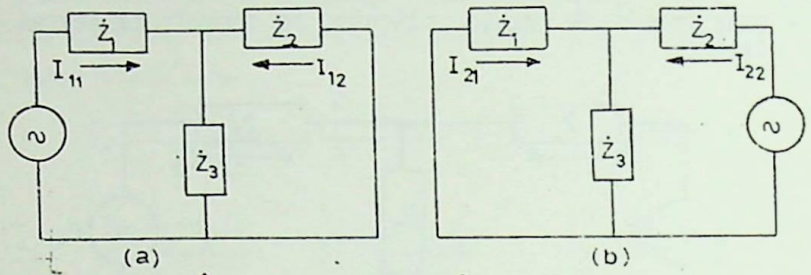


Fig. 3.4 - Princípio da Superposição para o Circuito da Fig. 3.3: (a) Fonte 2 em curto; b) Fonte 1 em curto.

De maneira análoga:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{22} + \dot{I}_{12} \qquad (3.10)$$

Da fig. 3.4.a escrevemos diretamente a expressão de $\dot{I}_{11}$:

$$\dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_1 + \dfrac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3}} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{11}} \qquad (3.11)$$

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_{11}}{\dot{Z}_3} - \dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}_1 - (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_3)\dot{I}_{11}}{\dot{Z}_3}$$

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{E}_1 - (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_3)\dfrac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_1 + \dfrac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3}}}{\dot{Z}_3}$$

Simplificando, obtemos:

$$\dot{I}_{12} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dfrac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_3}} = -\frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{12}} \qquad (3.12)$$

De maneira análoga, da fig. 3.4.b temos que:

$$\dot{I}_{22} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_2 + \dfrac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_3}} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{22}} \qquad (3.13)$$

$$\dot{I}_{21} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_1\dot{Z}_2}{\dot{Z}_3}} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{21}} \qquad (3.14)$$

As expressões 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14, levadas nas equações 3.9 e 3.10 nos conduzem às expressões das correntes $\dot{I}_1$ e $\dot{I}_2$ (3.8). Comparando as eqs. 3.12 e 3.14 temos ainda que:

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} \qquad (3.15)$$

onde a impedância $\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21}$ é chamada de Impedância de Transferência entre as máquinas 1 e 2.

A expressão da potência é obtida de maneira análoga à usada para duas máquinas com uma impedância em série:

$$P_1 = \dot{E}_1.\dot{I}_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \operatorname{sen}\alpha_{11} + \frac{E_1E_2}{Z_{12}} \operatorname{sen}(\delta_{12} - \alpha_{12})$$

$$P_2 = \dot{E}_2.\dot{I}_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}^2} \operatorname{sen}\alpha_{22} + \frac{E_1E_2}{Z_{12}} \operatorname{sen}(\delta_{21} - \alpha_{12}) \qquad (3.16)$$

onde,

$$\alpha_{11} = 90 - \gamma_{11}$$
$$\alpha_{22} = 90 - \gamma_{22}$$
$$\alpha_{12} = 90 - \gamma_{12}$$

e γ_{11}, γ_{22} e γ_{12} são os ângulos das impedâncias $\dot{Z}_{11}$, $\dot{Z}_{22}$ e $\dot{Z}_{12}$, respectivamente.

3.2.3 - GENERALIZAÇÃO - NÚMERO QUALQUER DE FONTES E CIRCUITO GENERALIZADO: A potência que u'a máquina qualquer, de um sistema de várias máquinas, transfere para esse sistema, é deduzida partindo-se dos conceitos fundamentais introduzidos no breve estudo apresentado, de transferência de potência num sistema de apenas duas máquinas. As deduções, bem como as expressões finais, a que se chagem, nos sistemas de várias máquinas, são perfeitamente análogas; porém, tais deduções seriam bastante trabalhosas e fugiriam ao escopo deste nosso trabalho. Portanto, vamos nos limitar a apresentar aqui as expressões de nosso

interesse, com as anotações necessárias a sua compreensão.

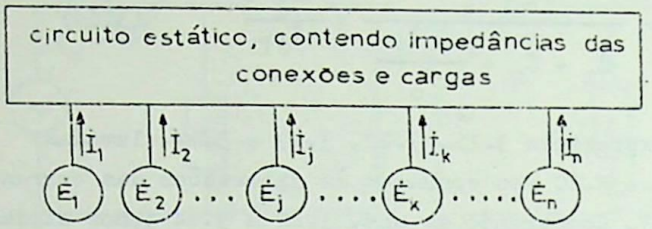


Fig. 3.4 - Circuito Generalizado

Por analogia com a expressão 3.8, escrevemos as expressões das correntes

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{11}} - \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{21}} - \cdots - \frac{\dot{E}_k}{\dot{Z}_{k1}} - \cdots - \frac{\dot{E}_n}{\dot{Z}_{n1}}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{22}} - \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{12}} - \cdots - \frac{\dot{E}_k}{\dot{Z}_{k2}} - \cdots - \frac{\dot{E}_n}{\dot{E}n2}$$

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{E}_k}{\dot{Z}_{kk}} - \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{1k}} - \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{2k}} - \cdots - \frac{\dot{E}_j}{\dot{Z}_{jk}} - \cdots - \frac{\dot{E}_n}{\dot{Z}_{nk}} \qquad (3.18)$$

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{E}_n}{\dot{Z}_{nn}} - \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{1n}} - \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{2n}} - \cdots - \frac{\dot{E}_k}{\dot{Z}_{kn}} - \cdots - \frac{\dot{E}_{n-1}}{\dot{Z}_{n-1,n}}$$

Para uma máquina qualquer K teremos:

$\dot{Z}_{kk}$ = ("driving point impedance") -(sem tradução)- da máquina K, que é a impedância que o sistema apresenta para a máquina, com as tensões das demais máquinas curto-circuitadas (magnitude nula).

$\dot{Z}_{jk} = \dot{Z}_{kj}$ = impedância de transferência entre as máquinas j e K do sistema.

As expressões das potências que cada uma das máquinas entrega ao sistema são análogas às expressões (3.16), para um sistema de duas máquinas. Teremos então:

$$\dot{P}_1 = \dot{E}_1 . \dot{I}_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \operatorname{sen} \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \operatorname{sen}(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \cdots +$$

$$+ \frac{E_1 E_k}{Z_{1k}} \operatorname{sen}(\delta_{1k} - \alpha_{1k}) + \cdots\cdots + \frac{E_1 E_n}{Z_{1n}} \operatorname{sen}(\delta_{1n} - \alpha_{1n})$$

$$P_2 = \dot{E}_2 . \dot{I}_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \operatorname{sen}\alpha_{22} + \frac{E_2 E_1}{Z_{21}} \operatorname{sen}(\delta_{21} - \alpha_{21}) + \cdots\cdots +$$

$$+ \frac{E_2 E_k}{Z_{2k}} \operatorname{sen}(\delta_{2k} - \alpha_{2k}) + \cdots\cdots + \frac{E_2 E_n}{Z_{2n}} \operatorname{sen}(\delta_{2n} - \alpha_{2n})$$

$$\vdots \qquad (3.19)$$

$$P_k = \dot{E}_k . \dot{I}_k = \frac{E_k^2}{Z_{kk}} \operatorname{sen}\alpha_{kk} + \frac{E_k E_1}{Z_{1k}} \operatorname{sen}(\delta_{k1} - \alpha_{ki}) + \cdots\cdots +$$

$$+ \frac{E_k E_j}{Z_{jk}} \operatorname{sen}(\delta_{kj} - \alpha_{jk}) + \cdots\cdots + \frac{E_k E_n}{Z_{kn}} \operatorname{sen}(\delta_{km} - \alpha_{kn})$$

$$\vdots$$

$$P_n = \dot{E}_n . \dot{I}_n = \frac{E_n^2}{Z_{nn}} \operatorname{sen}\alpha_{nn} + \frac{E_1 E_n}{Z_{1n}} \operatorname{sen}(\delta_{n1} - \alpha_{1n}) + \cdots\cdots +$$

$$+ \frac{E_n E_k}{Z_{nk}} \operatorname{sen}(\delta_{nk} - \alpha_{km}) + \cdots\cdots + \frac{E_n E_{n-1}}{Z_{n,n-1}} \operatorname{sen}(\delta_{n,n-1} - \alpha_{n-1,n})$$

Nas expressões 3.19 temos que:

$$\delta_{jk} = \delta_j - \delta_k = - \delta_{kj}$$

$$\alpha_{jk} = \alpha_{kj}$$

Cada uma das expressões 3.19 representa a potência transferida pela máquina, indicada pelo índice no 1º membro, ao restante do sistema.

3.3 - A EQUAÇÃO DE BALANÇO

Quando, numa máquina elétrica, despreza-se os conjugado correspondentes as perdas por atrito, ventilação, e as perdas no núcleo dos enrolamentos das máquinas, qualquer diferença que houver entre conjugado mecânico no eixo da máquina e o conjugado eletromagnético que está sendo desenvolvido, vai causar a acele

ração ou a freiagem da máquina. Se T_m representa o conjugado mecânico e T_e o conjugado eletromagnético, e se esses valores são considerados positivos para gerador (isto é, com conjugado mecânico aplicado ao gerador por agente externo, e conjugado elétrico desenvolvido pelo próprio gerador), o conjugado acelerador será:

$$T_a = T_m - T_e \qquad (3.21)$$

e T_a será positivo, indicando aceleração, quando T_m é maior do que T_e. Quando a mesma equação é usada para motor com T_m e T_e negativos, indicando que a máquina recebe um conjugado elétrico e fornece conjugado mecânico, T_a é positivo e indica aceleração quando T_e é maior que T_m. Uma equação similar é obtida para potência aceleradora:

$$P_a = P_m - P_e \qquad (3.22)$$

onde P_m é a potência no eixo e P_e é a potência elétrica da máquina considerada.

Das relações da mecânica da rotação sabemos que potência é igual ao produto da quantidade de movimento angular pela velocidade angular

$$P_a = T_a\omega = J\alpha\omega = M\alpha \qquad (3.23)$$

Todas as grandezas angulares são expressas em termos de ÂNGULOS ELÉTRICOS. A aceleração angular α em termos da posição angular elétrica θ do rotor é:

$$\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad (3.24)$$

Visto que θ está mudando continuamente com o tempo, é mais conveniente medir a posição angular em relação ao eixo de referência que foi adotado para o sistema (vide fig. 3.1), que gira com a velocidade síncrona. Se δ é a posição angular elétrica da máquina em relação ao eixo de referência rotativo, a posição angular em relação a uma referência fixa é dada por:

$$\theta = \omega_s t + \delta \qquad (3.25)$$

derivando em relação ao tempo, obtemos:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega = \omega_s + \frac{d\delta}{dt} \qquad (3.26)$$

e derivando novamente vem:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \alpha \qquad (3.27)$$

Levando o valor de α obtido em 3.27 na eq. 3.23 obtemos:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \qquad (3.28)$$

A equação 3.28 é chamada equação de balanço. A partir dela são calculadas as curvas que representam o comportamento dos ângulos de fase das tensões internas das máquinas no tempo, e universalmente conhecidas como curvas de balanço.

3.4 - SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE BALANÇO: A CURVA DE BALANÇO

3.4.1 - OBJETIVOS: Usualmente um estudo de estabilidade transitória tem como finalidade orientar a escolha de um sistema de proteção, ou verificar se uma proteção já existente é satisfatória para um sistema que vai ser modificado ou ampliado. Várias podem ser as tarefas que um sistema de proteção deve desempenhar: eliminar uma falta, fazer um desligamento seletivo de cargas num caso de falha parcial da alimentação, etc... Porém, os estudos de estabilidade transitória estão sempre à procura das mesmas informações: máximo tempo que o sistema pode tolerar uma falta ,tempo máximo para desligamento seletivo de cargas, e assim por diante. O sistema de proteção deve atuar antes que transcorra esse tempo, para que as máquinas se mantenham estáveis. Esse tempo é denominado "tempo crítico". Baseado neste dado é que o engenheiro especifica os disjuntores e relés com as velocidades apropriadas, para que formem uma proteção eficiente contra a perda da estabilidade.

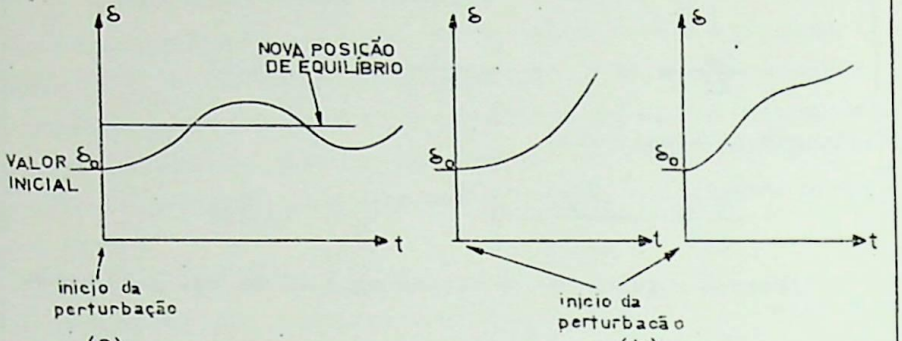


Fig. 3.5 - Curvas de Balanço: a) Sistema Estável;
b) Sistema Instável.

Nos estudos de estabilidade com apenas duas máquinas, pelo critério das "áreas iguais" é possível calcular diretamente um ângulo crítico para uma determinada falta, o qual não deve ser ultrapassado durante a falta, para que o sistema se mantenha estável. O tempo crítico é o tempo gasto para que o ângulo entre as máquinas atinja esse valor crítico. A disponibilidade do ângulo crítico reduz bastante os cálculos necessários à solução da equação de balanço, uma vez que fica muito mais fácil verificar se os tempos de atuação da proteção são satisfatórios para garantir a estabilidade. Basta resolver a equação de balanço até que o ângulo atinja o seu valor crítico, obtendo-se então o valor do tempo crítico, que vai orientar a escolha dos relés e disjuntores do sistema.

Quando queremos examinar a estabilidade de um sistema de três ou mais máquinas, o problema torna-se bem mais trabalhoso, porque o critério das áreas iguais só é aplicável a sistemas com duas máquinas, o que nos impede de calcular o ângulo crítico sem resolver a equação de balanço. Nos sistemas com mais de duas máquinas o tempo crítico deve ser obtido calculando-se curvas de balanço para diversos tempos de atuação dos relés. O cálculo da curva de balanço deve ser feito para um intervalo de tempo tal que nos permita dizer se o sistema é estável ou instável, examinando a forma da curva de balanço. O sistema será estável se o ângulo δ oscilar em torno de uma nova

posição de equilíbrio, e será instável se o ângulo δ crescer indefinidamente. Quando o sistema é estável, é suficiente calcular a curva de balanço para um intervalo de tempo correspondente a uma oscilação do ângulo δ (vide fig. 3.5).

3.4.2 - SOLUÇÃO PONTO POR PONTO DA EQUAÇÃO DE BALANÇO: Consideremos um sistema de n máquinas, cuja estabilidade vá ser examinada. A equação de balanço de uma máquina K (genérica) do sistema será:

$$M_k \frac{d^2 \delta_k}{dt^2} = P_{mk} - P_{ek} \qquad (3.29)$$

A potência elétrica P_{ek} é dada por uma das equações 3.19, que levada na equação 3.29 nos dá:

$$M_k \frac{d^2 \delta_k}{dt^2} = P_{mk} - \left[\frac{E_k^2}{Z_{kk}} \operatorname{sen} \alpha_{kk} + \frac{E_k E_1}{Z_{1k}} \operatorname{sen}(\delta_{kl} - \alpha_{kl}) + \ldots \right.$$

$$\left. \ldots + \frac{E_k E_j}{Z_{jk}} \operatorname{sen}(\delta_{kj} - \alpha_{jk}) + \ldots\ldots + \frac{E_k E_n}{Z_{kn}} \operatorname{sen}(\delta_{km} - \alpha_{km}) \right] \qquad (3.30)$$

Portanto, sendo o sistema de n máquinas, um estudo de estabilidade transitória implicará na resolução de um sistema de equações diferenciais de 2ª ordem, não lineares, constituído pelas equações de balanço das máquinas. Em cada equação aparece uma soma de funções senoidais envolvendo os ângulos de fase das tensões internas de todas as máquinas do sistema. Portanto, a equação de balanço não tem solução analítica possível. O único método realizável para resolver a equação de balanço, ou um sistema de equações de balanço, é o método numérico, isto é, a solução ponto por ponto.

Nos estudos de estabilidade, os intervalos de tempo considerados são bastante pequenos, raramente excedendo a 1 segundo. Esse tempo não é suficiente para que a velocidade de qualquer uma das máquinas sofra qualquer mudança considerável. Portanto a quantidade de movimento

$$M_k = J_k \omega_k \qquad (3.31)$$

pode ser considerada constante na solução das equações de balanço.

Baseado então na invariabilidade da quantidade de movimento, foi definida uma constante característica das máquinas síncronas, que foi chamada de "constantes de inércia". A constante de inércia H de uma máquina síncrona é, por definição, a relação entre a energia cinética armazenada pela máquina à velocidade síncrona e a sua potência nominal. Dessa forma

$$H = \frac{\text{energia cinética em megajoules}}{\text{Potencia nominal em MVA}}$$

Portanto, a energia cinética armazenada pela máquina é dada por

$$W = GH \qquad (3.32)$$

Também sabemos que:

$$W = \frac{1}{2} J\omega^2 = \frac{1}{2} M\omega \qquad (3.33)$$

De (3.32) e 3.33 obtemos

$$GH = \frac{1}{2} M\omega$$

donde,

$$M = \frac{2GH}{\omega} \qquad (3.34)$$

Em graus elétricos por segundo, temos que $\omega = 360\ f$. Portanto, de 3.34

$$M = \frac{GH}{180f} \left[\frac{\text{Megajoule - seg}}{\text{grau eletrico}} \right] \qquad (3.35)$$

A expressão 3.35 nos dá a forma usual da quantidade de movimento na solução ponto por ponto das equações de balanço.

A solução ponto por ponto consiste em calcular as mudanças da posição angular δ do rotor durante intervalos de tempo bastante pequenos, de maneira que as seguintes suposições possam ser feitas:

a) A potência de aceleração P_a calculada no começo de um intervalo é constante desde o meio do intervalo precedente até o meio do intervalo considerado.

b) A velocidade angular é constante durante qualquer intervalo, e igual ao valor calculado para o meio do intervalo considerado.

Evidentemente, nenhuma das suposições acima é verdadeira, visto que δ está mudando continuamente, e tanto P_a quanto ω são funções do ângulo δ de cada máquina do sistema. Quanto menor for o intervalo Δt, mais a curva de balanço calculada se aproxima da curva real.

A figura 3.6 auxilia a visualisar essas suposições. A potência de aceleração é calculada para os pontos indicados nos finais dos intervalos n-2, n-1 e n, que são os inícios dos intervalos n-1, n e n+1. A curva em degraus de P_a, na figura 3.6 resulta da suposição que P_a é constante entre os pontos médios de intervalos adjacentes. De modo semelhante $\Delta\omega$, a diferença entre a velocidade angular ω e a velocidade síncrona ω_s, é mostrada como uma curva em degraus que é constante durante cada intervalo e igual ao valor calculado para o ponto médio do intervalo considerado. Entre as ordenadas n-3/2 e n-1/2 há uma mudança de velocidade causada pela potência de aceleração constante. A mudança na velocidade é o produto da aceleração pelo intervalo de tempo; então,

$$\Delta\omega_{n-1/2} - \Delta\omega_{n-3/2} = \frac{d^2\delta}{dt^2}\Delta t = \frac{P_{a(n-1)}}{M}\Delta t \quad (3.36)$$

A mudança de δ durante qualquer intervalo é o produto de $\Delta\omega$ desse intervalo pelo tempo do intervalo. Desta forma, a mudança em δ durante o intervalo n-1 é

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t \times \Delta\omega_{n-3/2} \quad (3.37)$$

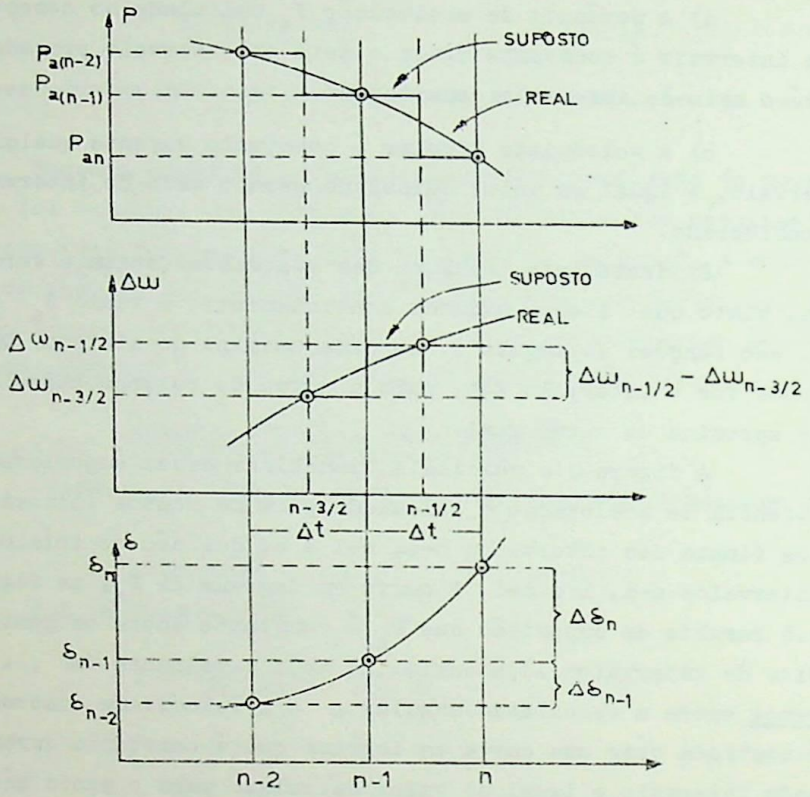


Fig. 3.6 - Solução ponto por ponto da Equação de Balanço

e durante o intervalo n a mudança em δ é:

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t \times \Delta\omega_{n-1/2} \qquad (3.38)$$

Subtraindo 3.37 de 3.38, temos:

$$\Delta\delta_n - \Delta\delta_{n-1} = \Delta t(\Delta\omega_{n-1/2} - \Delta\omega_{n-3/2}) \qquad (3.39)$$

Substituindo 3.36 em 3.39 vem

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{P_{a(n-1)}}{M} \times (\Delta t)^2 \qquad (3.40)$$

Considerando que a quantidade de movimento M é praticamente constante, e dada pela expressão 3.35, definimos constante de aceleração K

$$K = \frac{(\Delta t)^2}{M} = \frac{180f(\Delta t)^2}{GH} \qquad (3.41)$$

As equações utilizadas no cálculo da curva de balanço serão

$$P_a = P_m - P_e$$

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + KP_{a(n-1)} \qquad (3.42)$$

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n$$

3.4.2 - SOLUÇÃO TOTALMENTE MANUAL: O cálculo totalmente manual das curvas de balanço, num sistema de várias máquinas, implica sempre numa quantidade desmesurada de trabalho. Isto pode ser avaliado pelo exame do item 3.2.2, onde foram deduzidas as expressões das potências transferidas, bem como das impedâncias de transferência, para um sistema de duas máquinas. É um sistema relativamente simples e que, no entanto, levou a expressões complicadas para as impedâncias de transferência e para as potências. Imagine-se então um sistema de n máquinas, onde se tivesse de calcular todas as impedâncias de transferência e "driving point impedance", para depois calcular a curva de balanço ponto por ponto, tendo de lançar mão, para cada ponto da curva, e em máquina por máquina, do 2º membro da equação 3.30 para obtenção da potência de aceleração.

Um outro aspecto interessante a ser considerado, é quando o estudo visa a determinar o tempo crítico de uma falta num ramo qualquer do sistema, como ilustram as figuras 3.7 e 3.8 . Suponha-se que a falta seja um curto simétrico sólido no ponto

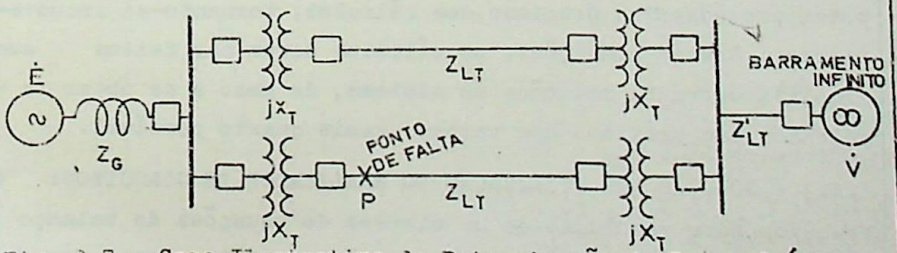


Fig. 3.7 - Caso Ilustrativo de Determinação de Tempo Crítico

indicado, e que sua eliminação seja feita com o desligamento do ramo defeituoso, Portanto, para cada uma das condições, an-

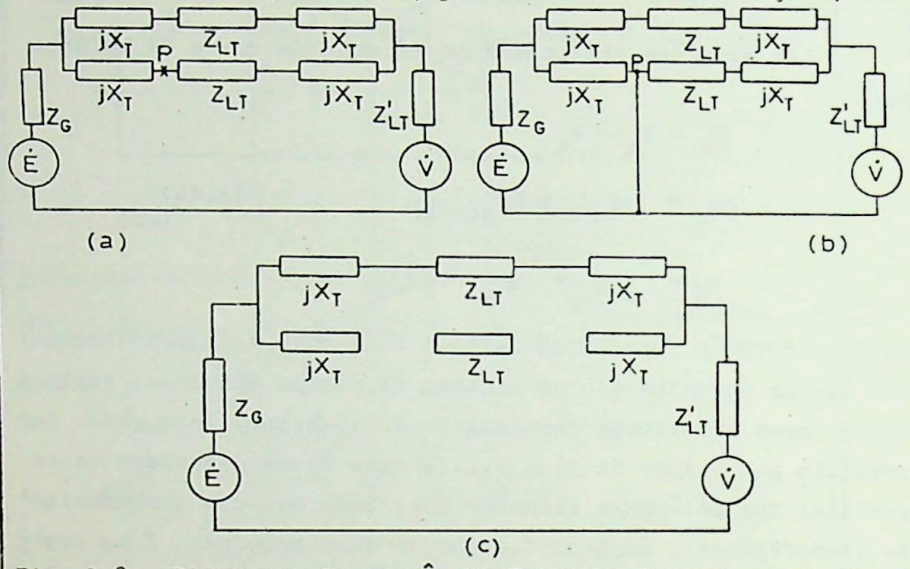


Fig. 3.8 - Diagramas de sequência Positiva do sistema da Fig. 3.8: a) Antes da falta; b) durante; c) depois

tes, durante e depois da falta, as "driving point impedance" e as impedâncias de transferência terão valores diferentes. Isto implica num considerável aumento dos já numerosos cálculos necessários ao estudo.

Vemos então que um estudo de estabilidade transitória feito através de cálculos manuais é extremamente trabalhoso e demorado, e portanto, caro. Quando os sistemas a serem estudados são muito grandes, os cálculos tornam-se de tal forma trabalhosos que, sem simplificações e reduções no sistema, seria impraticável a realização do estudo. Muitas vezes as reduções podem prejudicar a precisão dos cálculos, tornando-se inconvenientes. Nessas condições, os cálculos devem ser feitos sem simplificações ou reduções no sistema, de modo a se obter resultados tão próximos dos valores reais quanto possível.

3.4.3 - SOLUÇÃO COM UTILIZAÇÃO DO ANALISADOR DE CIRCUITOS: O trabalho para resolução de um sistema de equações de balanço torna-se bem menor quando se lança mão do Analisador de Circui

tos. É evidente que as curvas de balanço não podem ser obtidas diretamente do Analisador de Circuitos, porque ele é um aparelho estático que simula somente as características elétricas do sistema em estudo, e a equação de balanço envolve características dinâmicas das máquinas que compõem o sistema. Também com o auxílio do Analisador, as curvas de balanço deverão ser calculadas através da solução ponto por ponto da equação de balanço, de acordo com as expressões 3.42.

Todavia, podendo o analisador representar perfeitamente o sistema elétrico, tendo para isto impedâncias e fontes de tensão com magnitudes e ângulos de fase ajustáveis, o uso do Analisador nos proporciona uma facilidade que simplifica extremamente o nosso trabalho: a de ler diretamente a potência elétrica entregue por cada máquina ao sistema; esta facilidade nos dispensa de calcular as "driving point impedance" e as impedâncias de transferência do sistema, e de calcular as potências elétricas, para cada ponto da curva, que as máquinas entregam ao sistema, através das equações 3.19.

Nas figuras 3.9 e 3.10 apresentamos respectivamente, um fluxograma para cálculo de curvas de balanço com Analisadores de circuitos e o modelo de ficha comumente usado nesses cálculos. Essas figuras mostram claramente como se procede para obter as curvas de balanço com o auxílio do analisador.

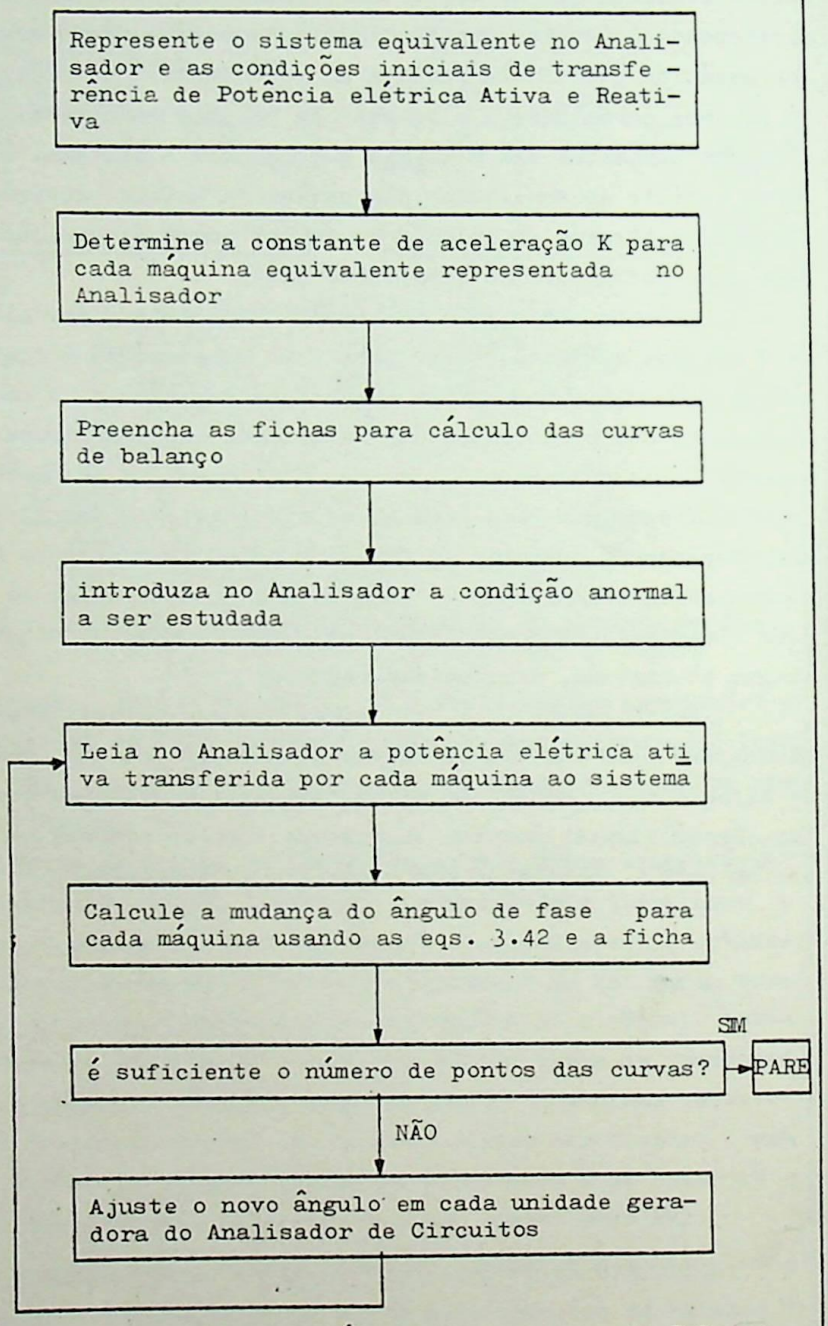


Fig. 3. 9 – Fluxograma para Cálculo das curvas de Balanço usando um Analisador de Circuitos.

Gerador Nº____
Caixa Nº____

ANALISADOR DE CIRCUITOS DE C.A.

CÁLCULO PONTO POR PONTO DA CURVA DE BALANÇO

Pg.nº _____
Data _____
MVA BASE____

ESTUDO Nº_____ PARA_____

CASO Nº _____

Constante de Inércia H = _____

Constante de Aceleração $k = \frac{180f(\Delta t)^2}{GH}$

[ ] Δt=_____seg

[ ] Δt=_____seg

E_G = _____p.u

X_G = _____p.u

G = _____p.u

FALTA

Tipo _____

Localização_____

Tempo em seg	Potencia Mec. no Rot.						
	Lida	Mult.	P_m °/1				
0_-			P_m				
	Pot. Transf. ao Sistema						
	Lida	Mult	P_e °/1	$P_{an}=P_m-P_{en}$	$k P_a$	$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1}+kP_{a(n-1)}$	$\delta_n = \delta_{n-1}+\Delta\delta_n$
0_+			P_{eo}				δ_0
0	média			$(P_m-P_{eo})/2$	$k P_{ao}$	$\Delta\delta_i = kP_{ao}$	δ_0
t_1			P_{el}	$P_m - P_{el}$	$k P_{al}$	$\Delta\delta_1 + kP_{a1}$	$\delta_1=\delta_0+\Delta\delta_1$
t_2							$\delta_2=\delta_1+\Delta\delta_2$
t_{n-1}			$P_{e(n-1)}$	$P_m-P_{e(n-1)}$	$kP_{a(n-1)}$	$\Delta\delta_{n-1}$	δ_{n-1}
t_n						$\Delta\delta_{n-1}+kP_{a(n-1)}$	$\delta_{n-1}+\Delta\delta_n$

Fig.3.10 - Ficha para Cálculo da Curva de Balanço

3.5 - LIMITAÇÕES DO ANALISADOR NOS CÁLCULOS DE CURVAS DE BALANÇO DE GERADORES

Conforme podemos observar na ficha padronizada apresentada na fig. 3.10 , o cálculo da curva de balanço de u'a máquina qualquer, quando feito usando-se um Analisador, envolve as suposições de que as seguintes grandezas mantém-se invariáveis durante a perturbação em estudo:

- Reatância da máquina
- Tensão interna da máquina
- Potência mecânica fornecida ao rotor

A boa qualidade da energia elétrica consiste fundamentalmente em que tensão e frequência se mantenham constantes nos sistemas elétricos de potência. A necessidade de que a energia elétrica apresentasse qualidade cada vez melhor estimulou o desenvolvimento dos reguladores de tensão e velocidade , que atingiram graus de precisão e rapidez tais que suas influências na estabilidade dos sistemas não mais podem ser desprezadas, conforme já comentamos no item 1.5.

A fim de visualisarmos melhor as influências dos reguladores de tensão e velocidade na estabilidade, vamos considerar o caso mais simples, de um gerador ligado a um barramento infinito através de sua reatância. Um barramento infinito mantém sua tensão e seu ângulo de fase sempre constantes; será, portanto, tomado como referência ($V = V\angle 0^\circ$)

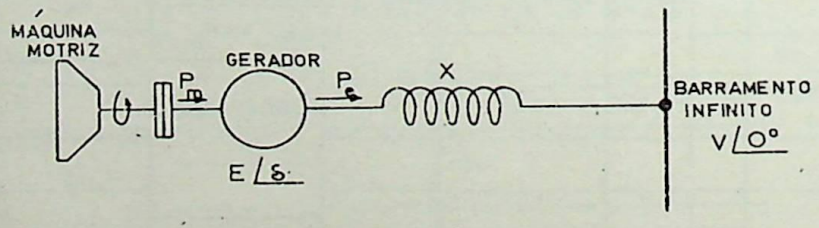


Fig. 3.11 - Gerador ligado a Barramento Infinito

Se a resistência for desprezível, então $\gamma = 90^\circ$ e $\alpha = 0$. A expressão da potência transferida ao barramento, obtida a

partir das equações 3.7, é

$$P_e = \frac{EV}{X} \operatorname{sen} \delta \qquad (3.43)$$

Substituindo a eq. 3.43 na eq. 3.28 obtemos a equação de balanço para o caso específico representado pela fig.3.11. Então,

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - \frac{EV}{X} \operatorname{sen} \delta \qquad (3.44)$$

Em condições normais de operação tem-se que $P_m = P_e$, e portanto, $P_a = 0$. Suponhamos que ocorra uma falta do tipo curto-circuito; quase sempre essa falta implica num aumento de impedância de transferência (neste caso reatância), e consequentemente numa súbita queda da potência elétrica transferida pelo gerador ao sistema, como se vê na equação 3.43. Surge então a potência de aceleração, que vai fazer com que o rotor procure uma nova posição de equilíbrio, segundo a equação de balanço do gerador (eq. 3.44). Se a falta for um curto-circuito, haverá uma queda de tensão considerável na impedância do gerador. Haverá também um aumento da velocidade do rotor devido à potência aceleradora que surgiu com a falta.

Se o gerador estiver equipado com reguladores de tensão e velocidade, a ação desses reguladores irá alterar os valores da tensão interna E e da potência mecânica P_m do gerador, ao longo do tempo. Devido à queda de tensão na impedância do gerador, a tensão em seus terminais estará abaixo do valor referência ajustado para o regulador de tensão, o qual vai atuar na excitação do gerador e elevar a sua tensão interna. O aumento da velocidade vai sensibilizar o regulador de velocidade, que atuará no sentido de fechar as válvulas de admissão de fluido na turbina que aciona o gerador, diminuindo então a potência mecânica P_m que é entregue ao gerador. A redução da potência mecânica pelo regulador de velocidade, e o aumento da potência elétrica, devido ao aumento da tensão interna pelo regulador de tensão, diminuem a potência aceleradora do gerador, conforme se ve na

eq. 3.44. Portanto, a instalação de reguladores de tensão e velocidade nos grupos geradores de um sistema elétrico de potência melhora a estabilidade do sistema, pois a redução da potência aceleradora faz com que o rotor procure sua nova posição de equilíbrio mais suavemente, e isto implica numa oscilação menor do ângulo δ em torno dessa nova posição de equilíbrio, aumentando então o limite de estabilidade.

O aumento do limite de estabilidade leva a um aumento dos tempos críticos de duração das diversas faltas que podem ocorrer no sistema. Esses aumentos dos tempos críticos podem ser consideráveis, e se for conseguido um meio de conhecê-los a escolha e calibração dos dispositivos de proteção poderá ser feita de modo muito mais racional e econômico. A não consideração dos reguladores de tensão e velocidade nos cálculos das curvas de balanço leva a resultados muito pessimistas, com tempos críticos abaixo dos valores reais. Portanto, não tem precisão os cálculos de curvas de balanço feitos com o uso de Analisadores de Circuitos, quando os geradores do sistema em estudo são equipados com reguladores de tensão e velocidade; as suposiçõesde que a potência mecânica fornecida ao gerador e a tensão interna desse gerador são constantes não são verdadeiras, pois equivalem adizer que os reguladores de tensão e velocidade não existem.

3.6 - REPRESENTAÇÃO DOS REGULADORES DE TENSÃO E DE VELOCIDADE

Sempre que se deseja considerar as influências que os reguladores de tensão e velocidade dos geradores de um sistema de potência exercem durante uma condição transitória desse sistema, duas serão as informações necessárias:

a) Funções de transferência ou diagrama de blocos dos reguladores e dos dispositivos açionados pelos reguladores;p. ex. das turbinas e suas válvulas de admissão para os reguladores de velocidade, e dos conjuntos de excitação para os reguladores de tensão.

b) perturbação a que cada gerador fica submetido duran

te todo o tempo do transitório que vai ser examinado.

Observação: o diagrama de blocos é uma forma de apresentar, através de uma figura, a função de transferência de um sistema de controle mais elaborado. Representa-se separadamente a função de transferência de cada parte do sistema por um bloco, que é ligado aos demais convenientemente, de acordo com o sistema. Maiores detalhes no Apêndice A deste trabalho.

De posse dessas informações, poderemos determinar qual vai ser a influência dos reguladores no transitório em estudo. Isto pode ser feito ou através de cálculos manuais, ou por cálculos em computadores digitais, ou então por simulação em computadores analógicos.

A simulação dos reguladores em computadores analógicos, para tornar mais precisos os estudos de estabilidade realizados em Analisadores de Circuitos, é o objetivo deste trabalho. A simulação dos reguladores é feita a partir de seus diagramas de blocos, e as perturbações são lidas no Analisador e introduzidas nos modelos montados no Computador Analógico; nele são obtidas as correções que deverão ser feitas pelos reguladores nos geradores do sistema de potência, sendo então essas correções introduzidas no Analisador. Caimos então num ciclo repetitivo de operações, que nada mais é do que a solução ponto por ponto da equação de balanço, onde se usa o Analisador de Circuitos para obtenção das potências transferidas pelas máquinas ao sistema, e o Computador Analógico para introduzir as influências dos reguladores de tensão e velocidade nas oscilações das máquinas desse sistema, do qual está sendo estudada a estabilidade transitória.

% % % %

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO DA REGULAÇÃO DE TENSÃO

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO DA REGULAÇÃO DE TENSÃO

4.1 - PRELIMINARES

Quando se deseja examinar as influências que um regulador de tensão de um gerador exerce durante um transitório desse gerador, é evidente que as características da excitatriz devem ser consideradas nesse estudo, pois sabemos que o regulador de tensão comanda a excitatriz, ficando a cargo desta fornecer a corrente de campo para o gerador. O regulador de tensão, juntamente com a excitatriz formam o SISTEMA DE EXCITAÇÃO do gerador.

Os diagramas de blocos existentes foram desenvolvidos de modo a representarem todo o sistema de excitação, e apresentam a forma mostrada na fig. 4.1.

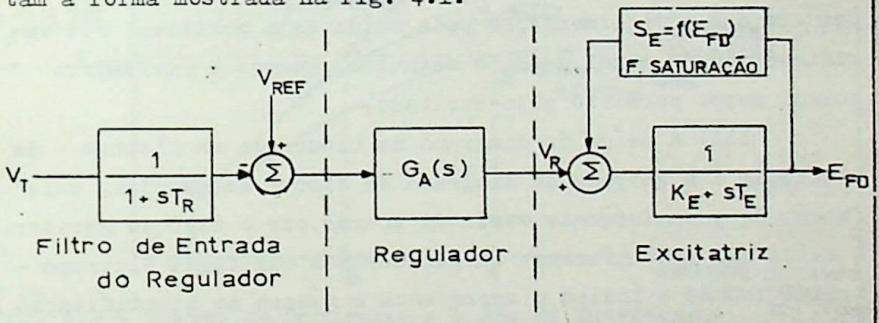


Fig. 4.1 - Diagrama de Blocos de um Sistema de Excitação

Na fig. 4.1, são os seguintes os significados dos símbolos:

- V_T - Tensão no terminal do gerador
- T_R - Constante de tempo do filtro de entrada do regulador
- V_{REF} - Valor referência ajustado para o regulador
- $G_{A(s)}$ - Função de transferência do regulador
- V_R - Tensão de saída do regulador
- K_E - Constante da excitatriz, relativa ao campo auto-excitado.

T_E - Constante de tempo da excitatriz

E_{FD} - Tensão de saída da excitatriz (aplicada ao campo do gerador)

S_E - Função saturação

Cabem então as seguintes observações:

I) A função saturação S_E é utilizada para se considerar o efeito da saturação na excitatriz, através de uma realimentação na função de transferência da excitatriz linearizada.

II) A constante K_E da excitatriz, se tiver um valor diferente da unidade ($K_E \neq 1$), leva à modificação da constante de tempo do bloco $\boxed{\frac{1}{K_E + T_E S}}$. Realmente, é o que acontece, pois quando é usado na excitatriz um campo paralelo auto-excitado, K_E representa o ajuste do reostato de campo, e faz com que a realimentação pela saída seja positiva. Foi verificado que o sinal de K_E é negativo, quando a excitatriz possui campo paralelo auto-excitado.

III) A saída do diagrama de blocos de um sistema de excitação é a entrada do diagrama de blocos do gerador, cuja função de transferência varia de acordo com o tipo do gerador. A saída que nos interessa do gerador é a sua força eletromotriz E_n, onde o índice n representa o número de identificação do gerador, no sistema de potência em estudo.

4.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A FUNÇÃO SATURAÇÃO

4.2.1 - QUANTIDADES P.U. NOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO: No desenvolvimento dos diagramas de bloco dos sistemas de excitação tornou-se necessário estabelecer uma tensão base que permitisse o uso das quantidades p.u. Com esse objetivo, convencionou-se então o seguinte:

I) No gerador, a tensão de 1 p.u. é definida como sendo a tensão nominal.

II) Na excitatriz, a tensão de saída de 1 p.u. é definida como sendo a tensão necessária para produzir a tensão nominal do gerador na linha de entreferro do gerador.

4.2.2 - FUNÇÃO SATURAÇÃO DA EXCITATRIZ: A função saturação S_E da excitatriz é definida pelo IEEE como sendo um fator que multiplica a tensão de saída E_{FD}, para representar o aumento de excitação que é exigido pela excitatriz, devido a saturação.

A função saturação S é o aumento relativo da excitação, devido a saturação, que o gerador considerado necessita para sua tensão de saída atingir um valor fixado, em relação ao valor de excitação determinado pela linha de entreferro.

No caso de uma excitatriz, considera-se a curva de saturação correspondente ao funcionamento da máquina alimentando uma resistência constante.

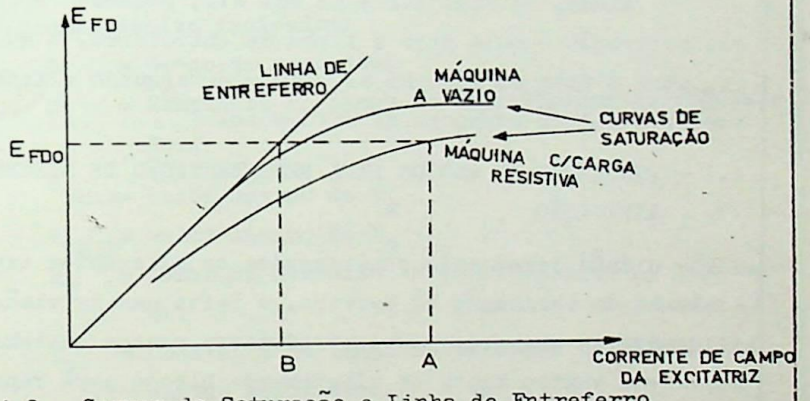


Fig. 4.2 - Curvas de Saturação e Linha de Entreferro

Numa excitatriz cujas curvas de saturação sejam as da fig. 4.2, para uma tensão de saída E_{FDO} a função terá o seguinte valor:

$$S_E = \frac{A - B}{B} = \frac{A}{B} - 1 \quad . \qquad (4.1)$$

onde,

A = corrente de excitação determinada na curva de saturação p/carga resistiva, para $E_{FD} = E_{FDO}$

B = corrente de excitação determinada na linha de entreferro, para $E_{FD} = E_{FDO}$

A função saturação $S_E = f(E_{FD})$ para o caso representa

do pela fig. 4.2 e pela eq. 4.1 tem o aspecto mostrado na fig. 4.3

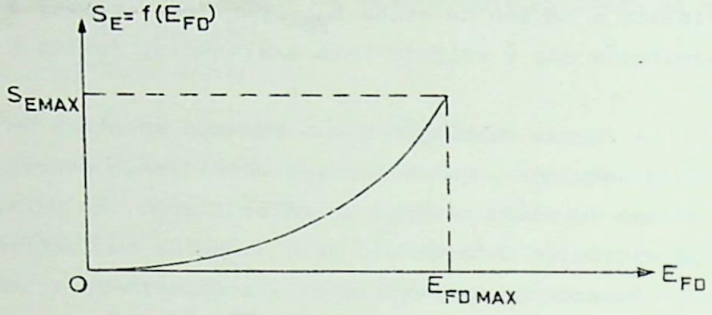


Fig. 4.3 - Função Saturação

Ainda, na fig. 4.2 e na eq. 4.1, pode-se ver que a função saturação é nula para a linha de entreferro, o que é lógico, pois o fato da máquina se comportar segundo a linha de entreferro indica ausência de saturação.

4.3 - DIAGRAMAS DE BLOCOS PARA REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Após terem sido considerados os diferentes tipos de sistemas de excitação em serviço, e feita uma previsão dos aperfeiçoamentos que podem ser introduzidos nesses sistemas, desenvolveu-se quatro tipos de diagramasde blocos para representação dos sistemas de excitação. Estes quatro tipos possibilitam uma boa representação de todos os sistemas modernos. Alguns sistemas mais antigos devem ser aproximados para um dos quatro tipos, ou então supõe-se a máquina com excitação fixa.

Apresentamos a seguir os quatro tipos de diagramas de blocos que foram desenvolvidos para representar os sistemas de excitação, pelo Grupo de Trabalho de Sistemas Excitação do IEEE.

SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 1 - REGULADOR DE AÇÃO CONTÍNUA E EXCITATRIZ: Este tipo de sistema de excitação representa a maioria dos modernos sistemas atualmente em serviço ou em fornecimento. O diagrama de blocos tipo 1 é mostrado na fig. 4.4.

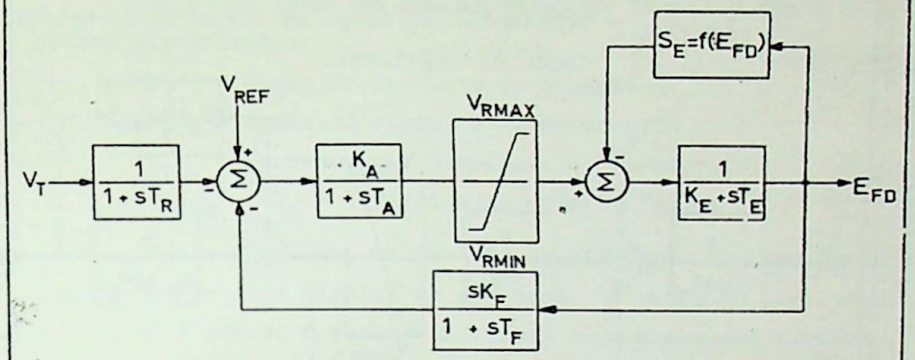


Fig. 4.4 - Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação Tipo 1

Os novos símbolos que aparecem, na fig. 4.4 tem os significados abaixo indicados:

K_A = Ganho do regulador

T_A = Constante de tempo do amplificador do regulador.

V_{RMAX} = Valor máximo de V_R

V_{RMIN} = valor mínimo de V_R

K_F = Ganho do circuito de estabilização do regulador

T_F = Constante de tempo do circuito de estabilização do regulador.

SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 2 - SISTEMA RETIFICADOR ROTATIVO: é aplicado para unidades onde o principal sinal de entrada para a malha de amortecimento, esta sendo representada pela função de transferência da realimentação, é a tensão de saída do regulador. Na realimentação aparece uma constante de tempo adicional para compensar a não inclusão da excitatriz na malha de amortecimento. Outras características do tipo 2 são semelhantes as do tipo 1.

A fig. 4.5 mostra o diagrama de blocos representativo dos sistemas de excitação tipo 2.

Os novos símbolos que aparecem na fig. 4.5 tem os significados abaixo indicados:

T_{F1}) T_{F2} - Constantes de tempo do circuito de estabilização do regulador.

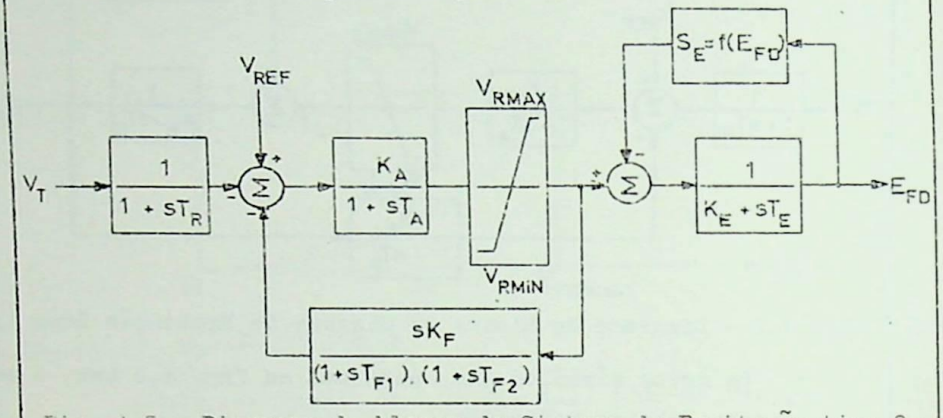


Fig. 4.5 - Diagrama de blocos do Sistema de Excitação tipo 2-

SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 3 - SISTEMA ESTÁTICO COM USO DOS SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE DO GERADOR: esse tipo de diagrama de bloco é utilizado para representar os sistemas nos quais a tensão e a corrente nos terminais do gerador são utilizadas como fonte para a excitação, conforme mostra a fig. 4.6.

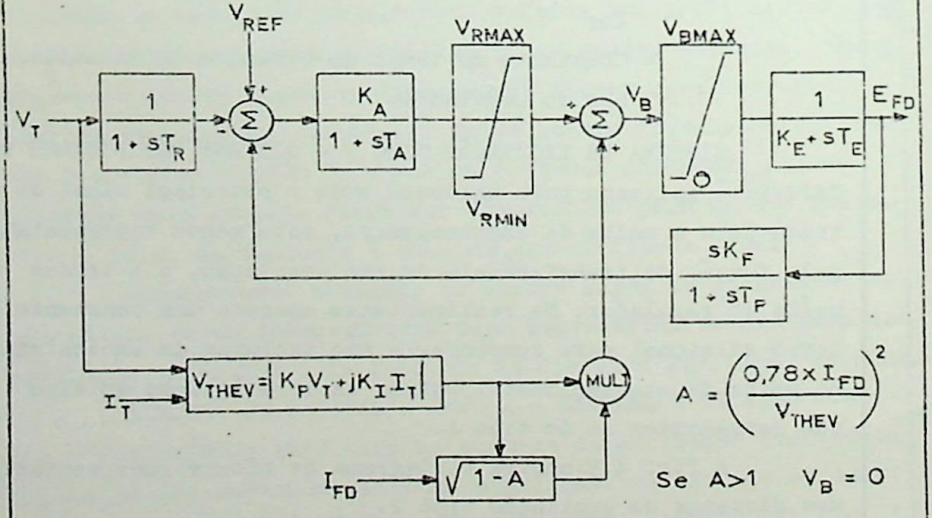


Fig. 4.6 - Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação Tipo 3

Os novos símbolos que aparecem na fig. 4.6 tem o seguinte significado:

K_I = Ganho do circuito de corrente

K_P = Ganho do circuito de potencial

I_T = Corrente nos terminais do gerador

V_{THEV}, A, V_B - definidos na própria figura

Vemos então que um sistema de excitação do tipo 3 é comandado por dois sinais: um é o sinal de saída do regulador, e o outro é obtido a partir da tensão e corrente nos terminais do gerador. K_P é o coeficiente do sinal da tensão terminal, obtida nos secundários dos transformadores de potencial, e K_I se refere ao sinal da corrente terminal, obtido nos secundários dos transformadores de corrente. Esse tipo de regulador apresenta ainda um elemento lógico que torna nulo o sinal de entrada da excitatriz (V_B), quando o valor de A (definido na fig. 4.6) ultrapassa a unidade ($A > 1$).

A função de transferência $\frac{1}{K_E + ST_E}$ representa as constantes de transformador de excitação.

SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 4 - AÇÃO NÃO CONTÍNUA: Os três tipos de diagramas de blocos mostrados anteriormente representam todos os modernos sistemas de excitação de ação contínua, e que tem alto ganho e grande velocidade de atuação. O diagrama de blocos tipo 4 é utilizado para representar os outros sistemas de excitação, os quais foram instalados antes do desenvolvimento dos sistemas de ação contínua.

Basicamente, o tipo 4 é um sistema com duas velocidades de resposta. Para pequenos erros, a correção é feita através de um reostato operado por um servomotor. Quando os erros são grandes, rapidamente resistências são curto-circuitadas ou inseridas no circuito do regulador, de forma a aplicar um forte sinal de comando na excitatriz. A fig. 4.7 ilustra como se dá essa ação.

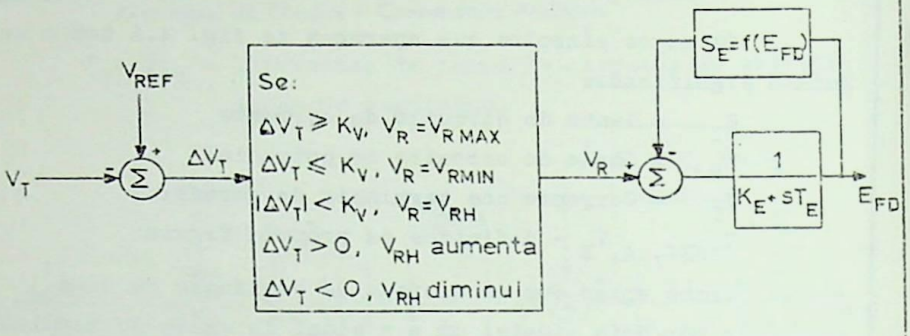


Fig. 4.7 - Operação dos Sistemas de Excitação tipo 4

Como vemos na fig. 4.7, dependendo da magnitude do erro de tensão , V_T, o regulador atua de diferentes maneiras. Se o erro de tensão é maior do que o valor ajustado (K_V) para um contator, a tensão V_{RMAX} ou V_{RMIN} é aplicada a excitatriz, dependendo do sinal do erro de tensão. Para um erro de tensão menor do que K_V (tipicamente 5%), então a tensão aplicada à excitatriz será igual ao valor ajustado no reostato. O reostato será atuado pelo servomotor no sentido de aumentar ou diminuir a excitação, dependendo do sinal do erro da tensão terminal do gerador, em relação ao valor referência.

O diagrama de blocos tipo 4 é mostrado na fig. 4.8

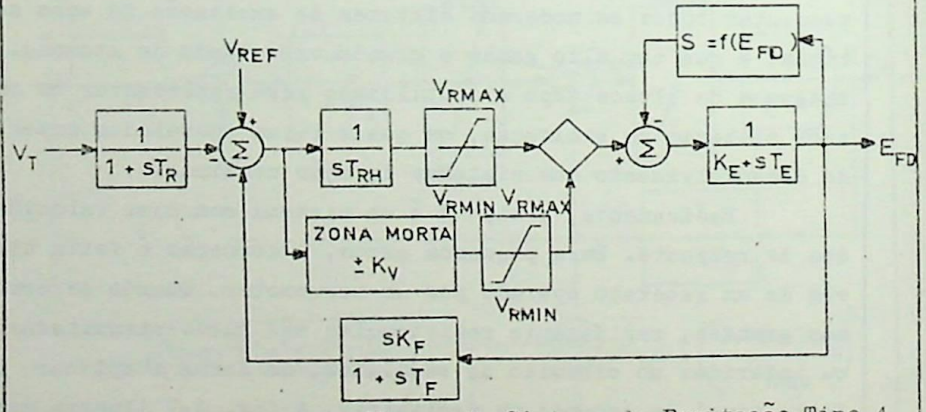


Fig. 4.8 - Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação Tipo 4

Os novos símbolos que aparecem na fig. 4.8 tem o seguinte significado:

V_{RH} - Ajuste do reostato de campo
T_{RH} - Constante de tempo do reostato
K_v - Ajuste do contator seletor do ajuste a ser feito pelo regulador (fino/grosso)

4.4 - REPRESENTAÇÃO DO GERADOR

Para representarmos o gerador, necessitamos um bloco, cuja variável de entrada seja a tensão terminal E_{FD} da excitatriz, e cuja variável de saída seja a f.e.m. E_G do gerador que está sendo considerado. Como sabemos, a f.e.m. E_G do gerador depende diretamente da corrente de campo I_{FD}, estando as duas grandezas relacionadas entre si pela curva de saturação a vazio do gerador. É importante salientar que a f.e.m. atinge o valor correspondente a uma determinada corrente de campo instantaneamente; não há qualquer atraso da f.e.m. em relação a corrente de campo.

No circuito do campo, a corrente de campo I_{FD} apresenta um atraso em relação a tensão de saída E_{FD} da excitatriz, determinado pela constante de tempo daquele circuito, que nada mais é do que um circuito R-L. Essa constante de tempo nada mais é do que a constante de tempo transitória de eixo direto (vide ref. 8), quando se despreza os enrolamentos amortecedores.

O valor da constante de tempo transitória de eixo direto depende do circuito da armadura, por causa do acoplamento magnético existente entre este e o circuito do campo. Então, a constante de tempo do campo pode ser uma das seguintes:

a) CONSTANTE DE TEMPO DO CAMPO COM ARMADURA EM CIRCUITO ABERTO (T'_{dO}): Se a armadura está em circuito aberto, e não havendo enrolamento amortecedor, o circuito de campo não será afetado por qualquer outro circuito. Sob estas condições, qualquer mudança da corrente de campo, em resposta a qualquer mudança do valor da f.e.m. que alimenta o campo, será governada pela constante de tempo T'_{dO}, que é dada pela expressão correspondente a um simples circuito série R-L, como segue:

$$T'_{dO} = \frac{L_{FD}}{R_{FD}} \left[\text{seg}\right] \qquad (4.2)$$

onde:

L_{FD} - Auto-indutância do circuito de campo em Henrys

R_{FD} - Resistência do circuito de campo em ohms.

O valor de T'_{dO} oscila entre 1,5 e 9,5 segundos, estando os valores mais frequentes em torno de 5,65 seg.

b) CONSTANTE DE TEMPO DO CAMPO COM ARMADURA EM CURTO-CIRCUITO (T'_d): Se tanto o circuito de campo quanto o circuito da armadura estiverem fechados, a presença de corrente em qualquer um dos circuitos induzirá corrente no outro. Portanto, quando a f.e.m. aplicada ao campo muda, a mudança correspondente da corrente de campo é feita com um atraso devido as reações da auto-indução do enrolamento de campo e da mútua indução do enrolamento da armadura.

A constante de tempo transitória de eixo direto é a relação entre a indutância aparente do circuito de campo, quando acoplado magnéticamente com os circuitos fechados da armadura, e a resistência aparente do circuito de campo nas mesmas condições.

Com a armadura em curto-circuito, a indutância efetiva do circuito de campo será bem menor do que com a armadura em circuito aberto, pela mesma razão que em um transformador a indutância em curto-circuito é menor do que a indutância em circuito aberto. A resistência aparente do enrolamento de campo se comporta de modo diferente da indutância, pois seu valor é praticamente o mesmo de quando a armadura está em circuito aberto.

Demonstra-se que a relação T'_d/T'_{dO} é igual a relação X'_d/X_d onde X'_d é a reatância transitória de eixo direto e X_d é a reatância síncrona de eixo direto

$$T'_d = \frac{X'_d}{X_d} T'_{dO} \qquad (4.3)$$

Os valores de T'_d variam entre 0,4 seg e 3,3 seg, sendo 1,5 seg o valor mais frequentemente encontrado.

c) CONSTANTE DE TEMPO DO CAMPO COM CIRCUITO QUALQUER NA ARMADURA: A constante de tempo do campo, com a armadura em circuito aberto, é um valor particular da constante de tempo do campo, válido somente para aquela condição. Por sua vez, a constante de tempo do campo com a armadura em curto-circuito é um valor particular válido somente para esta condição. Torna-se evidente que, se o circuito da armadura for fechado através de impedâncias externas equilibradas, a constante de tempo do campo terá um valor entre T'_d e T'_{dO}. Se as impedâncias externas forem puramente reativas, a constante de tempo é dada por uma modificação da equação 4.3, e que apresentamos na eq. 4.4.

$$T_{FD} = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e} T'_{dO} \qquad (4.4)$$

onde X_e é a reatância externa do circuito da armadura. Se a impedância externa tiver grande resistência, ou se a máquina estiver conectada a um circuito que tenha outras máquinas síncronas de grande porte (o que sempre ocorre nos estudos de estabilidade) a situação é mais complexa. Porém, em todos os casos a constante de tempo do campo pode ser colocada em função da constante de tempo do campo com armadura em circuito aberto (T'_{dO}).

DIAGRAMA DE BLOCOS DO GERADOR: com base nas considerações anteriores, e trabalhando no sistema p.u. definido para sistemas de excitação, fazemos a representação do gerador por um atraso devido a constante de tempo do campo (T_{FD}) do gerador e pela função saturação (S_G) do gerador

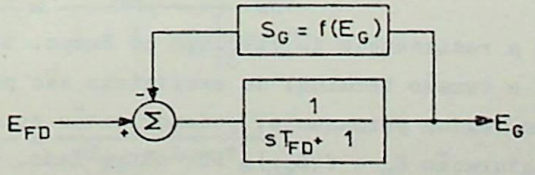


Fig.4.9 - Diagrama de Blocos do Gerador

A constante de tempo variará de acordo com a situação do circuito da armadura, dentro da seguinte faixa de valores:

$$T'_d \leqslant T_{FD} \leqslant T'_{dO} \qquad (4.5)$$

A representação dos geradores pode ser mais completa' do que aquela apresentada na fig. 4.9, levando em considera - ção o estado subtransitório e a saliência da máquina. Todavia, na realização de estudos de estabilidade, a representação do' estado subtransitório pode ser omitida, pois devido a sua curtíssima duração, pouca influência ele poderá ter no comportamento dinâmico dos geradores. Além disso, a não representação do estado subtransitório conduz a resultados pessimistas, dando-nos, portanto, uma certa margem de segurança. Por outro lado, a representação da saliência das máquinas de polos salientes não teria sentido, visto que, no Analisador de Circuitos, a única forma de se representar um gerador é através de uma tensão atrás de uma impedância, que serão, respectivamente, a f.e.m. E_G e a reatância transitória de eixo direto (X'_d) desse gerador. Devido a estas considerações, a representação do gerador, para obtenção das variações da f.e.m. devidas a ação do regulador de tensão, deve ser feita através do diagrama de blocos mostrado na fig. 4.9.

FUNÇÃO SATURAÇÃO DO GERADOR: Também no gerador a função saturação é um fator que multiplica uma tensão, que neste caso será a f.e.m. do gerador (E_G), para representar o aumento da corrente de campo exigido pelo gerador, devido a saturação.

Em regime permanente, a corrente de campo é dada pelo seguinte equação:

$$I_{FD} = \frac{E_{FD}}{R_{FD}} \qquad (4.6)$$

onde R_{FD} é a resistência do circuito de campo. Se a corrente de campo e a tensão terminal da excitatriz são proporcionais entre si em regime permanente, podemos então construir uma curva de saturação $E_G = f(E_{FD})$. Por outro lado, se trabalhar-

mos com as quantidades p.u., definidas pelo IEEE para siste - mas de excitação, na construção da curva $E_G = f(E_{FD})$, a linha de entreferro dessa curva será uma reta de inclinação unitá - ria, em razão das definições das quantidades p.u. para siste- mas de excitação.

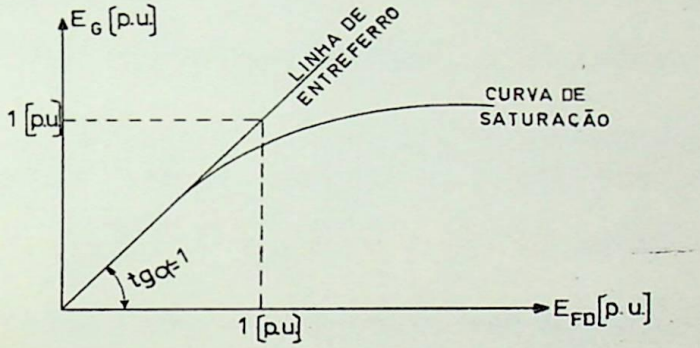


Fig. 4.10 - Curva de Saturação do Gerador

Então, o uso das quantidades p.u. faz com que o bloco representativo do gerador tenha ganho unitário.

Ainda considerando uma condição de funcionamento em regime permanente, teremos um valor fixo para a função satu - ração, e que pode ser determinado pelo teorema do valor final (Apêndice A.2.5). Assim sendo, consideremos a função de trans ferência do gerador, que tiramos do diagrama de blocos da fig 4.9. Suponhamos que seja aplicado ao campo do gerador um de - grau de tensão de amplitude $E_{FD} = A$. Como estamos visando o regime permanente, podemos considerar a função saturação S_G como sendo uma constante; nestas condições, a função de trans ferência do gerador será:

$$\frac{E_G(s)}{E_{FD}(s)} = \frac{\dfrac{1}{sT_{FD} + 1}}{1 + S_G \dfrac{1}{sT_{FD} + 1}} \qquad (4.7)$$

$$\frac{E_G(s)}{E_{FD}(s)} = \frac{1}{sT_{FD} + 1 + S_G}$$

Para o degrau aplicado $E_{FD}(t) = A\,u(t)$ teremos que:

$$E_{FD}(s) = \frac{A}{s} \qquad (4.8)$$

A transformada de Laplace da f.e.m. do gerador para o degrau de tensão aplicado ao campo é obtida a partir das eqs. 4.7 e 4.8

$$E_G(s) = \frac{A}{s} \cdot \frac{1}{sT_{FD} + 1 + S_G} \qquad (4.9)$$

O valor da f.e.m. do gerador, em regime permanente, é dado pelo teorema do valor final (item A.2.5)

$$\lim_{t \to \infty} E_G(t) = \lim_{s \to 0} sE_G(s) \qquad (4.10)$$

Substituindo a eq. 4.9 na eq. 4.10 obtemos:

$$\lim_{t \to \infty} E_G(t) = \lim_{s \to 0} s \times \frac{A}{s} \times \frac{1}{sT_{FD} + 1 + S_G}$$

$$\lim_{t \to \infty} E_G(t) = \frac{A}{1 + S_G} \qquad (4.11)$$

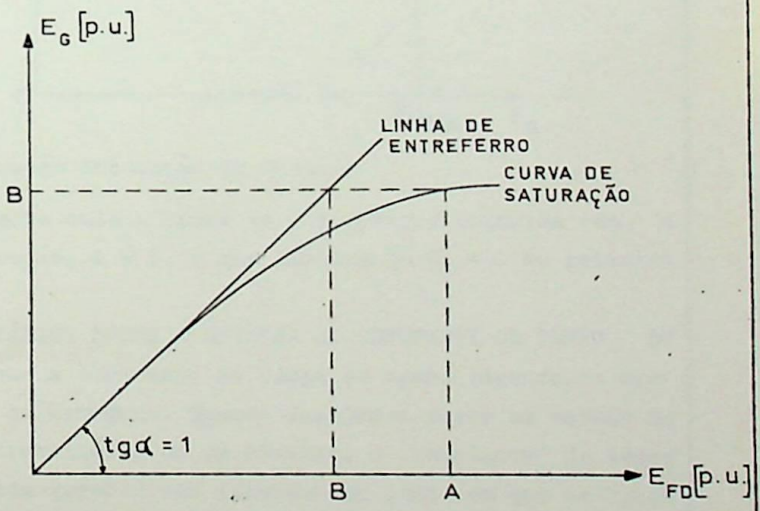
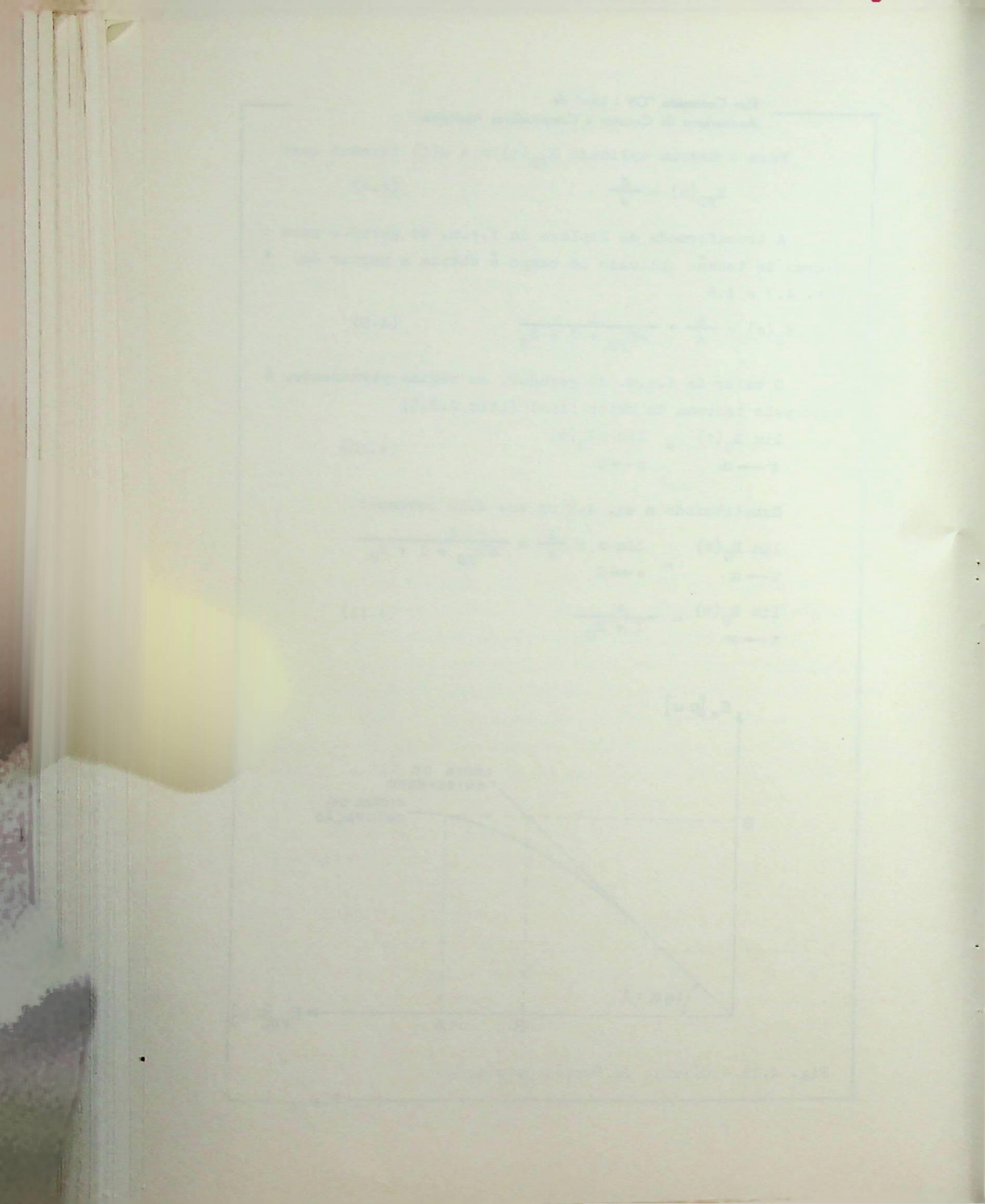


Fig. 4.11 - Cálculo da Função Saturação



Se trabalhamos com quantidades p.u., e se chamamos de B o valor da tensão de campo necessária para produzir, na linha de entre-ferro, a mesma f.e.m. que é produzida pela tensão de campo A na curva de saturação, a eq. 4.11 fica

$$B = \frac{1}{1 + S_G}$$

donde:

$$S_G = \frac{A}{B} - 1 = \frac{A - B}{B} \qquad (4.12)$$

Portanto, a função saturação para o gerador tem a mesma expressão que a função saturação da excitatriz, com a diferença que, para o gerador, a curva de saturação utilizada é a do funcionamento a vazio. Neste caso, a função saturação terá o aspecto mostrado na fig. 4.12.

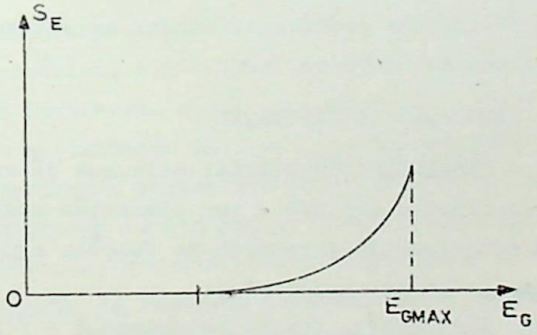


Fig. 4.12 - Função Saturação do Gerador

No trecho onde a linha de entre-ferro coincide com a curva de saturação, A = B, o que implica em $S_G = 0$ no referido trecho.

COMENTÁRIOS SOBRE A ESCOLHA DA CONSTANTE DE TEMPO DO CAMPO: Vimos que a constante de tempo do campo depende do circuito externo da armadura. Quando desejamos fazer um estudo de estabilidade transitória em um sistema, a constante de tempo do campo em cada gerador vai depender do ponto em que se localiza a falta que se deseja estudar, e do tipo dessa falta. Quando a localização da falta e os elementos do sistema são tais

que haja facilidade de se calcular as constantes de tempo , através das equações 4.3 ou 4.4, então é evidente que devemos utilizar valores calculados. Quando o cálculo dessas constantes é excessivamente trabalhoso, ou impossível, o melhor procedimento é adotar valores que nos conduzam a resultados pessimistas. Sob o ponto de vista da estabilidade é evidente que os piores valores para as constantes de tempo do campo são os maiores valores, pois eles farão com que a corrente de campo demore mais para atingir o valor correspondente a tensão ' de saída do sistema de excitação. Na impossibilidade total de calcular ou estimar as constantes de tempo do campo, a qual ocorre na grande maioria dos estudos de estabilidade, usa-se então a constante de tempo do campo com armadura em circuito' aberto (T'_{dO}), que é o maior valor possível da constante de tempo do campo. Desta maneira, os resultados obtidos serão os ' mais pessimistas possíveis, no que se refere aos valores das constantes de tempo do campo.

4.5 - SIMULAÇÃO DA SATURAÇÃO

4.5.1 - SUB-ROTINA UTILIZADA: pelo que já vimos da função saturação ficou claro que a sua simulação analógica deverá ser feita com o uso de geradores de funções ajustáveis. Duas sub-rotinas podem ser utilizadas:

I) Ajustar a função saturação S = f(E) no gerador e posteriormente fazer a multiplicação da função saturação pela tensão E da máquina considerada (excitatriz ou gerador).

II) Ajustar diretamente o produto SxE no gerador de funções ajustáveis

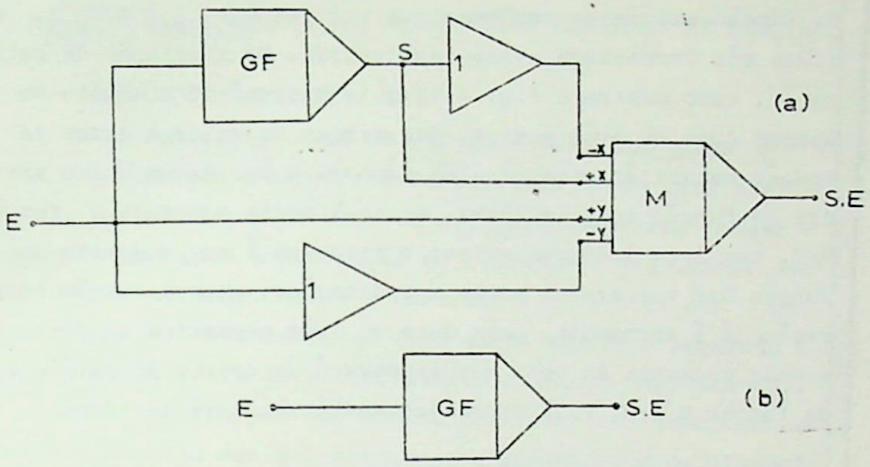


Fig. 4.13 - Simulação da Saturação: a) Sub-rotina I;
b) Sub-Rotina II.

Ao examinarmos a fig. 4.13, vemos que a sub-rotina II é muito mais econômica, pois a sub-rotina I utiliza um multiplicador e dois inversores a mais. Entretanto, a experiência mostrou que uma aproximação da função saturação para dois ou três trechos lineares é perfeitamente satisfatória; por esse motivo, os fabricantes se limitam a fornecer dois valores para a função saturação, geralmente correspondentes a 75% e a 100% do valor máximo da tensão E considerada. A função saturação será nula para valores de E correspondentes ao trecho onde a curva de saturação coincide com a linha de entreferro.

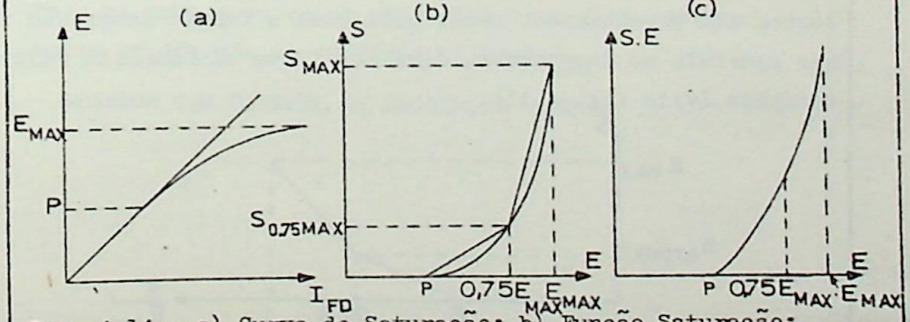


Fig. 4.14 - a) Curva de Saturação; b) Função Saturação;
c) Produto SxE.

Na fig. 4.14.b podemos ver como é feita a aproximação da função saturação com base nos valores $S_{0,75MAX}$ e S_{MAX}, os quais são fornecidos pelos fabricantes. Na simulação da saturação, como mostra a fig. 4.13.a, é necessário o ajuste de apenas dois ou três pontos, que seriam os valores dados da função saturação para aqueles pontos. O uso de um único gerador de função (fig. 4.13.b), no qual seria ajustada a função SxE, tem dois inconvenientes: o primeiro é que o ajuste da função SxE vai trazer novas aproximações, pois a função saturação já é aproximada, para dois ou três segmentos de reta, e a cada segmento de reta corresponderá um trecho de parábola da função S x E, cuja expressão analítica será da forma:

$$SxE = aE^2 + bE + c \qquad (4.13)$$

onde a,b e c são coeficientes constantes. No gerador de funções ajustáveis, cada um desses trechos de parábola é representado por segmentos de reta, o que é uma nova aproximação na representação da saturação. O segundo inconveniente é uma consequência do primeiro: o ajuste de um gerador de funções ajustáveis é bastante trabalhoso, e tanto mais o será quanto maior for o número de pontos a serem ajustados. Por essa razão, recomendamos representar a saturação no Computador Analógico através da sub-rotina I, mostrada na fig. 4.13.a.

4.5.2 - IMPLICAÇÕES DO ESCALAMENTO NA SIMULAÇÃO DA SATURAÇÃO: Geralmente a tensão E deve ser representada no Computador Analógico com escalamento, razão pela qual a função saturação, ao ser ajustada no computador, deve ser feita em função do valor escalado (vide fig. 4.15).

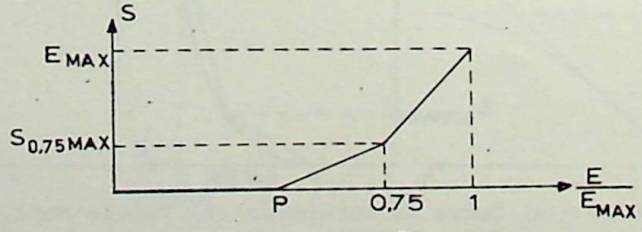


Fig.4.15 - Ajuste da Função Saturação

4.6 - SIMULAÇÃO ANALÓGICA DOS GERADORES E SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

4.6.0 - OBSERVAÇÕES PRELIMINARES:

a) Identificação das Sub-Rotinas: Nos diagramas de blocos dos sistemas a serem simulados, cada bloco será identificado por uma letra escrita em seu canto superior esquerdo. No programa para a simulação no computador analógico, cada sub-rotina correspondente a um bloco é envolvida por uma linha retangular tracejada, em cujo canto superior esquerdo é escrita a mesma letra de identificação do bloco representado.

b) Identificação dos potenciômetros: os potenciômetros pertencentes a uma das sub-rotinas que representam os blocos são identificados pela letra de identificação do bloco e por um número. Existe uma numeração para cada sub-rotina. Os potenciômetros não pertencentes às sub-rotinas são simplesmente numerados, não possuindo letra de identificação.

c) Identificação dos elementos ativos: será feita de forma idêntica a dos potenciômetros, com mais um pequeno detalhe: os somadores correspondentes aos pontos de soma do diagrama de blocos terão o mesmo número desses pontos de soma.

d) A numeração dos elementos de uma sub-rotina será iniciada sempre pelos elementos de entrada da variável de entrada do bloco que a sub-rotina representa.

e) O índice zero sempre indica condição inicial. Quando aparece na numeração de um potenciômetro, este será um potenciômetro de entrada de condição inicial.

4.6.1 - GERADOR COM SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 1

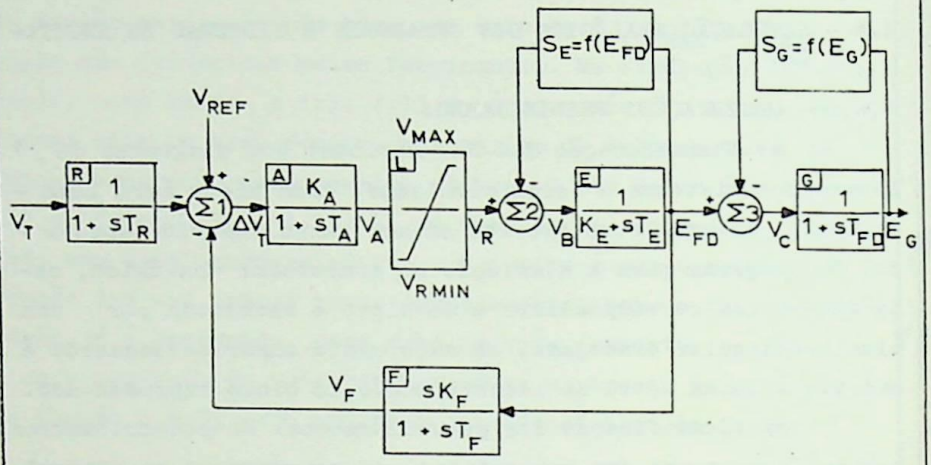


Fig. 4.16 - Diagrama de Blocos de Gerador com Sistema de Excitação Tipo 1

O programa correspondente ao diagrama de blocos da fig. 4.16 é mostrado na fig. 4.17. Admitindo que a simulação deva ser feita com os escalamentos de amplitude indicados no programa, e com um escalamento de tempo dado pela expressão

$$t_c = at \qquad (4.14)$$

devemos dar as seguintes informações:

a) Ajustes dos potenciômetros: são dados na tabela 4.1, e calculados a partir dos parâmetros indicados na fig. 4.16 , da tabela B.1 (sub-rotinas) e dos escalamentos de tempo e amplitude.

b) Ajuste da função saturação: vide item 4.5.1.

c) Condições Iniciais para os Integradores: Imediatamente antes da perturbação que vai ser estudada, o gerador está operando em regime permanente. Nestas condições, a f.e. m. do gerador no instante inicial da falta é obtido através de um estudo de "load-flow" para aquelas condições de regime. Portanto:

E_{GO} = valor obtido no "load-flow"

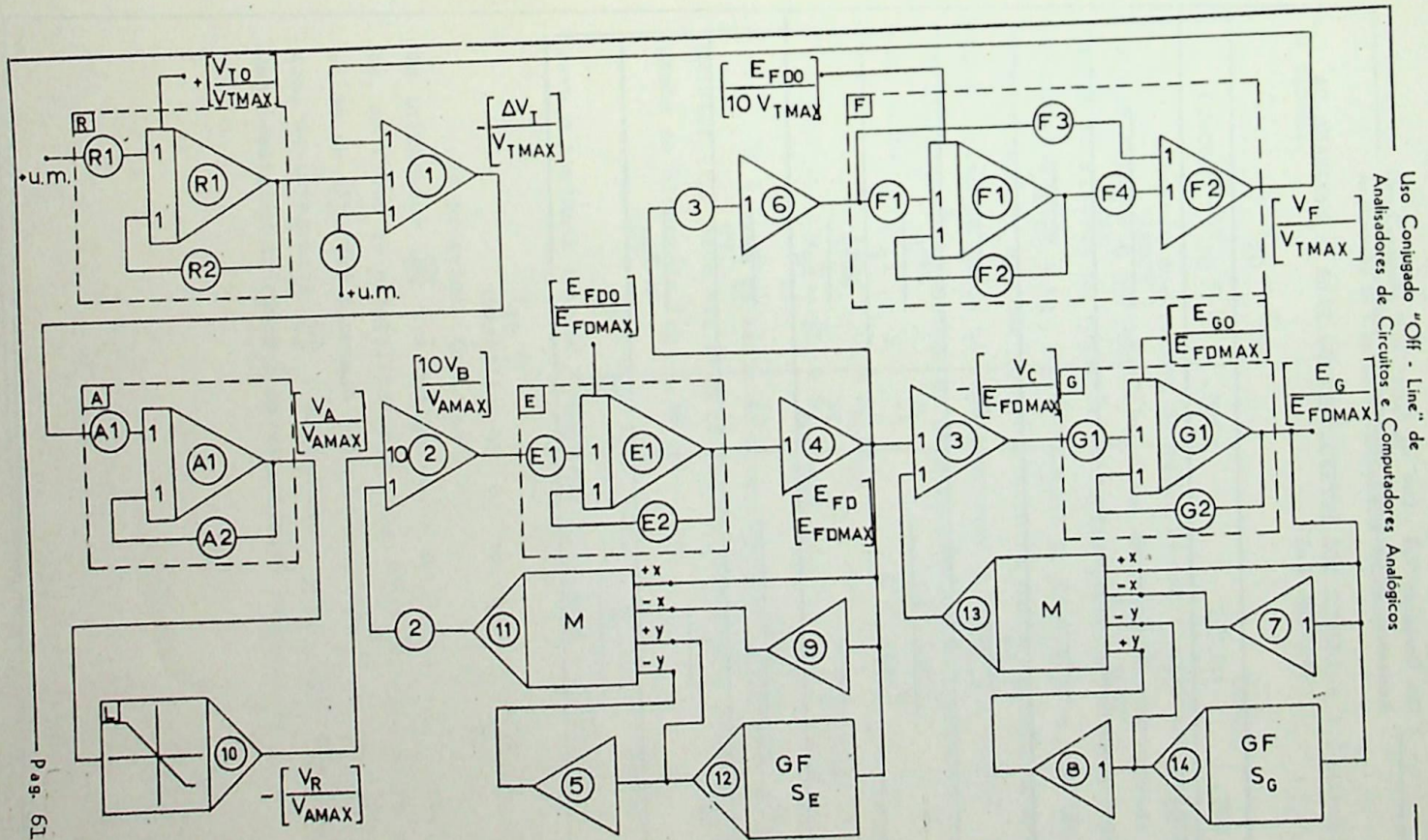


Fig. 4.17 - Simulação Analógica de Gerador com Sistema de Excitação Tipo 1

Tabela 4.1 - AJUSTE DOS POTENCIÔMETROS PARA O PROGRAMA DA FIGURA 4.17

POT.	AJUSTE	POT.	AJUSTE
R1	$\frac{V_T}{V_{TMAX} \text{ a } T_R}$	3	$\frac{E_{FDMAX}}{10\ V_{TMAX}}$
R2	$\frac{1}{\text{a } T_R}$	F1	$\frac{1}{\text{a } T_F}$
1	$\frac{V_{REF}}{V_{TMAX}}$	F2	$\frac{1}{\text{a } T_F}$
A1	$\frac{V_{TMAX}\ K_A}{V_{AMAX} \text{ a } T_A}$	F3	$\frac{10K_F}{T_F}$
A2	$\frac{1}{\text{a } T_A}$	F4	$\frac{10K_F}{T_F}$
E1	$\frac{V_{AMAX}}{10E_{FDMAX} \text{ a } T_E}$	G1	$\frac{1}{\text{a } T_{FD}}$
E2	$\frac{K_E}{\text{a } T_E}$	G2	$\frac{1}{\text{a } T_{FD}}$
2	$\frac{10E_{FDMAX}}{V_{AMAX}}$		

OBSERVAÇÃO: V_T é o valor lido no Analisador

e ainda:

$$V_{TO} = V_{REF}$$
$$\Delta V_{TO} = 0 \qquad (4.15)$$

Através do Teorema do valor final, é possível relacionar as variáveis intermediárias com as variáveis de entrada e saída do sistema na condição de regime permanente. Para o gerador obtivemos a eq. 4.11, deduzida no item 4.4, e que aqui é escrita como uma das equações 4.16. A outra equação relaciona a tensão de saída do regulador coma a tensão de saída da excitatriz, e foi obtida de maneira semelhante a primeira das eq. 4.16:

$$E_{FDO} = (1 + S_{GO}) E_{GO}$$
$$V_{RO} = (K_E + S_{EO}) E_{FDO} \qquad (4.16)$$

A tensão de saída do circuito de estabilização do regulador (V_F) deve ser nula em regime permanente, pois do diagrama de blocos da fig. 4.16 vê-se que

$$V_T = V_{REF} - V_T - V_F \qquad (4.17)$$

Para o instante inicial, vemos nas eqs. 4.15 e 4.17 que

$$V_{FO} = 0 \qquad (4.18)$$

No programa (fig. 4.17) vemos que a condição inicial do integrador (E1) irá dar uma saída no somador (F2), portanto, no bloco do estabilizador do regulador. Se esse valor de saída de (F2) for ajustado com sinal contrário na condição inicial do integrador (F1), satisfaremos a eq. 4.18. O ajuste das condições iniciais é apresentado na tabela 4.2.

TABELA 4.2 - Ajuste das condições iniciais para o programa da Fig. 4.17

INTEGRADOR	CONDIÇÃO INICIAL	OBTENÇÃO
R1	$\frac{V_{REF}}{V_{TMAX}}$	eq. 4.15
A1	$-\frac{V_{RO}}{V_{AMAX}}$	eq. 4.16 (2ª)
E1	$\frac{E_{FDO}}{E_{FDMAX}}$	eq. 4.16 (1ª)
G1	$\frac{E_{GO}}{E_{FDMAX}}$	Load-Flow
F1	$\frac{E_{FDO}}{10V_{TMAX}}$	Tab. 4.1 e Fig. 4.17

4.6.2 - GERADOR COM SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 2

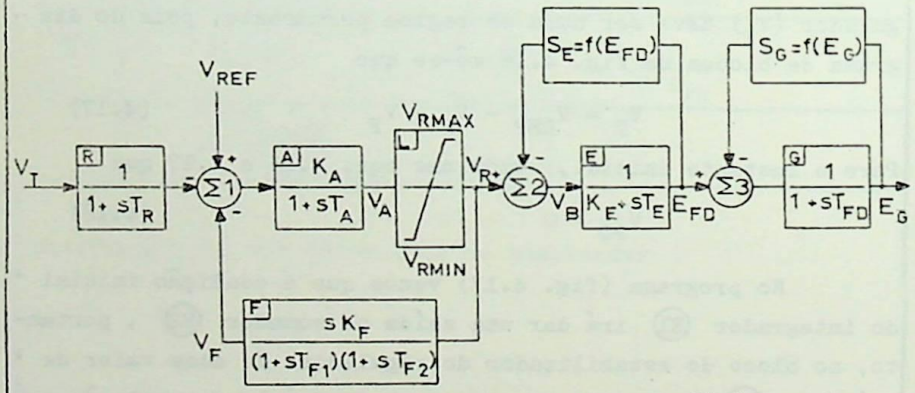


Fig. 4.18 - Diagrama de blocos de Gerador com Sistemas de Excitação Tipo 2

O programa correspondente ao diagrama de blocos da fig 4.18 é mostrado na fig. 4.19. Para os escalamentos de amplitude lá indicados, e para um escalamento de tempo como o do tipo 1 (eq. 4.14) teremos:

a) Ajuste dos Potenciômetros: Vide tabela 4.3

b) Ajuste das Funções Saturação: Vide item 4.5.1

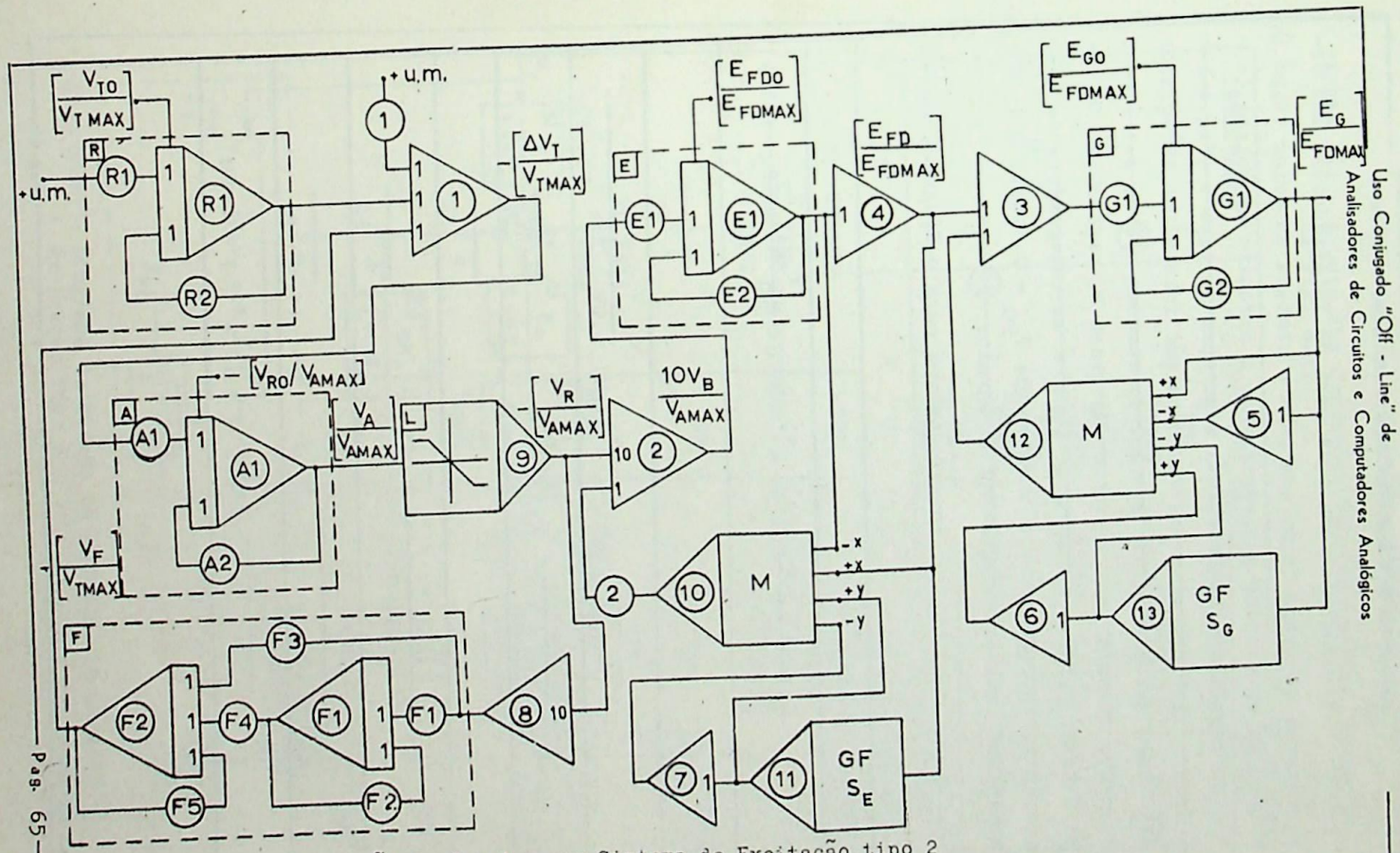


Fig. 4.19 - Simulação de Gerador com Sistema de Excitação tipo 2

c) Condições Iniciais para os Integradores: são determinadas da mesma forma que para o sistema anterior (tipo 1), exceto na sub-rotina que representa o circuito de estabilização do regulador (bloco F). Na simulação do tipo 1 (fig.4.17) é necessário introduzir-se uma condição inicial no integrador (F1) para que a condição inicial do somador (F2), que é o elemento de saída na sub-rotina do bloco F, seja nula. No tipo 2 (fig. 4.19) o elemento de saída é um integrador, de modo que, para satisfazermos a condição de $V_{FO} = 0$, basta que não ajustemos condição inicial no integrador (F2).

TABELA 4.3 - Ajuste dos Potenciômetros para o Programa da Fig 4.19

POT.	AJUSTE	POT.	AJUSTE
R1	$\frac{V_T}{V_{TMAX} \text{ a.} T_R}$	F1	$\frac{V_{AMAX} K_F}{10 V_{TMAX} \text{ a } T_{F1}^2}$
R2	$\frac{1}{\text{a } T_R}$	F2	$\frac{1}{\text{a } T_{F1}}$
1	$\frac{V_{REF}}{V_{TMAX}}$	F3	$\frac{V_{AMAX} K_F}{10 V_{TMAX} \text{ a } T_{F1} T_{F2}}$
A1	$\frac{V_{TMAX} K_A}{V_{AMAX} \text{ a } T_A}$	F4	$\frac{1}{\text{a } T_{F2}}$
A2	$\frac{1}{T_A}$	F5	$\frac{1}{\text{a } T_{F2}}$
E1	$\frac{V_{AMAX}}{10 E_{FDMAX} \text{ a } T_E}$	G1	$\frac{1}{\text{a } T_{FD}}$
E2	$\frac{K_E}{\text{a } T_E}$	G2	$\frac{1}{\text{a } T_{FD}}$
2	$\frac{10 E_{FDMAX}}{V_{AMAX}}$		

TABELA 4.4 - Ajuste das Condições Iniciais para o Programa da Fig. 4.19

INTEGRADOR	CONDIÇÃO INICIAL	OBTENÇÃO
R1	$\frac{V_{REF}}{V_{TMAX}}$	eq. 4.15
A1	$-\frac{V_{RO}}{V_{AMAX}}$	eq. 4.16 (2ª)
E1	$\frac{E_{FDO}}{E_{FDMAX}}$	eq. 4.16 (1ª)
G1	$\frac{E_{GO}}{E_{FDMAX}}$	Load-Flow
F1	0	Por observação
F2	0	Por observação

4.6.3 - GERADOR COM SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 3

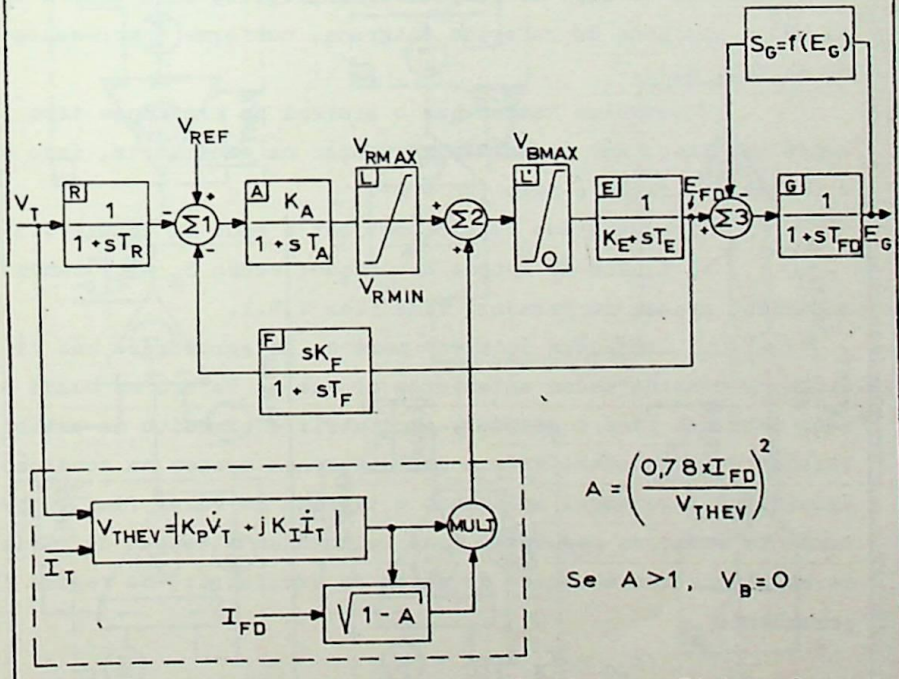


Fig. 4.20 - Diagrama de Blocos de Gerador com Sistema de Excitação Tipo 3

A fig. 4.20 mostra o diagrama de blocos de um gerador com sistema de excitação tipo 3. A parte do diagrama que está envolvida por linha tracejada corresponde a operações com fasores, envolvendo, portanto, números complexos; em consequência, não pode ser simulada no computador analógico. Entretanto, o objetivo de nosso trabalho é apresentar a solução passo a passo da equação de balanço, para estudos de estabilidade dos sistemas elétricos de potência, levando-se em conta as influências dos reguladores de tensão e velocidade. Ora,se o cálculo é feito passo a passo, onde a obtenção de cada valor da solução (curva de balanço) é obtido supondo-se constantes os valores das variáveis que aparecem na equação, durante pequenos intervalos de tempo, poderemos então fazer manualmente os cálculos correspondentes a parte do diagrama de blocos da fig. 4.20 que está envolvida pela linha tracejada, injetando os valores obtidos no computador analógico, onde estará simulado o restante do referido diagrama, conforme é apresentado na fig. 4.21.

Observe-se também que o sistema de excitação tipo 3, sendo estático, não apresenta saturação na excitatriz, isto é, a função saturação é nula ($S_E = 0$).

a) Ajuste dos Potenciômetros: é dado na tabela 4.5.

b) Ajuste da Função Saturação: sendo $S_E = 0$, temos saturação apenas no gerador. Vide item 4.5.1.

c) Condições Iniciais para os integradores: são válidas as considerações anteriores no que se refere as condições iniciais para o gerador, excitatriz e circuito de estabilização do regulador. Haverá uma diferença apenas na condição inicial do regulador. Aplicando o teorema do valor final, obtemos as equações seguintes, que relacionam a tensão de saída do regulador com a tensão de saída da excitatriz, no regime permanente

$$V_{BO} = K_E \, E_{FDO}$$

$$V_{BO} = V_{RO} + V_{THEVO} \sqrt{1 - A_O} \qquad (4.19)$$

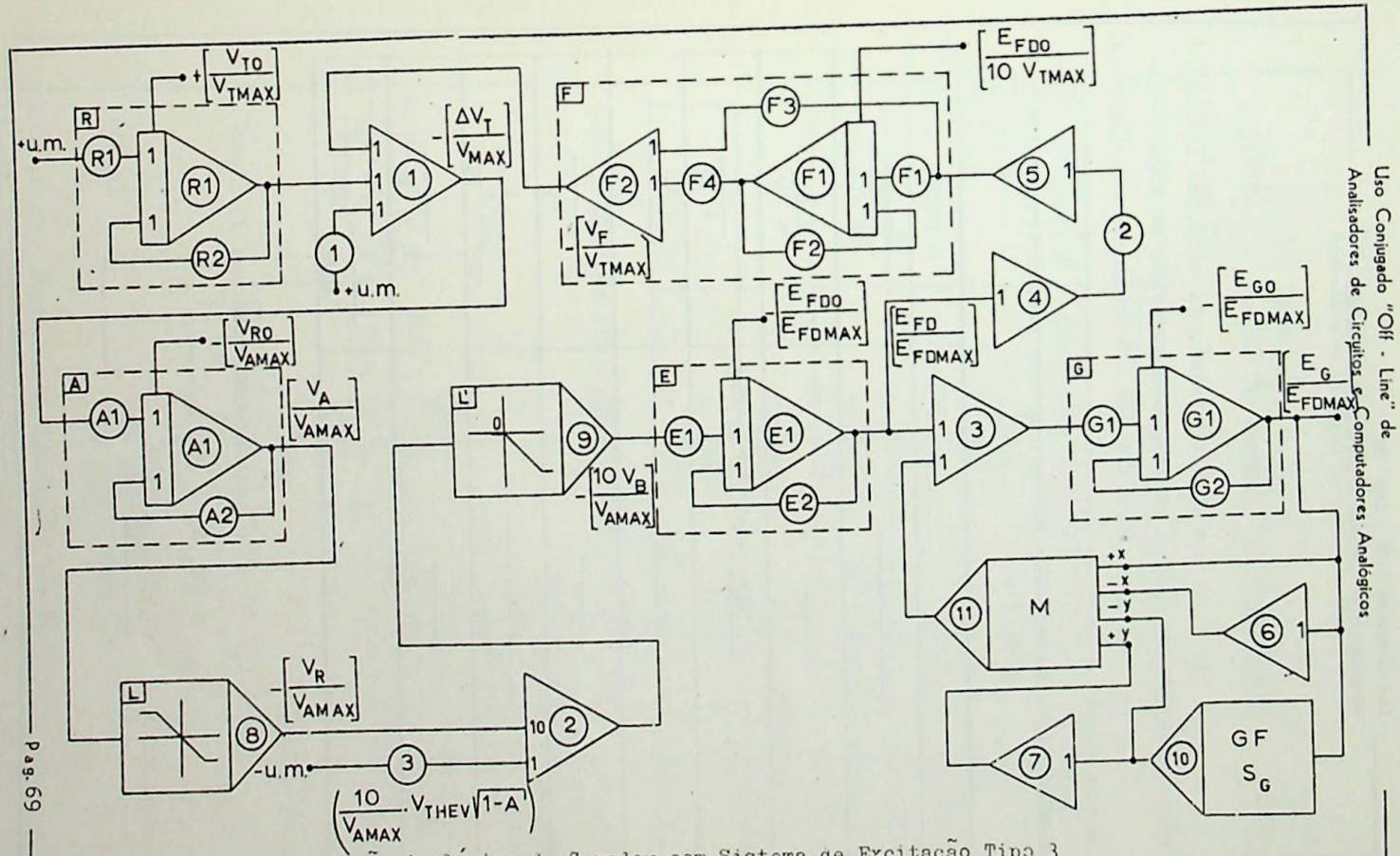


Fig. 4.21 - Simulação Analógica de Gerador com Sistema de Excitação Tipo 3

donde

$$V_{RO} = K_E E_{FDO} - V_{THEVO} \sqrt{1 - A_O} \qquad (4.20)$$

A eq. 4.20 nos dá a expressão da condição inicial para o integrador (A1), no programa mostrado na fig. 4.21.

As condições iniciais dos integradores são dadas na tabela 4.6.

TABELA 4.5 - Ajuste dos Potenciômetros para o Programa da Fig. 4.21

POT.	AJUSTE	POT.	AJUSTE
R1	$\frac{V_T}{V_{TMAX} \; a \; T_R}$	2	$\frac{E_{FDMAX}}{10 \; V_{TMAX}}$
R2	$\frac{1}{a \; T_R}$	F1	$\frac{1}{a \; T_F}$
1	$\frac{V_{REF}}{V_{TMAX}}$	F2	$\frac{1}{a \; T_F}$
A1	$\frac{V_{TMAX} \; K_A}{V_{AMAX} \; a \; T_A}$	F3	$\frac{10K_F}{T_F}$
A2	$\frac{1}{a \; T_A}$	F4	$\frac{10K_F}{T_F}$
E1	$\frac{V_{AMAX}}{10E_{FDMAX} \; a \; T_E}$	G1	$\frac{1}{a \; T_{FD}}$
E2	$\frac{K_E}{a \; T_E}$	G2	$\frac{1}{a \; T_{FD}}$
		3	$\frac{10}{V_{AMAX}} V_{THEV} \sqrt{1 - A}$

Observações:

I) Conforme está indicado no diagrama de bloco

$$V_{THEV} = |K_P \dot{V}_T + JK_I \dot{I}_T|$$

$$A = \left(\frac{0{,}78 \; I_{FD}}{V_{THEV}}\right)^2 \qquad (4.21)$$

Se $A > 1$ $\quad V_B = 0.$

II) Se $A_1 > 1$, a condição de $V_B = 0$ é imposta desligando-se a conexão de entrada do limitador L' ou do potenciômetro E1.

TABELA 4.6 - Condições Iniciais para os Integradores do Programa da Fig. 4.21

INTEGRADOR	CONDIÇÕES INICIAIS	OBTENÇÃO
R1	$\frac{V_{REF}}{V_{TMAX}}$	Eq. 4.15
A1	$-\frac{V_{RO}}{V_{AMAX}}$	Eq. 4.20
E1	$\frac{E_{FDO}}{E_{FDMAX}}$	Eq. 4.16 (1ª)
G1	$\frac{E_{GO}}{E_{FDMAX}}$	Load-Flow
F1	$\frac{E_{FDO}}{10V_{TMAX}}$	Tab. 4.5 e Fig. 4.2.1

4.6.4 - GERADOR COM SISTEMA DE EXCITAÇÃO TIPO 4

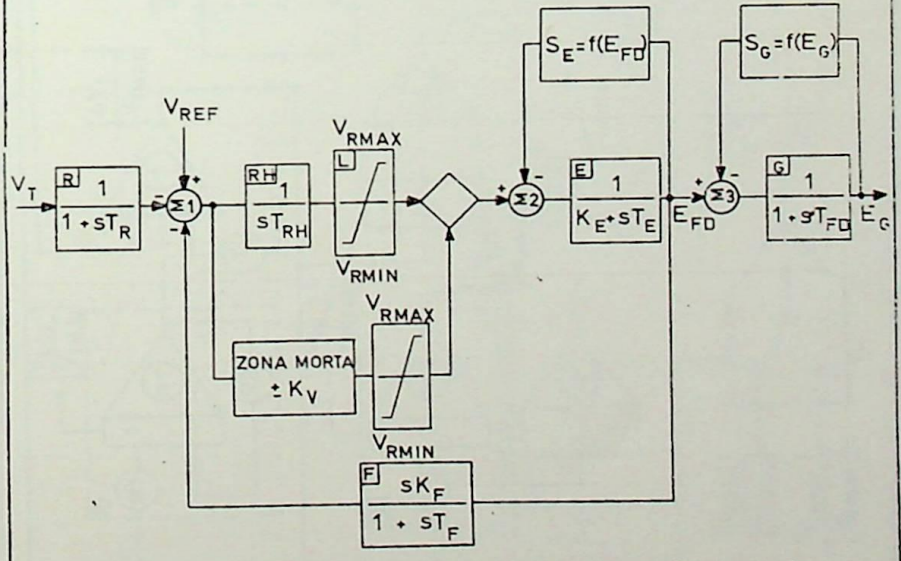


Fig .4.22 - Diagrama de Blocos de Gerador com Sistema de Excitação Tipo 4.

O programa correspondente ao diagrama de blocos da fig. 4.22 é mostrado na fig. 4.23. Para os escalamentos de amplitude lá indicados, e para um escalamento de tempo como o usado na simulação do tipo 1 (eq. 4.14) temos:

a) Ajuste dos potenciômetros: vide tabela 4.7.

b) Ajuste das Funções Saturação: vide item 4.5.1.

c) Condições Iniciais para os Integradores: são determinadas da mesma forma que para o programa da simulação de gerador com sistema de excitação tipo 1, inclusive no integrador (F1) , pertencente à sub-rotina que simula o circuito de estabilização do regulador (vide alínea c, item 4.6.1). Convém apenas observar que o valor inicial da tensão de saída do regulador (V_R) deverá ser introduzido no integrador (RH1) , isto porque em regime permanente não existe erro ($V_T = 0$), do que se conclui:

$$V_{RHO} = V_{RO} \qquad (4.22)$$

como pode ser visto na fig. 4.7.

As condições iniciais dos integradores do programa mostrado na fig. 4.23 são dadas na tabela 4.8

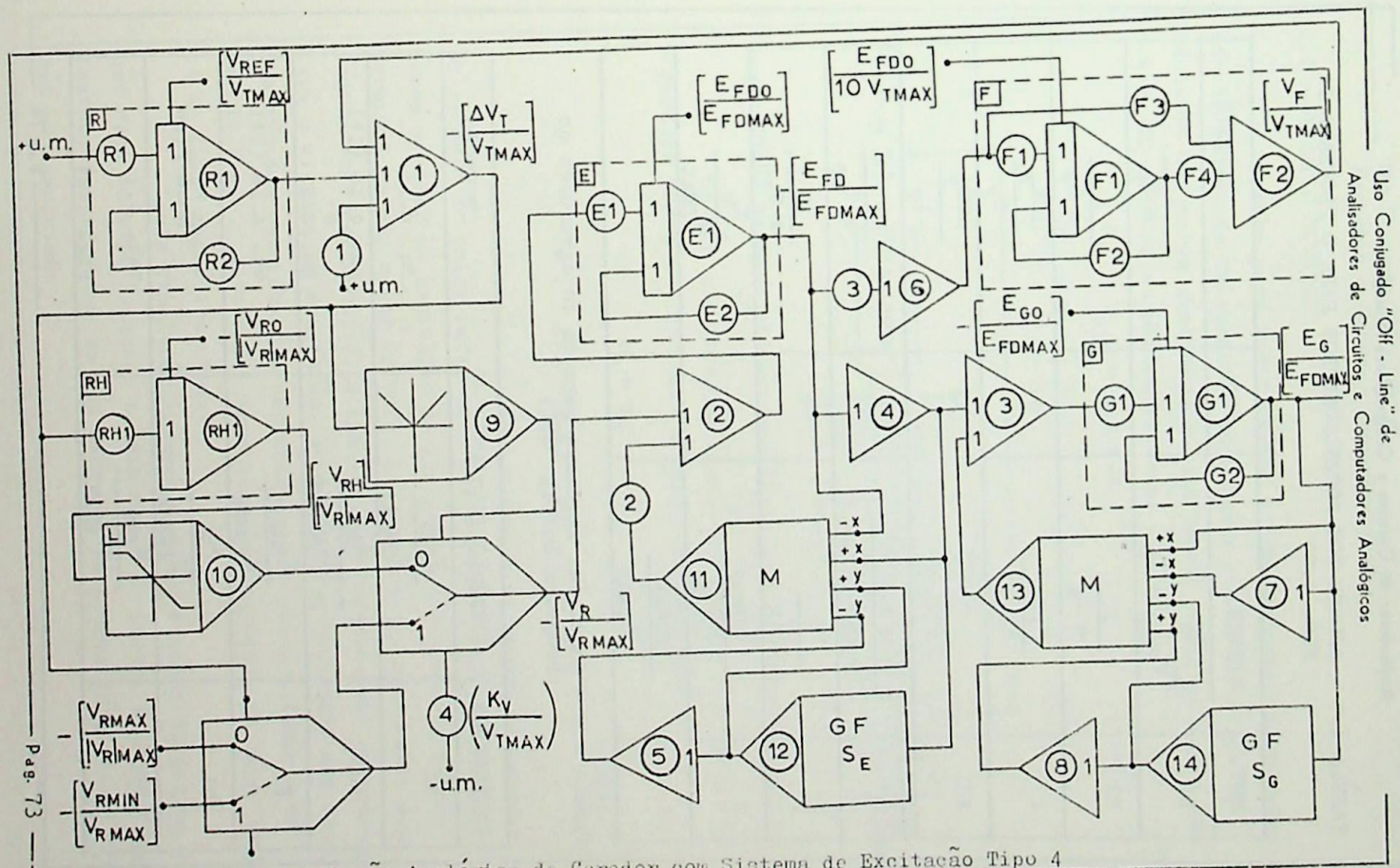


Fig. 4.23 - Simulação Analógica de Gerador com Sistema de Excitação Tipo 4

TABELA 4.7 - AJUSTE DOS POTENCIÔMETROS PARA O PROGRAMA DA FIG. 4.23

POT.	AJUSTE	POT.	AJUSTE
R1	$\frac{V_T}{V_{TMAX} \text{ a } T_R}$	F1	$\frac{1}{\text{a } T_F}$
R2	$\frac{1}{\text{a } T_R}$	F2	$\frac{1}{\text{a } T_F}$
1	$\frac{V_{REF}}{V_{TMAX}}$	F3	$\frac{10K_F}{T_F}$
RH1	$\frac{1}{\text{a } T_{RH}}$	F4	$\frac{10K_F}{T_F}$
E1	$\frac{\lvert V_R \rvert_{MAX}}{E_{FDMAX} \text{ a } T_E}$	G1	$\frac{1}{\text{a } T_{FD}}$
E2	$\frac{K_E}{\text{a } T_E}$	G2	$\frac{1}{\text{a } T_{FD}}$
2	$\frac{E_{FDMAX}}{\lvert V_R \rvert_{MAX}}$	4	$\frac{K_V}{V_{TMAX}}$
3	$\frac{E_{FDMAX}}{10V_{TMAX}}$		

TABELA 4.8 - Condições Iniciais para os Integradores do Programa da Fig. 4.23

INTEGRADOR	CONDIÇÃO INICIAL	OBTENÇÃO
R1	$\frac{V_{REF}}{V_{TMAX}}$	Eq. 4.15
RH1	$-\frac{V_{RO}}{\lvert V_R \rvert_{MAX}}$	eq. 4.16 (1ª) e eq. 4.22
E1	$\frac{E_{FDO}}{E_{FDMAX}}$	eq. 4.16 (1ª)
G1	$\frac{E_{GO}}{E_{FDMAX}}$	Load-Flow
F1	$\frac{E_{FDO}}{10V_{TMAX}}$	tab. 4.7 e fig. 4.23

4.7 - EXEMPLO NUMÉRICO

Apenas para verificarmos o comportamento do regulador de tensão de um gerador, suponhamos que este esteja alimentando uma carga qualquer com uma tensão terminal V_T, e uma f.e.m. E_G com os seguintes valores:

$$V_{TO} = V_{REF} = 1{,}0 \text{ p.u} \qquad (4.23)$$

$$E_{GO} = 1{,}2 \text{ p.u}$$

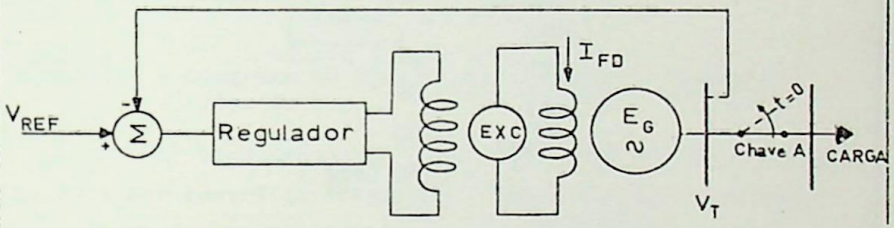


Fig. 4.24 - Gerador Alimentando Carga e Sistema de Excitação

Se por uma condição qualquer, a chave A é aberta e o gerador passa a funcionar a vazio, teremos que

$$V_T = E_G$$

$$\therefore \quad \Delta V_T = V_{REF} - E_G \qquad (4.24)$$

Haverá então um erro da tensão terminal do gerador, em relação ao valor referência ajustado no regulador, o qual passa a atuar na excitação do gerador para ajustar a tensão terminal no seu valor correto. Simularemos no computador Analógico essa perturbação, a fim de verificarmos como se comportará o sistema de excitação. Evidentemente estaremos nos abstraindo das perturbações secundárias que podem alterar o valor da f.e.m., tais como, aumento de velocidade, variação brusca do fluxo magnético, etc...

Nesta simulação, suporemos que o sistema de excitação seja do tipo 1, que é o mais comum de todos, e cujas constantes, que aparecem no seu diagrama de blocos (fig. 4.16), são as seguintes:

$$
\begin{aligned}
T_R &= 0 \\
K_A &= 400 \\
T_A &= 0{,}02 \text{ (seg)} \\
E_{FDMAX} &= 3{,}9 \text{ (p.u.)} \\
E_{FDMIN} &= 0 \\
K_E &= 1{,}0 \\
K_F &= 0{,}03 \\
T_F &= 1{,}0 \text{ (seg)} \\
V_{RMAX} &= 7{,}3 \text{ (p.u.)} \\
V_{RMIN} &= -7{,}3 \text{ (p.u.)} \\
S_{EMAX} &= 0{,}86 \\
S_{E\ 0{,}75MAX} &= 0{,}50 \\
T_E &= 0{,}80 \text{ (seg.)} \\
S_{G\ 1{,}2p.u.} &= 0{,}56 \\
S_{G\ 1{,}0p.u.} &= 0{,}16 \\
T_{FD} &= T'_{dO} = 5{,}6 \text{ (seg)}
\end{aligned}
\qquad (4.25)
$$

Se $E_G \leqslant 0{,}85$ p.u. $S_G = 0 \Longrightarrow$ curva de saturação coincide com a linha de entreferro.

a) Escalamento de Amplitude: Tendo em vista os valores máximos mostrados nas eq. 4.25 adotaremos, para efeito de escalamento, os seguintes valores máximos:

$$
\begin{aligned}
V_{TMAX} &= 2{,}0 \text{ (p.u.)} \\
E_{FDMAX} &= 5{,}0 \text{ (p.u.)} \\
V_{AMAX} &= K_A \Delta V_{TMAX} \\
\Delta V_{TMAX} &= 0{,}2 \text{ p.u.}
\end{aligned}
\qquad (4.26)
$$

Aplicando valores na 3ª das eq. 4.26 vem:

$$V_{AMAX} = 400 \times 0{,}2 = 80 \qquad (4.27)$$

Usaremos então:

$$
\begin{aligned}
V_{TMAX} &= 2{,}0 \text{ (p.u.)} \\
E_{FDMAX} &= 5{,}0 \text{ (p.u.)} \\
V_{AMAX} &= 100 \text{ (p.u.)}
\end{aligned}
\qquad (4.28)
$$

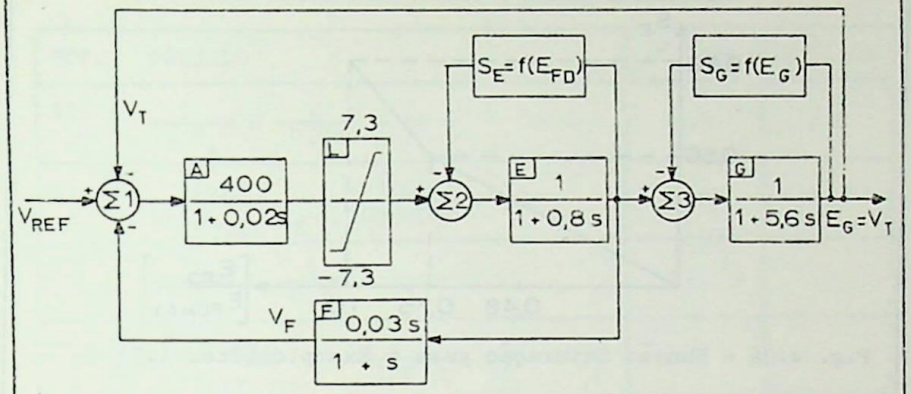


Fig. 4.25 - Diagrama de Blocos para o Exemplo Numérico (Item 4.7)

b) Escalamento de tempo: como, neste caso, o problema pode ser resolvido inteiramente por simulação, um exame das constantes de tempo indica que não há necessidade do escalamento de tempo. Logo:

$$t_c = t$$
$$a = 1 \qquad (4.29)$$

c) Programa: é mostrado na fig. 4.27

d) Ajuste dos potenciômetros: é obtido a partir da tabela 4.1, e apresentado na tabela 4.9.

e) Condições iniciais para os integradores: são obtidas conforme indicado na alínea c do item 4.6.1.

Aplicando os valores dados nas eq. 4.23 e 4.25 na eq. 4.16 (1ª) obtemos:

$$E_{FDO} = (1 + 0,56) \times 1,2 = 1,872 \qquad (4.30)$$

Para o cálculo de V_{RO} necessitamos do valor da função saturação.

$$E_{FDO} = \frac{E_{FDO}}{E_{FDMAX}} E_{FDMAX} = \frac{1,872}{3,9} E_{FDMAX}$$

$$E_{FDO} = 0,48\ E_{FDMAX} \qquad (4.31)$$

A função saturação é aproximada para a forma mostrada na fig. 4.26 (abaixo):

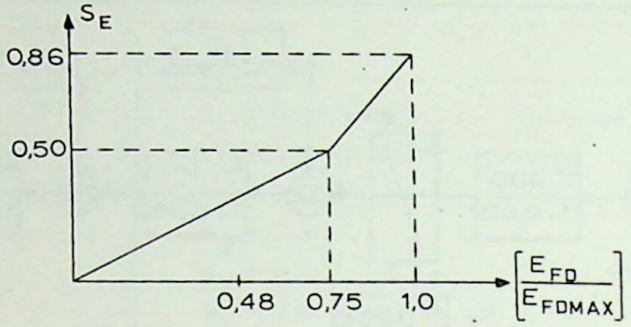


Fig. 4.26 - Função Saturação para o Exemplo (Item 4.7)

$$S_{EO} = S_{E\ 0,48MAX} = \frac{0,50}{0,75} \times 0,48 = 0,32 \qquad (4.32)$$

Levando os valores dados em 4.25, 4.30 e 4.32 na eq. 4.16 (2ª) vem:

$$V_{RO} = (1 + 0,32) \times 1,872 = 2,471 \qquad (4.33)$$

Portanto as condições iniciais que necessitamos são:

$$E_{GO} = 1,2 \text{ (p.u.)}$$
$$E_{FDO} = 1,872 \text{ (p.u.)} \qquad (4.34)$$
$$V_{RO} = 2,471 \text{ (p.u.)}$$

As condições iniciais a serem ajustadas nos integradores são calculadas a partir da tabela 4.2, e implementadas no computador através de potenciômetros, cujo ajuste aparece na tabela 4.9.

TABELA 4.9 - AJUSTE DOS POTENCIÔMETROS E CONSTANTES MULTIPLICATIVAS PARA O PROGRAMA DA FIG. 4.27

POT.	CÁLCULO	AJUSTE	ENTRADA
1	$\frac{V_{REF}}{V_{TMAX}} = \frac{1}{2} = 0,5$	0,5	1
A1	$\frac{V_{TMAX}K_A}{V_{AMAX}aT_A} = \frac{2 \times 400}{100 \times 1 \times 0,02} = 400$	0,4	1000

POT.	CÁLCULO	AJUSTE	ENTRADA
A2	$\frac{1}{a\,T_A} = \frac{1}{0,02} = 50$	0,5	100
E1	$\frac{V_{AMAX}}{10E_{FDMAX}aT_E} = \frac{100}{10x5x0,8} = 2,5$	0,25	10
E2	$\frac{K_E}{a\,T_E} = \frac{1}{0,8} = 1,25$	0,125	10
2	$\frac{10E_{FDMAX}}{V_{AMAX}} = \frac{10 \times 5}{100} = 0,5$	0,5	1
3	$\frac{E_{FDMAX}}{10V_{TMAX}} = \frac{5}{10 \times 2} = 0,25$	0,25	1
F1	$\frac{1}{a\,T_F} = \frac{1}{1} = 1$	- -	1
F2	$\frac{1}{a\,T_F} = 1$	- -	1
F3	$\frac{10K_F}{T_F} = \frac{10 \times 0,03}{1} = 0,3$	0,3	1
F4	$\frac{10K_F}{T_F} = 0,3$	0,3	1
G1	$\frac{1}{a\,T_{FD}} = \frac{1}{5,6} = 0,179$	0,179	1
G2	$\frac{1}{a\,T_{FD}} = 0,179$	0,179	1
A0	$-\frac{V_{RO}}{V_{AMAX}} = -\frac{2,471}{100} = -0,0247$	0,0247	A
E0	$\frac{E_{FDO}}{E_{FDMAX}} = \frac{1,872}{5} = 0,3744$	0,3744	A
G0	$-\frac{E_{GO}}{E_{FDMAX}} = -\frac{1,2}{5} = -0,24$	0,24	A
F0	$\frac{E_{FDO}}{10V_{TMAX}} = \frac{1,872}{10 \times 2} = 0,0936$	0,0936	A
4	$\frac{E_{FDMAX}}{V_{TMAX}} = \frac{5}{2} = 2,5$	0,25	10

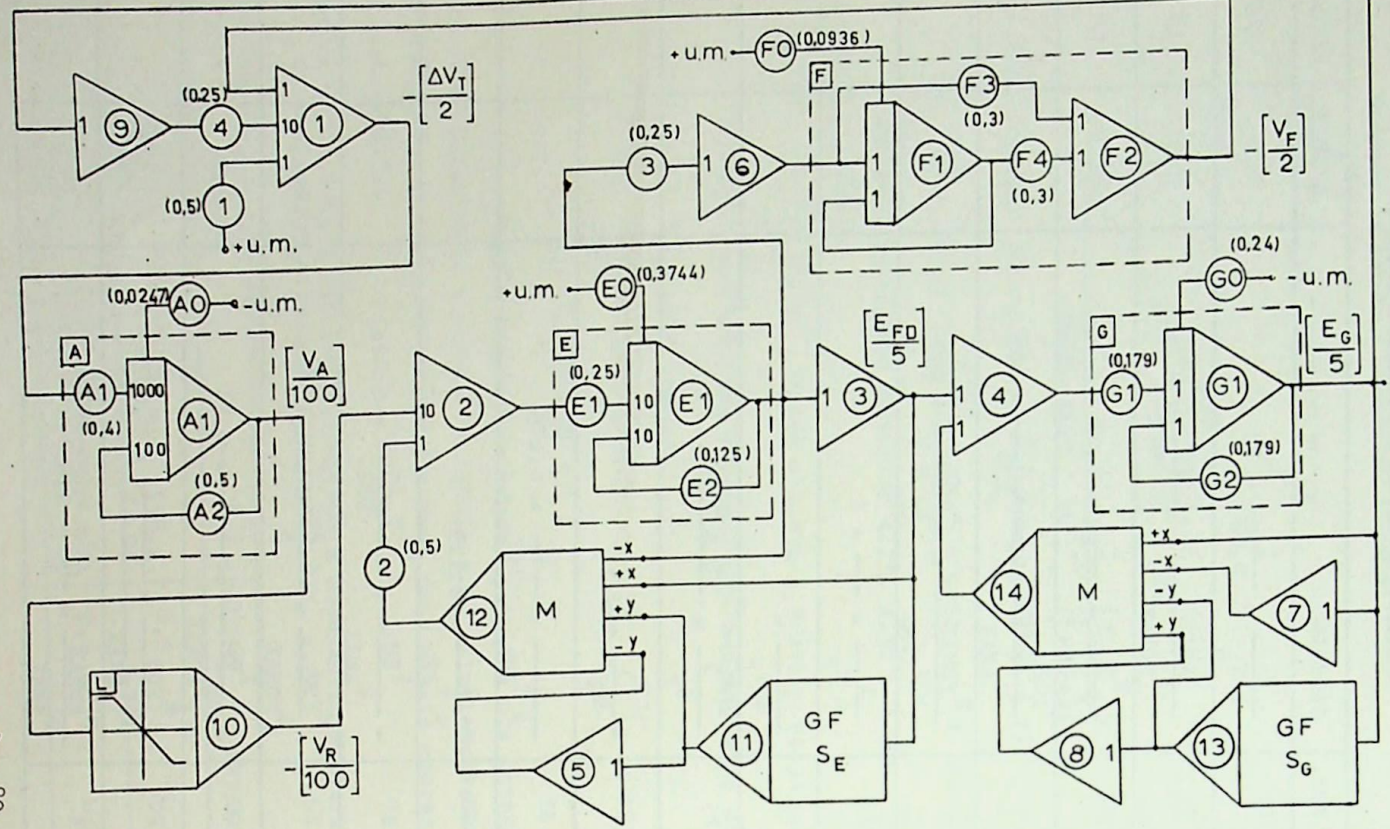


Fig. 4.27 - Programa para a Simulação do Exemplo (Item 4.7)

f) Ajuste da função Limitação.

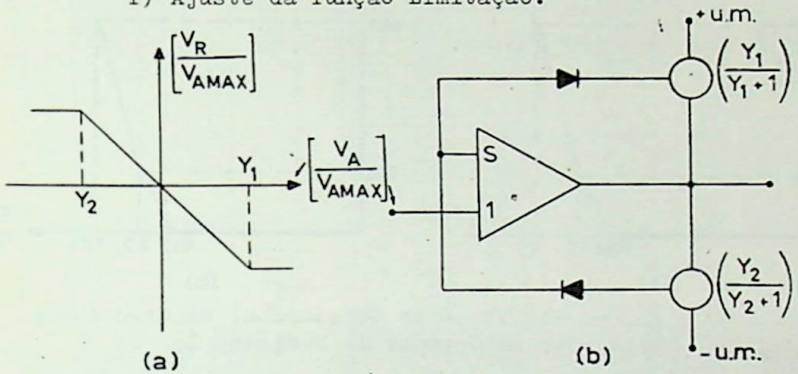


Fig. 4.28 - a) Função Limitação; b) Sub-Rotina

$$Y_1 = \frac{V_{RMAX}}{V_{AMAX}} = \frac{7,3}{100} = 0,073$$

$$Y_2 = -\frac{V_{RMIN}}{V_{AMAX}} = \frac{7,3}{100} = 0,073 \qquad (4.35)$$

Os valores aplicados na eq. 4.35 foram tirados das eqs. 4.25 e 4.28

O ajuste dos potenciômetros será então:

$$\frac{Y_1}{Y_1 + 1} = \frac{Y_2}{Y_2 + 1} = \frac{0,073}{1,073} = 0,068 \qquad (4.36)$$

g) Ajuste dos Geradores de Funções Ajustáveis: os geradores de funções ajustáveis serão usados somente para representar o efeito da saturação. O ajuste é feito conforme o exposto no item 5.1, e segundo os valores dados nas eqs.4.25 os ajustes estão indicados nas figuras 4.29 e 4.30

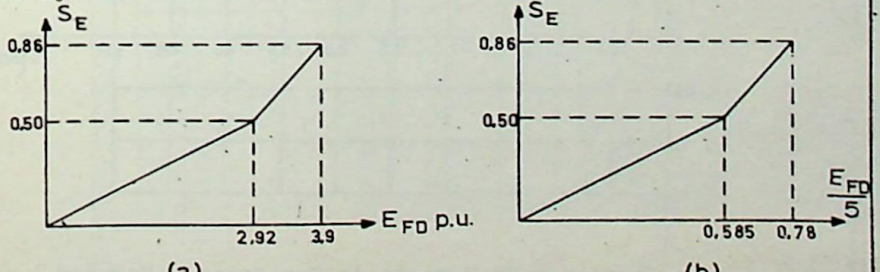


Fig. 4.29 - Função Saturação da Excitatriz: a) valores dados; b) Ajuste do Gerador de Funções 11

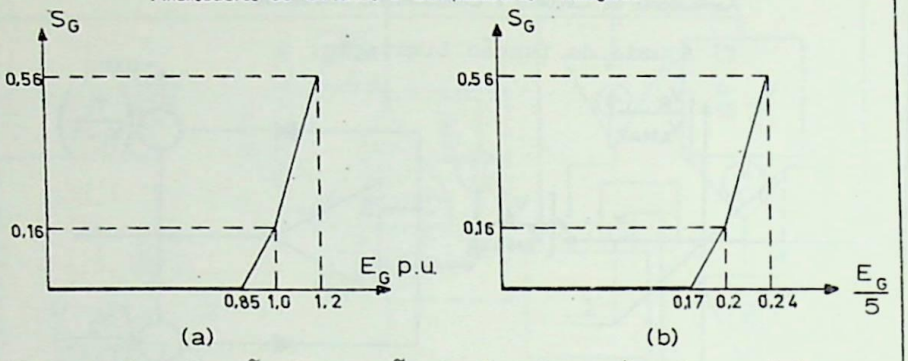


Fig. 4.30 - Função Saturação do Gerador: a) valores dados
b) Ajuste do Gerador de Funções 13

h) Resultado obtido: para as condições mencionadas, o computador forneceu a resposta mostrada na fig. 4.32, obtida no traçador de gráficos do próprio computador. Observe- se que a correção de 20% foi feita em apenas 1 segundo. Embora a oscilação da tensão de saída da excitatriz tenha sido grande, a f.e.m. do gerador não oscilou, por causa do alto valor da constante de tempo do campo (5,6 seg) em relação aos valores das demais constantes de tempo do sistema (máximo de 0,8 seg). Na fig. 4.31 mostramos as curvas da fig. 4.32 numa escala mais conveniente.

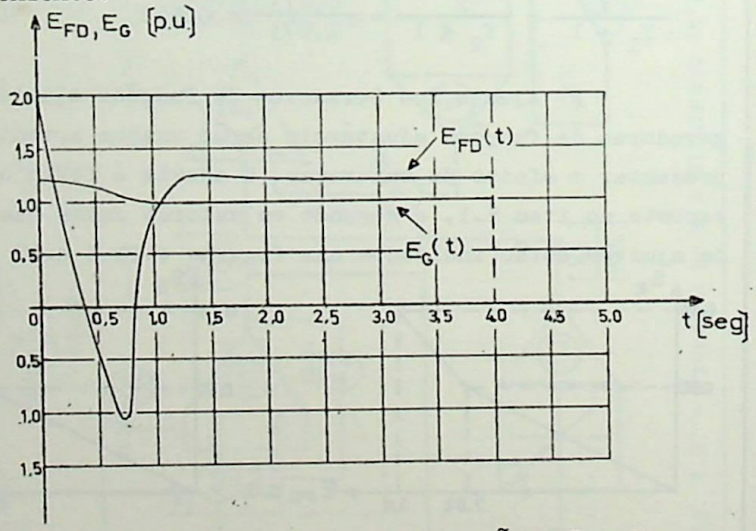


Fig. 4.31 - Respostas do Sistema de Excitação e Gerador
(Exemplo Numérico - Item 4.7)

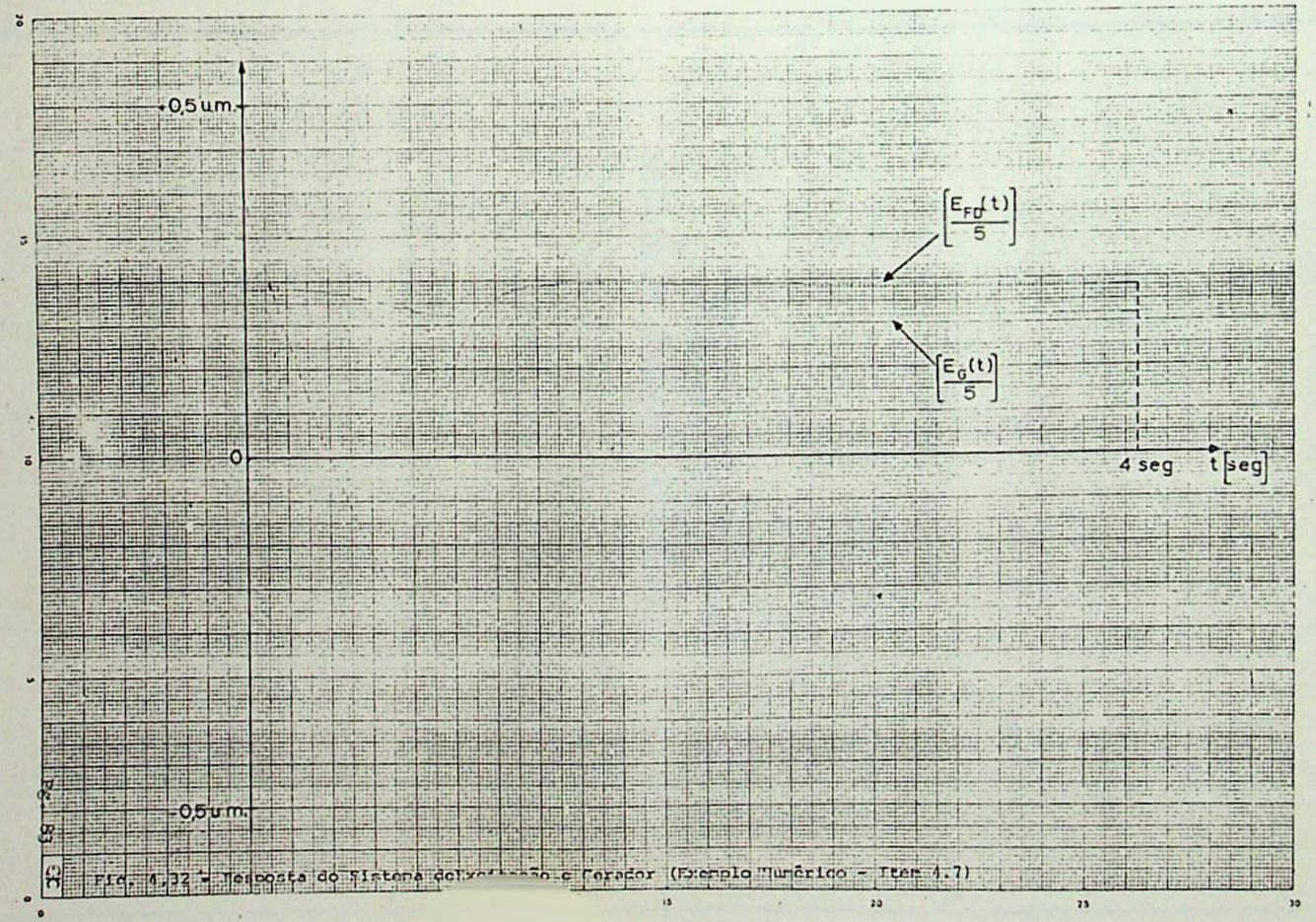


Fig. 4.32 - Resposta do sistema de excitação e gerador (Exemplo Numérico - Item 4.7)

C A P Í T U L O 5

SIMULAÇÃO DA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÃO DA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

5.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS

Nos estudos de estabilidade, os sistemas de energia, reguladores de velocidade e máquinas motrizes são representados através de modelos matemáticos simplificados e linearizados. Quando a máquina motriz é uma turbina, um erro de velocidade excitará o regulador, o qual atuará nas válvulas de admissão de fluido, até que a velocidade do grupo atinja novamente o valor referência. A abertura ou fechamento dessas válvulas aumentam ou diminuem a potência fornecida pela turbina, até que se restabeleça o equilíbrio entre essa potência mecânica entregue no eixo do gerador, e a potência elétrica que é transferida ao sistema.

Um estudo de estabilidade sempre gira em torno da resolução da equação de balanço (cap. 3, eq. 3.28), que aqui reescrevemos:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (3.28)$$

Conforme acabamos de comentar, um regulador de velocidade atua no sentido de aumentar ou diminuir a potência mecânica (P_m) com que a turbina aciona o gerador. Portanto, torna-se evidente que o diagrama de blocos para representar uma turbina, com seu sistema de energia e seu regulador de velocidade deve ter, como variável de saída, a potência mecânica P_m; a variável de entrada deve ser, evidentemente, o erro de velocidade.

Um único diagrama de blocos representa a grande maioria das turbinas, com seus reguladores de velocidade e sistemas de energia. O referido diagrama é mostrado na figura 5.1.

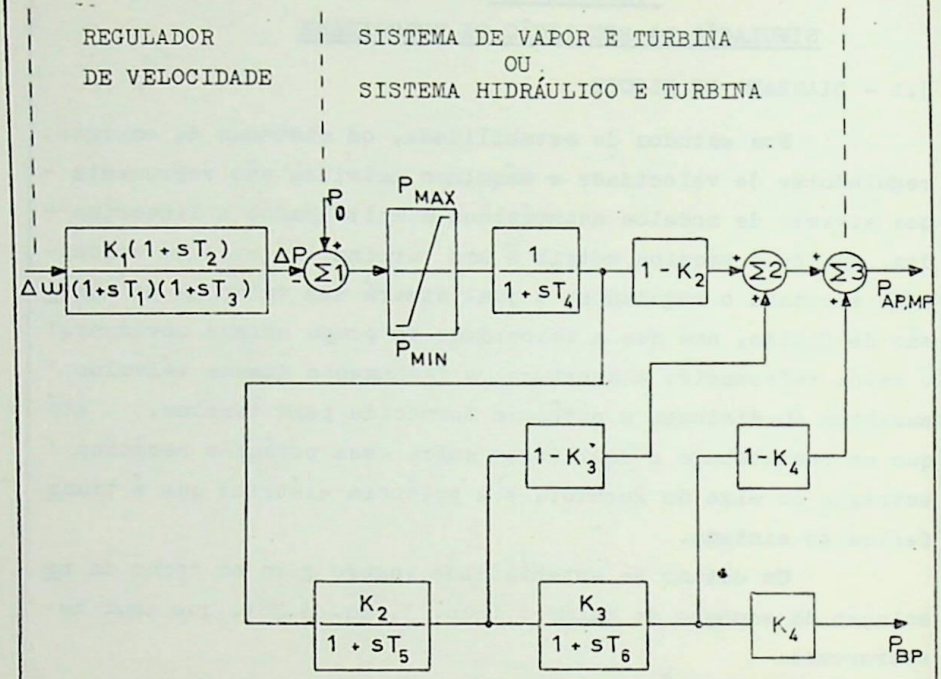


Fig. 5.1 - Diagrama de Blocos de Regulador de Velocidade + + Sistema de Energia + Turbina

Na fig. 5.1, são os seguintes os significados dos símbolos:

P_o - Potência inicial da turbina em p.u. na base do sistema.

$\Delta\omega$ - excesso de velocidade elétrica, em radianos elétricos por segundo.

K_1 - $\frac{\text{potência nominal MW}}{\text{regulação por unidade}} \times \frac{1}{377} \times \frac{1}{\text{base do sistema}}$

T_1, T_3 - constantes de tempo do detetor de erro e do regulador (atrasos), em segundos.

T_2 - constante de tempo da compensação avançadora do detetor de erro.

P_{MAX} - limite superior de potência, em p.u. na base do sistema.

P_{MIN} - limite inferior de potência, em p.u. na base do sistema.

P_{AP} - potência no eixo da turbina de alta pressão.
P_{MP} - idem média pressão.
P_{BP} - idem baixa pressão.

Os significados dos demais símbolos variam, dependendo do tipo do sistema de energia. A fórmula de K_1 é válida para geradores cuja frequência seja de 60 Hertz.

5.2 - OBTENÇÃO DO ERRO DE VELOCIDADE

Na dedução da equação de balanço (cap.3) obtivemos a eq. 3.26, que reescrevemos a seguir:

$$\omega = \omega_s + \frac{d\delta}{dt} \qquad (3.26)$$

Desta expressão podemos tirar o valor do excesso de velocidade $\Delta\omega$

$$\omega - \omega_s = \Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} \qquad (5.1)$$

Na solução ponto por ponto da equação de balanço, para cada intervalo de tempo Δt podemos obter, de forma aproximada, o valor de $\Delta\omega$

$$\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} \simeq \frac{\Delta\delta}{\Delta t} \left[\frac{\text{graus elétricos}}{\text{segundo}}\right] \qquad (5.2)$$

Façamos a conversão para radianos por segundo

$$\Delta\omega = \frac{\pi}{180} \frac{\Delta\delta}{\Delta t} \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}}\right] \qquad (5.3)$$

Como o intervalo de tempo Δt é constante na solução ponto por ponto da equação de balanço, ou no máximo muda seu valor uma vez, por razões de precisão, podemos recalcular o ganho K_1 do regulador de velocidade, de modo que a variável de entrada do diagrama de blocos da fig. 5.1 seja agora a variação $\Delta\delta$ do ângulo de fase (δ) da f.e.m. do gerador, e que é disponível no cálculo da curva de balanço, conforme podemos ver nas eqs. 3.42 e na fig. 3.10, do capítulo 3.

Do diagrama de blocos da fig. 5.1 tiramos,

$$\mathcal{L}[\Delta P] = \frac{K_1 (1+sT_2)}{(1 + sT_1)(1+sT_3)} \mathcal{L}[\Delta\omega] \qquad (5.4)$$

Substituindo a eq. 5.3 na eq. 5.4 obtemos:

$$\mathcal{L}[\Delta P] = \frac{K_1 (1 + sT_2)}{(1+sT_1)(1+sT_3)} \mathcal{L}\left[\frac{\pi}{180} \cdot \frac{\Delta\delta}{\Delta t}\right] \qquad (5.5)$$

Conforme veremos no capítulo 6, durante cada um dos intervalos de tempo, de duração Δt, realiza-se uma etapa da simulação, na qual $\Delta\omega$ é suposto constante, sendo dado pela eq. 5.3. Considerando este fato, e sendo Δt constante, podemos re escrever a eq. 5.5 como segue:

$$\mathcal{L}[\Delta P] = \frac{K_1(1+sT_2)}{(1+sT_1)(1+sT_3)} \times \frac{1}{\Delta t} \times \frac{\pi}{180} \mathcal{L}[\Delta\delta] \qquad (5.6)$$

Observando a equação 5.6, concluimos que, quando a variável de entrada do bloco representativo do regulador de velocidade for $\Delta\delta$ (graus elétricos), a expressão do ganho é

$$K_1' = \frac{1}{\Delta t} \times \frac{\pi}{180} K_1 \qquad (5.7)$$

Substituindo o valor de K_1 na expressão (5.7) obtemos

$$K_1' = \frac{1}{\Delta t} \frac{\text{potência nominal MW}}{\text{regulação por unidade}} \cdot \frac{1}{21600} \times \frac{1}{\text{base do sistema}} \qquad (5.8)$$

IMPORTANTE: a expressão 5.8 só é válida para uso na solução ponto por ponto da curva de balanço, onde a simulação também é feita por etapas.

5.3 - SIMULAÇÃO ANALÓGICA DA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE

Neste caso são válidas as mesmas observações feitas no capítulo 4, item 4.6.0. A observação adicional que fazemos, é que, em alguns blocos, a função de transferência é uma constante, e portanto são simuladas no computador analógico simplesmente por um potenciômetro, o qual, neste caso, será identificado pela mesma letra que identifica o bloco, e não será envolvido por qualquer linha tracejada.

O diagrama de blocos da turbina, com o sistema de energia e mais o regulador de velocidade, adaptado para a simulação por etapas, visando a solução ponto por ponto da equação

de balanço, é mostrada na fig. 5.2, onde:

$\Delta\delta$ - variação do ângulo δ durante o intervalo de tempo Δt considerado.

K_1' - ganho adaptado, dado pela equação 5.8.

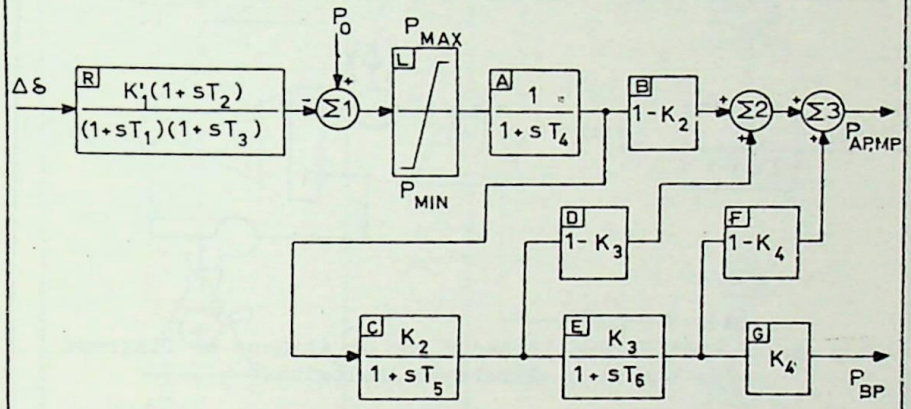


Fig. 5.2 - Diagrama de Blocos para Simulação por Etapas de Turbina + Sistema de Energia + Regulador de Velocidade.

O programa correspondente ao diagrama de blocos da fig. 5.2 é mostrado na fig. 5.4. Admitindo que a simulação deva ser feita com os escalamentos de amplitude indicados no programa, e com um escalamento de tempo dado pela expressão

$$t_c = at \qquad (5.9)$$

devemos dar as seguintes informações:

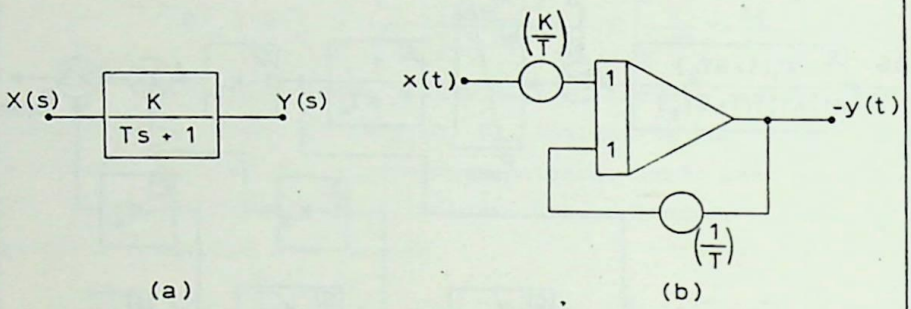
a) Ajustes dos Potenciômetros: são dados na tabela 5.1, e calculados a partir dos parâmetros indicados na fig. 5.2, da tabela B.1 (sub-rotinas) e dos escalamentos de tempo e de amplitude.

b) Condições Iniciais para os Integradores: imediatamente antes da perturbação que vai ser estudada, o gerador está operando em regime permanente, e girando com a velocidade síncrona, não havendo portanto erro de velocidade no instante inicial

$$\Delta\omega_o = \frac{d\,\delta\,(o)}{dt} = 0 \qquad (5.10)$$

$$\therefore \quad \Delta\delta_o = 0$$

Os demais integradores são usados em sub-rotinas que representam apenas um tipo de função de transferência, constituído de um atraso e um ganho, conforme mostra a fig. 5.3.



(a) (b)

Fig. 5.3 - Sistema Amplificador com um Atraso: a) Diagrama de bloco; b) Simulação Analógica.

Na fig. 5.4 temos que

$$Y(s) = \frac{K}{1 + Ts} \times X(s) \qquad (5.11)$$

O valor de y(t) em regime permanente pode ser obtido pelo teorema do valor final.

$$\lim_{t \to \infty} y(t) = \lim_{s \to 0} sY(s) = \lim_{s \to 0} s \frac{K}{1 + Ts} X(s) \qquad (5.12)$$

Aplicando a propriedade dos limites reescrevemos a eq. 5.12 como segue:

$$\lim_{t \to \infty} y(t) = \left[\lim_{s \to 0} \frac{K}{1 + Ts}\right] \left[\lim_{s \to 0} sX(s)\right] \qquad (5.13)$$

Porém sabemos que:

$$\lim_{s \to 0} sX(s) = \lim_{t \to \infty} x(t) \qquad (5.14)$$

Se no regime permanente tivermos

$$\lim_{t \to \infty} x(t) = A = Cte \qquad (5.15)$$

obteremos então, da equação 5.13 que:

$$\lim_{t \to 0} y(t) = K.A \qquad (5.16)$$

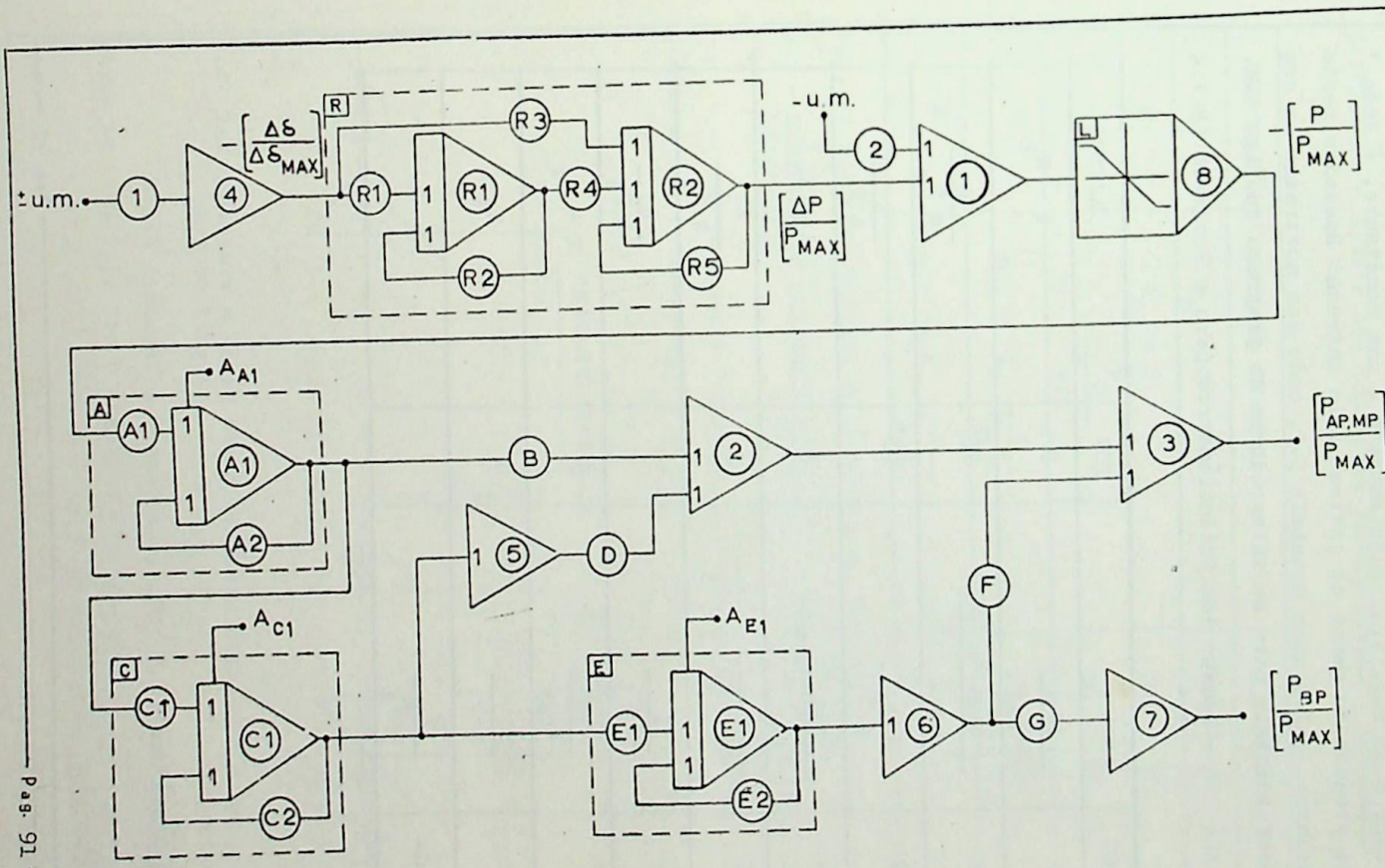


Fig. 5.4 - Simulação Analógica de Turbina + Sistema de Energia + Regulador de Velocidade

Portanto, no regime permanente, a saída de um sistema como o da fig. 5.3, cuja entrada é uma constante, é dada pelo produto do ganho do sistema pela entrada. Baseados nesta conclusão, calculamos a tabela 5.2, onde são mostradas as condições iniciais para os integradores do programa da fig. 5.4.

TABELA 5.1 - Ajuste dos Potenciômetros para o Programa da Fig 5.4

POT	AJUSTE	POT	AJUSTE
1	$\frac{\lvert \Delta\delta \rvert}{\Delta\delta_{MAX}}$	B	$1 - K_2$
R1	$\frac{\Delta\delta_{MAX}\ K_1'\ T_2}{P_{MAX}\ a\ T_1 T_3}$	C1	$\frac{K_2}{a\ T_5}$
R2	$\frac{1}{a\ T_1}$	C2	$\frac{1}{a\ T_5}$
R3	$\frac{\Delta\delta_{MAX}\ K_1'\ T_2}{P_{MAX}\ a\ T_1 T_3}$	D	$1 - K_3$
R4	$\frac{1}{a}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_3}\right)$	E1	$\frac{K_3}{a\ T_6}$
R5	$\frac{1}{a\ T_3}$	E2	$\frac{1}{a\ T_6}$
2	$\frac{P_0}{P_{MAX}}$	F	$1 - K_4$
A1	$\frac{1}{a\ T_4}$	G	K_4
A2	$\frac{1}{a\ T_4}$		

TABELA 5.2 - Ajuste das Condições Iniciais para o Programa da Fig. 5.4

INTEGRADOR	CONDIÇÃO INICIAL	OBTENÇÃO
R1	$A_{R1} = 0$	eq. 5.10
R2	$A_{R2} = 0$	eq. 5.10
A1	$A_{A1} = \frac{P_0}{P_{MAX}}$	eq. 5.16
C1	$A_{C1} = -K_2 \frac{P_0}{P_{MAX}}$	eq. 5.16
E1	$A_{E1} = -K_2 K_3 \frac{P_0}{P_{MAX}}$	eq. 5.16

OBS.: A potência inicial P_0 é obtida no "load-flow".

5.4 - EXEMPLOS DE SISTEMAS DE ENERGIA E REGULADORES DE VELOCIDADE

1º) Sistema a Vapor com 3 Turbinas (AP, MP, BP) Acopladas e com reaquecimento simples - Figura 5.5

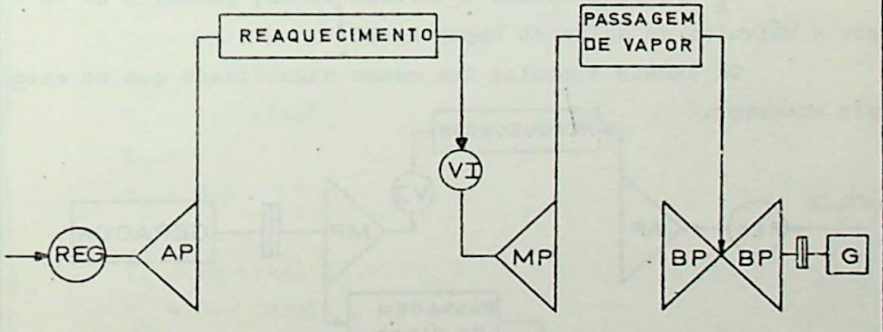


Fig. 5.5 - Sistema a Vapor com 3 Turbinas Acopladas e Reaquecimento Simples

Neste sistema os símbolos da fig. 5.1, não identificados no item 5.1, tem o seguinte significado:

K_2 - fração da potência total disponível na saída do reaquecedor, vinda da turbina de alta pressão (AP).

K_3 - fração da potência fornecida pelo reaquecedor que é desenvolvida pelas turbinas de baixa pressão (BP).

$K_4 = 0$

T_4 - atraso devido a admissão de vapor, associado com o armazenamento do vapor e com a tubulação.

T_5 - atraso do reaquecedor, incluindo a turbina de alta pressão (AP) e as tubulações de vapor quente e frio, antes das válvulas interceptoras(VI)

T_6 - atraso associado com as turbinas de média e baixa pressão, incluindo a passagem de vapor e as válvulas de saída do vapor de BP.

2º) Sistema de Vapor com reaquecimento simples e 3 Turbinas - Turbinas de AP e MP acopladas e turbina de BP em eixo separado - Fig. 5.6.

Neste sistema temos:

$K_4 = 1$

T_6 - atraso devido a turbina de MP, passagem de vapor e válvulas de saída do vapor de BP.

Os demais símbolos tem mesmo significado que no exemplo anterior.

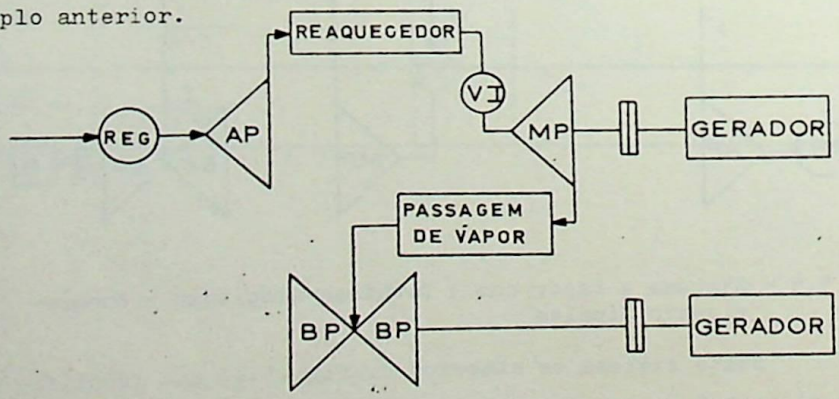


Fig. 5.6 - Sistema a Vapor com Duas Turbinas (AP-MP) Acopladas a uma com eixo separado. Reaquecimento simples.

5.5 - EXEMPLO NUMÉRICO DE PREPARAÇÃO PARA SIMULAÇÃO

Mostraremos a seguir como se prepara a simulação analógica de um sistema de energia com regulador de velocidade, para um cálculo passo a passo de uma curva de balanço.

A fig. 5.7 mostra um diagrama de bloco de um sistema de vapor com reaquecimento, onde as constantes indicadas são valores típicos.

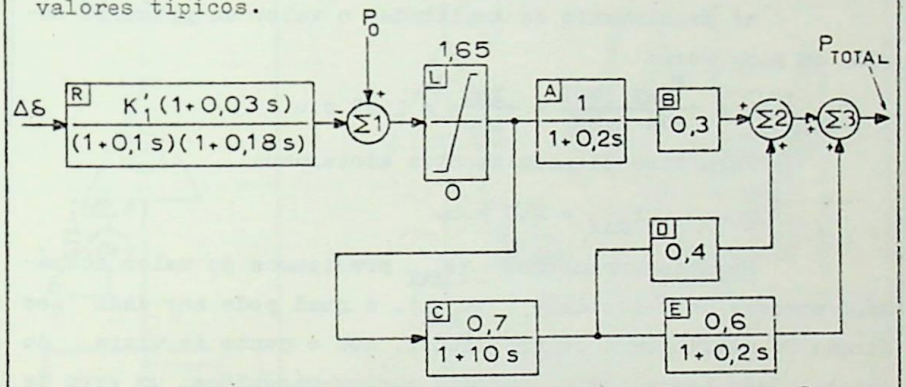


Fig. 5.7 - Diagrama de Blocos de Sistema de Vapor com Reaquecimento, Mostrando Constantes Típicas.

Comparando as figuras 5.1 e 5.7 observamos que:

$T_1 = 0,1$ (seg)
$T_2 = 0,03$ (seg)
$T_3 = 0,18$ (seg)
$T_4 = 0,2$ (seg)
$K_2 = 0,7$
$K_3 = 0,6$
$K_4 = 0$
$T_5 = 10$ (seg)
$T_6 = 0,2$ (seg)

Para que possamos dar o exemplo completo, suponhamos ainda os seguintes dados:

Potência Nominal da Turbina = 100 MW
Potência Máxima da Turbina = 165 MW

MVA BASE = 100

Regulação por Unidade = 0,02

Intervalo de Tempo $\Delta t = 0,05$ (seg)

Turbina fornecendo sua potência nominal.

Da eq. 5.8, calculamos K_1'

$$K_1' = \frac{1}{0,05} \times \frac{150}{0,02} \times \frac{1}{21600} \times \frac{1}{100} = 0,0694 \qquad (5.19)$$

a) Escalamento de Amplitude: o valor da potência máxima em p.u. será:

$$P_{MAX}\ p.u = \frac{P_{MAX\ (MW)}}{MVA\ BASE} = \frac{165}{100} = 1,65\ p.u$$

Para fins de escalamentos adotaremos

$$P_{MAX} = 2,0\ p.u. \qquad (5.20)$$

Para determinarmos $\Delta\delta_{MAX}$ precisamos do valor do máximo excesso de velocidade ($\Delta\omega_{MAX}$), o qual pode ser dado em função do máximo erro de frequência. Sob o ponto de vista da estabilidade transitória, durante curtos-circuitos, um erro de frequência de 3 ciclos pode ser tomado como sendo o máximo, para fins de escalamento; isto porque, quando a frequência de um gerador chega a ter esse erro, em relação ao sistema ou às demais máquinas, já terá ocorrido a perda da estabilidade. Então, da eq. 5.2 temos:

$$\Delta\omega_{MAX} \cong \frac{\Delta\delta_{MAX}}{\Delta t} = 360\,\Delta f \quad \left[\frac{\text{graus elétricos}}{\text{segundo}}\right]$$

donde,

$$\Delta\delta_{MAX} = 360\ \Delta f\ \Delta t \qquad (5.21)$$

Para $\Delta f = 3$ (Hz) e $\Delta t = 0,05$ (seg),

temos:

$$\Delta\delta_{MAX} = 360 \times 3 \times 0,05 = 54 \text{ (graus elétricos)}$$

Para fins de escalamento tomaremos,

$$\Delta\delta_{MAX} = 50 \text{ (graus elétricos)} \qquad (5.22)$$

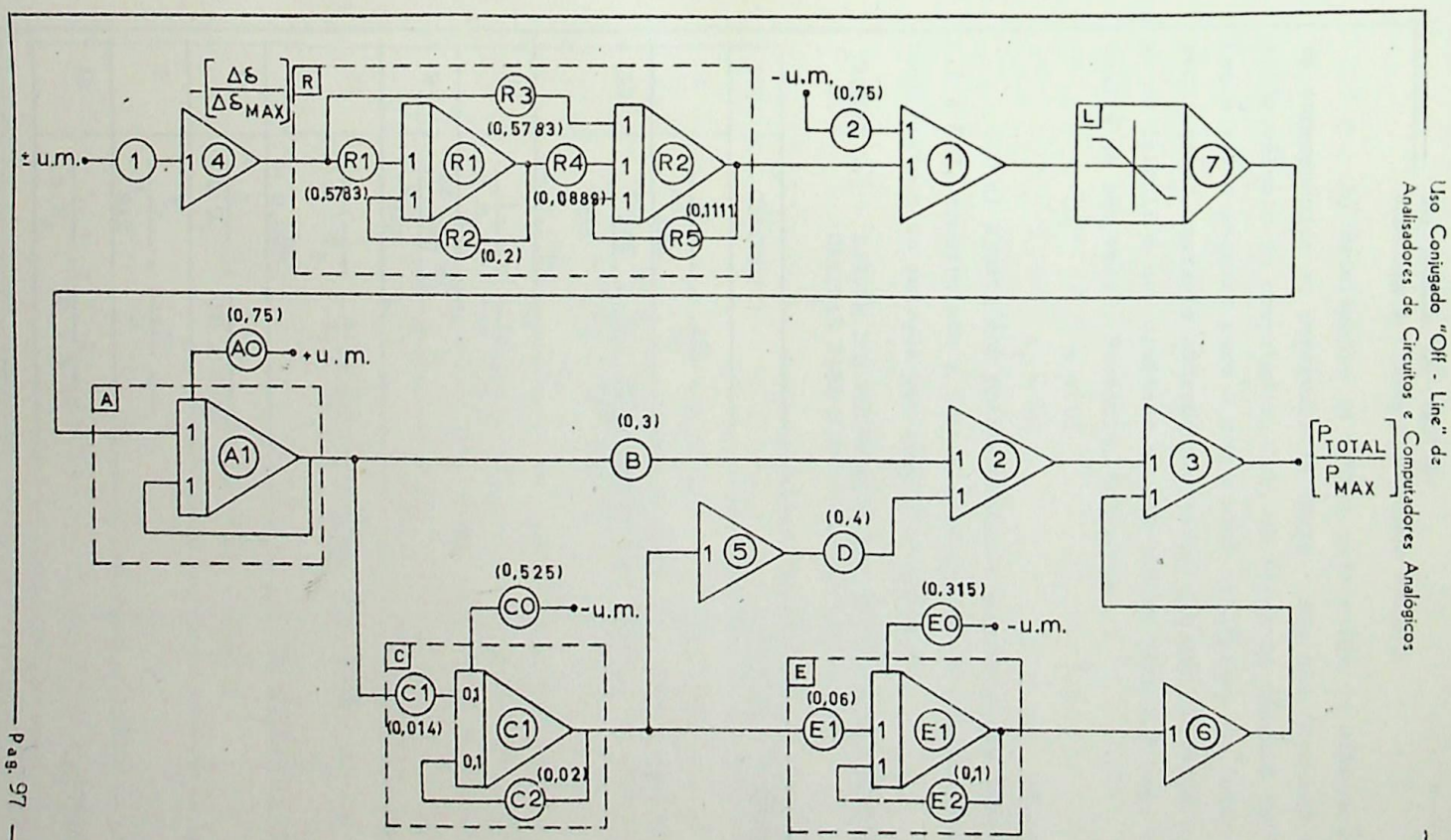


Fig. 5.8 - Programa para o Exemplo Numérico (Item 5.4)

b) Escalamento de tempo: cada etapa da simulação deve corresponder ao intervalo de tempo Δt, que deve ser o tempo de cálculo do computador. Ora, um tempo de cálculo de 0,05 seg é muito pequeno para o computador analógico. Um fator de escalamento bastante conveniente seria 50, que elevaria o tempo de cálculo a ser ajustado no computador para 2,5 seg, o qual é um bom valor. Portanto, tomaremos

$$a = 50$$

$$t_c = 50\ t \qquad (5.23)$$

c) Ajuste dos potenciômetros: com base nas tabelas 5.1 e 5.2, construimos a tabela 5.3, que dá os ajustes dos potenciômetros de entrada das condições iniciais

TABELA 5.3 - AJUSTE DOS POTENCIÔMETROS E CONSTANTES MULTIPLICATIVAS PARA O PROGRAMA DA FIGURA 5.8

POT.	CÁLCULO	AJUSTE	ENTRADA
1	$\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_{MAX}} = \frac{\Delta\delta}{50} = 0{,}02\ \Delta\delta$	$0{,}02\lvert\Delta\delta\rvert$	1
R1	$\frac{\Delta\delta_{MAX}\ K_1'\ T_2}{P_{MAX}\ a\ T_1 T_3} = \frac{50x0{,}0694x0{,}03}{2x50x0{,}1x0{,}18} = 0{,}5783$	0,5783	1
R2	$\frac{1}{a\ T_1} = \frac{1}{50\ x\ 0{,}1} = 0{,}2$	0,2	1
R3	$\frac{\Delta\delta_{MAX}\ K_1'\ T_2}{P_{MAX}\ a\ T_1\ T_3} = 0{,}5783$	0,5783	1
R4	$\frac{1}{a}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_3}) = \frac{1}{50}(\frac{1}{0{,}1} - \frac{1}{0{,}18}) = 0{,}0889$	0,0889	1
R5	$\frac{1}{a\ T_3} = \frac{1}{50\ x\ 0{,}18} = 0{,}1111$	0,1111	1
2	$\frac{P_0}{P_{MAX}} = \frac{1{,}5}{2} = 0{,}75$	0,75	1
A1	$\frac{1}{a\ T_4} = \frac{1}{50\ x\ 0{,}02} = 1$	- - -	1

TABELA 5.3 - Continuação

POT	CÁLCULO	AJUSTE	ENTRADA
A2	$\frac{1}{a\,T_4} = 1$	- -	1
B	$1 - K_2 = 1 - 0,7 = 0,3$	0,3	1
C1	$\frac{K_2}{a\,T_5} = \frac{0,7}{50 \times 10} = 0,0014$	0,014	0,1
C2	$\frac{1}{a\,T_5} = \frac{1}{50 \times 10} = 0,002$	0,020	0,1
D	$1 - K_3 = 1 - 0,6 = 0,4$	0,4	1
E_1	$\frac{K_3}{a\,T_6} = \frac{0,6}{50 \times 0,2} = 0,06$	0,06	1
E_2	$\frac{1}{a\,T_6} = \frac{1}{50 \times 0,2} = 0,1$	0,1	1
RO_1	0	- -	- -
RO_2	0	- -	- -
AO	$\frac{P_0}{P_{MAX}} = \frac{1,5}{2} = 0,75$	0,75	A
CO	$-K_2 \frac{P_0}{P_{MAX}} = 0,7 \times 0,75 = -0,525$	0,525	A
EO	$-K_2 K_3 \frac{P_0}{P_{MAX}} = 0,6 \times 0,525 = -0,315$	0,315	a

5.6 - COMENTÁRIOS SOBRE REGULADORES DE TURBINAS HIDRÁULICAS

Quando se trata de reguladores e turbinas hidráulicas, K_3 e K_4 serão normalmente zero, o que leva a um diagrama de blocos bem mais simples, conforme se vê na figura 5.9, que nada mais é do que a figura 5.1 simplificada ($K_3 = K_4 = 0$).

O diagrama de blocos da figura 5.9 permite a simulação da inércia da água através da escolha de um valor apropriado para K_2.

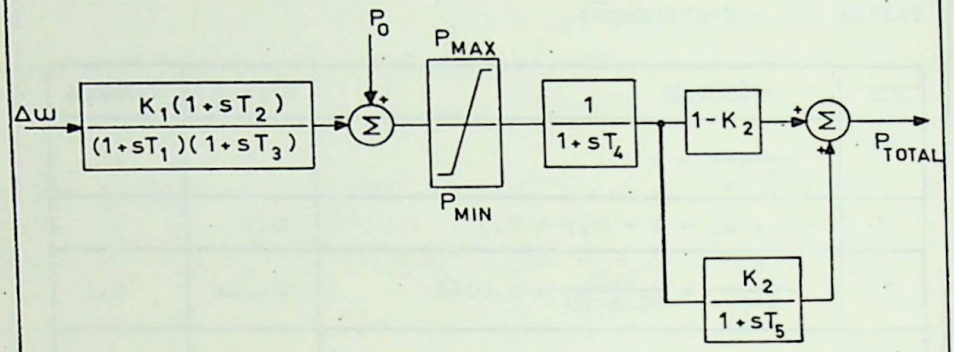


Fig. 5.9 – Diagrama de Blocos de Sistemas Hidráulicos de Energia.

C A P Í T U L O 6

USO CONJUGADO "OFF-LINE" DE ANALISADOR DE CIRCUITOS E COMPUTADOR ANALÓGICO

CAPÍTULO 6

USO CONJUGADO "OFF-LINE" DE ANALISADOR DE CIRCUITOS E COMPUTADOR ANALÓGICO

6.1 - INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores já mostramos como se resolve a equação de balanço com o auxílio do Analisador de Circuitos, onde a metodologia mostrada, que é clássica, não leva em consideração as influências dos reguladores de tensão e de velocidade. Mostramos também como se faz a simulação desses reguladores nos Computadores Analógicos. Agora, neste capítulo, iremos mostrar uma metodologia para o cálculo ponto por ponto da curva de balanço, levando-se em conta as influências dos reguladores de tensão e de velocidade. Esta metodologia compreende o uso do Analisador de Circuitos para a leitura das potências elétricas entregues por cada máquina ao sistema, e o uso do Computador Analógico para a simulação dos reguladores de tensão e de velocidade. Conforme já comentamos anteriormente, esta metodologia não se baseia no uso do Analisador interligado com o Computador ("on-line"). Os dois funcionarão de maneira independente, com o operador fazendo leituras e ajustes em um e em outro, obtendo desta forma os valores necessários para o cálculo de cada ponto da curva de balanço.

6.2 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

No capítulo 3 mostramos como se faz o cálculo ponto por ponto das curvas de balanço, através das equações 3.42, aqui reescritas.

$$P_a = P_m - P_e$$

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + K\,P_{a(n-1)} \qquad (3.42)$$

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n$$

Mostramos também as influências dos reguladores de tensão e velocidade. Os reguladores de tensão agem no sentido de corrigir as tensões nos terminais dos geradores, atuando, para

isto, na excitação das máquinas e, portanto, modificando a força eletromotriz de cada uma dessas máquinas; conforme foi visto no estudo de transferência de potência elétrica apresentado também no capítulo 3 (item 3.2), a potência elétrica P_e transferida por cada máquina ao sistema depende das forças eletromotrizes de todas as máquinas. Os reguladores de velocidade dos geradores, por sua vez, atuam no sentido de fecharem ou abrirem as válvulas de admissão de fluido das turbinas, diminuindo ou aumentando a potência mecânica P_m fornecida ao gerador, conforme a velocidade do grupo seja, respectivamente, maior ou menor do que a velocidade síncrona. Portanto, os reguladores de tensão e velocidade de cada gerador influem diretamente sobre a potência aceleradora dessa máquina, durante um transitório.

Quando se for resolver as equações de balanço das máquinas pertencentes a um sistema elétrico de potência, através da solução ponto por ponto e com o auxílio de um Analisador de Circuitos, e sendo conveniente levar-se em conta as influências dos reguladores de tensão e de velocidade nesta solução, poder-se-á lançar mão de um Computador Analógico para a simulação desses reguladores, conforme foi mostrado nos capítulos 4 e 5, procedendo da maneira que indicamos a seguir:

I) No Analisador: monta-se o circuito representativo do sistema a ser estudado, e ajusta-se as condições de transferência de potência antes da falta. Estas serão as condições iniciais para o estudo de estabilidade a ser realizado.

II) No Computador Analógico: são montados os programas para simulação dos reguladores existentes nos geradores representados no Analisador, partindo-se do diagrama de blocos de cada um desses reguladores, e das condições iniciais de potência, para os reguladores de velocidade, e de f.e.m., para os reguladores de tensão.

III) No Analisador de Circuitos, coloca-se a falta a ser estudada.

IV) No Analisador de Circuitos, lê-se a potência elétrica transferida por cada máquina ao sistema e a tensão terminal dos geradores equipados com reguladores de tensão.

V) Calcula-se a mudança do ângulo de fase para cada máquina, usando as equações 3.42.

VI) No Computador Analógico, injeta-se as tensões terminais de cada gerador nos análogos de seus respectivos reguladores de tensão, e o incremento $\Delta\delta$ do ângulo de fase δ de cada gerador nos análogos de seus respectivos reguladores de velocidade.

VII) No Computador Analógico, ajusta-se o tempo de cálculo T_c correspondente ao intervalo de tempo Δt. Para um fator de escalamento a teremos:

$$T_c = a \times \Delta t. \qquad (6.1)$$

VIII) No Computador Analógico: aperta-se botão CALCULE, e durante o cálculo aperta-se o botão SUSTENTE AO PARAR. Lê-se na saída do análogo de cada regulador de tensão a nova f.e.m. do gerador correspondente, e na saída do análogo de cada regulador de velocidade, a nova potência mecânica $\hat{P}_m$ que cada turbina está entregando ao seu gerador.

IX) No Computador Analógico: na condição inicial de cada integrador, ajusta-se o valor obtido em sua saída no cálculo anterior, para que no intervalo de tempo Δt seguinte, a simulação tenha início com valores do final do intervalo de tempo Δt. anterior.

X) No Analisador de circuitos: em cada máquina, ajusta-se o novo ângulo de fase $\hat{\delta}$, obtido através de cálculo, e nos geradores com regulação de tensão, ajusta-se a nova magnitude da f.e.m., que foi obtida no computador.

XI) Repete-se a sequência a partir do item IV.

Na solução ponto por ponto da equação de balanço, usando-se um Analisador de Circuitos e um Computador Analógico, as seguintes suposições devem ser feitas:

a) A potência de aceleração P_a calculada no começo de um intervalo é constante desde o meio do intervalo precedente até o meio do intervalo considerado.

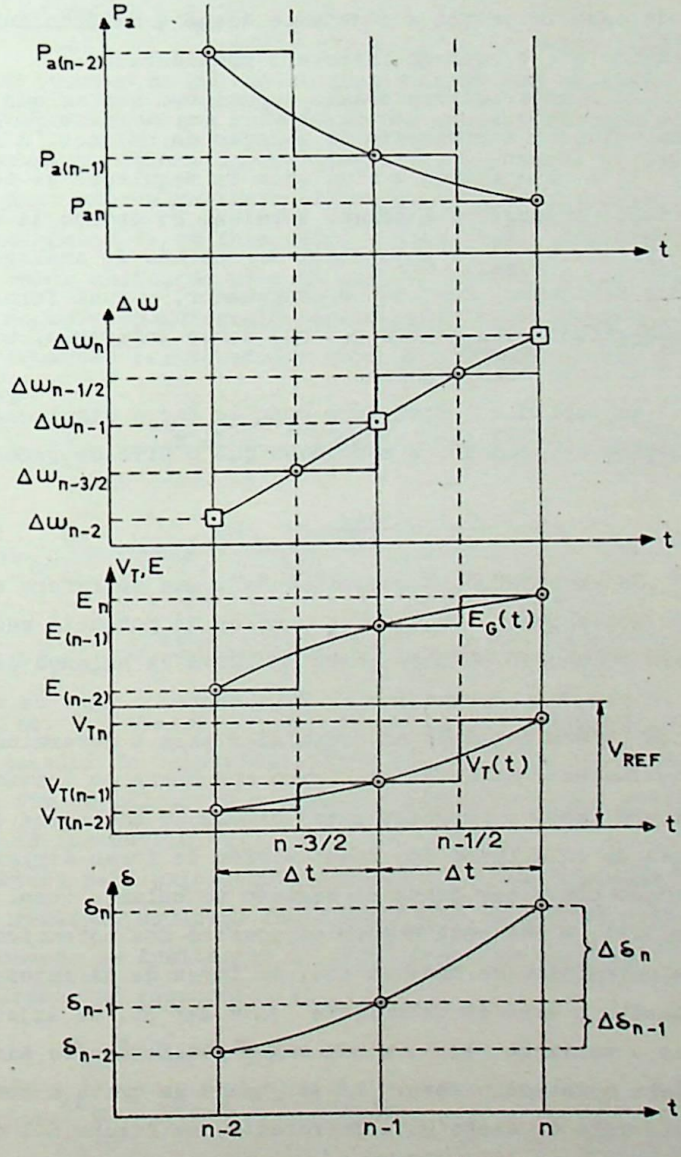


Fig. 6.1 - Solução Ponto por Ponto da Equação de Balanço.

b) A velocidade angular é constante durante qualquer ' intervalo, e igual ao valor calculado para o meio do intervalo considerado.

c) A tensão terminal e a f.e.m. de cada gerador no começo de cada intervalo é constante desde o meio do intervalo' precedente até o meio do intervalo considerado.

As duas primeiras dessas suposições são as que se fazem na solução já conhecida da equação de balanço. A suposição "c" é feita objetivando a simulação da regulação de tensão no Computador Analógico; a tensão terminal no começo de um intervalo (p. ex. $V_{T(n-1)}$) é injetada na entrada do análogo do regulador de tensão, montado no computador, o qual fornece a f.e.m. do gerador (E_{GN}) para o final desse intervalo, e que é o começo do intervalo seguinte.

No capítulo 5 mostramos como se faz a simulação da regulação de velocidade, e mostramos que o erro de velocidade ' $\Delta\omega$ é

$$\Delta\omega = \frac{d\,\delta}{dt} \cong \frac{\Delta\delta}{\Delta t} \qquad (6.2)$$

Se examinarmos a suposição "a", que se refere a potência de aceleração, veremos que o valor da potência mecânica ' P_m para o cálculo de cada ponto da curva de balanço deve ser o do início de cada intervalo. Para tanto, o erro de velocidade $\Delta\omega$ a ser injetado no computador para a determinação de P_m num instante n, deve ser o erro que havia no instante n-1. Por outro lado, o programa para simulação analógica dos reguladores de velocidade foi desenvolvido de forma dirigida para a solução ponto por ponto da equação de balanço (cap. 5 -itens 5.2 e 5.3), e por este motivo os ajustes dos potenciômetros ' foram calculados de maneira que, ao invés de se injetar no ' computador o erro de velocidade $\Delta\omega \cong \Delta\delta/\Delta t$, se injetasse ' apenas a variação $\Delta\delta$, e num outro potenciômetro mais adiante fosse ajustado o fator $1/\Delta t$, tendo em vista a constância do intervalo de tempo Δt. Entretanto, na figura 6.1 observe-se que

$$\frac{\Delta\delta_n}{\Delta t} = \Delta\omega_{n-1/2}$$

$$\frac{\Delta\delta_{(n-1)}}{\Delta t} = \Delta\omega_{n-3/2} \qquad (6.3)$$

Os valores de $\Delta\delta$ calculados através das equações 3.42 são correspondentes aos valores de $\Delta\omega$ para o MEIO de cada um dos intervalos. Porém, interessa-nos o valor para o COMEÇO de cada um dos intervalos. Para obtermos o valor do erro de velocidade no começo de um intervalo, o único meio disponível é tomar o valor médio, do erro no meio do intervalo anterior, e do erro no meio do intervalo considerado. Por exemplo, a partir das equações 6.3 obtemos o erro de velocidade para o instante n-1

$$\Delta\omega_{n-1} = \frac{\Delta\omega_{n-1/2} + \Delta\omega_{n-3/2}}{2} = \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\delta_n}{\Delta t} + \frac{\Delta\delta_{n-1}}{\Delta t}\right)$$

donde,

$$\Delta\omega_{n-1} = \frac{1}{\Delta t} \times \frac{\Delta\delta_n + \Delta\delta_{n-1}}{2} \qquad (6.4)$$

$$\Delta t\,\Delta\omega_{n-1} = \frac{\Delta\delta_n + \Delta\delta_{n-1}}{2} \qquad (6.5)$$

A eq. 6.5 nos dá o valor de $\Delta\delta$ a ser injetado no análogo do regulador de velocidade (vide cap. 5 - fig. 5.4 e tabela 5.1). No fim do cálculo o computador nos fornecerá a potência mecânica no instante n (P_{mn}).

Então, para calcularmos o ponto n de uma curva de balanço de um gerador, equipado com reguladores de tensão e de velocidade, usando um Analisador de circuitos e um Computador Analógico, usamos as equações 3.42.

$$\begin{aligned} P_{an} &= P_{mn} - P_{en} \\ \Delta\delta_n &= \Delta\delta_{n-1} + K P_{a(n-1)} \\ \delta_n &= \delta_{n-1} + \Delta\delta_n \end{aligned} \qquad (3.42)$$

onde temos:

δ_{n-1} e $\Delta\delta_{n-1}$: já calculados

$P_{e(n-1)}$: nos análogos dos reguladores de tensão montados no computador analógico, são injetados os valores da tensão terminal de cada gerador, lidos no Analisador, no instante n-2 ($V_{T(n-2)}$). O Computador faz o cálculo correspondente ao intervalo de tempo Δt, e fornece os valores da f.e.m. no instante n-1 ($E_{G(n-1)}$). No Analisador, ajusta-se em cada máquina as f.e.m. $E_{G(n-1)}$ e os ângulos δ_{n-1} e lê-se então a potência elétrica $P_{e(n-1)}$ que é transferida ao sistema.

$P_{m(n-1)}$: No análogo do regulador de velocidade injeta-se o valor

$$\Delta t \ \Delta\omega_{n-2} = \frac{\Delta\delta_{n-1} + \Delta\delta_{n-2}}{2} \qquad (6.6)$$

O computador faz o cálculo durante o intervalo de tempo Δt, e fornece o valor da potência mecânica $P_{m(n-1)}$.

A metodologia que acabamos de apresentar é mostrada sob a forma de fluxograma, na fig. 6.2. Na figura 6.3, propomos um modelo de ficha para o cálculo ponto por ponto da curva de balanço, usando um Analisador de Circuitos e um Computador Analógico, da maneira que acabamos de mostrar.

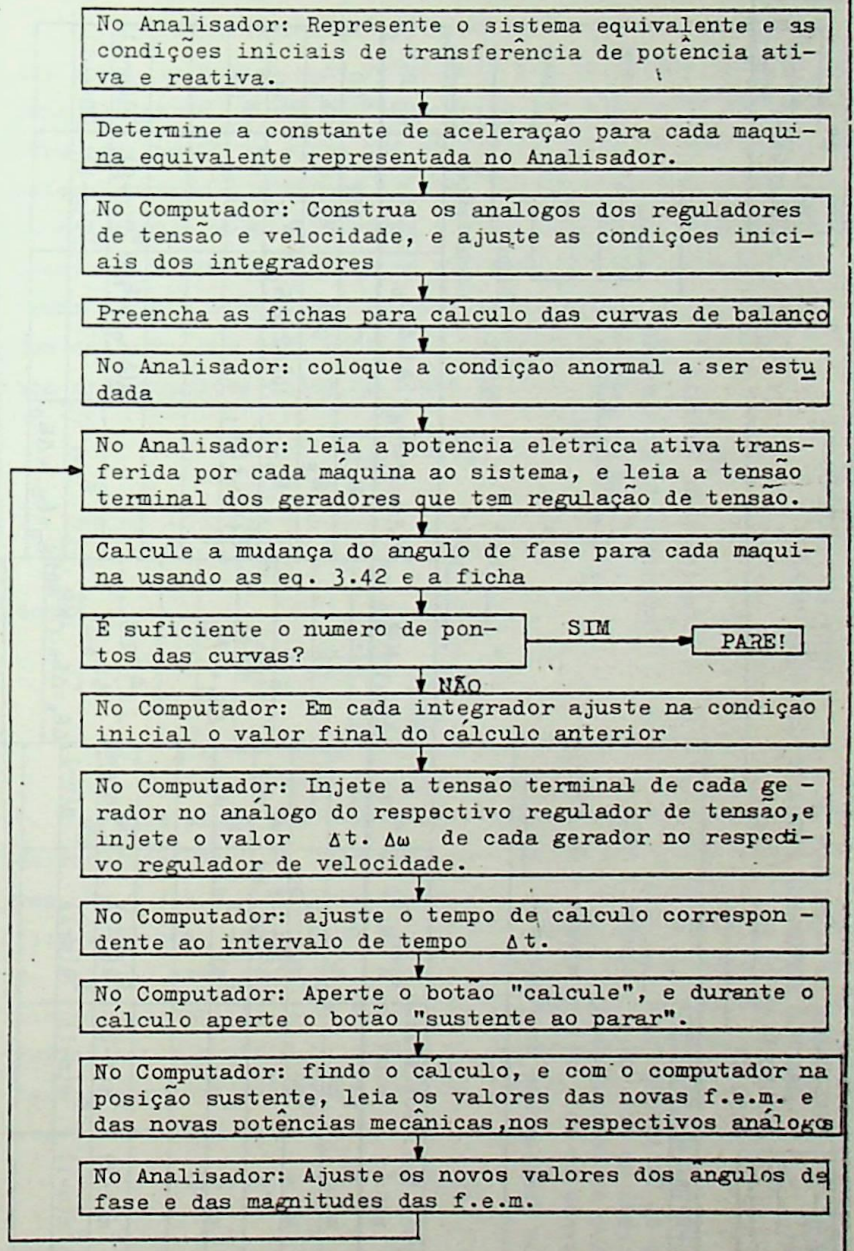


Fig. 6.2 - Fluxograma para o cálculo ponto por ponto da Curva de Balanço.

ANALISADOR
Gerador Nº _____
Caixa nº _____

ANALISADOR DE CIRCUITOS DE C.A. - COMPUTADOR ANALÓGICO
CÁLCULO PONTO POR PONTO DA CURVA DE BALANÇO
ESTUDO Nº _____ PARA _____
CASO Nº _____

Pag. nº _____
Data _____
MVA BASE _____

COMPUTADOR ANALÓGICO
Sistema de Excitação Tipo ____
Entrada no Pot. nº Ajuste = cV_T
Regulador de Velocidade
Entrada no Pot. nº ◯ Ajuste = $D.\Delta t.\Delta\omega$
Fator de Escalamento de Tempo a = _____

Constante de Inércia H = _____

Constante de Aceleração

$$K = \frac{180.f.(\Delta t)^2}{GH}$$

☐ Δt= ____seg

☐ Δt= ____seg

G = _____p.u
X_G = _____p.u

FALTA Tipo _____
Localização _____

Tempo em seg.	Pot. Mec. p.u	Pot.Elet. p.u	$P_a = P_m - P_e$	kP_a	$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + KP_{a(n-1)}$	$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n$	$\Delta t.\Delta\omega_n$	V_T p.u.	E_G p.u.
0_-	P_{mo}	P_{mo}	0	-		δ_o	-	V_{REF}	E_{GO}
0_+	P_{mo}	P_{eo}	$P_{mo} - P_{eo}$	-	0	δ_o	0	V_{TO}	E_{GO}
0_{MED}	-	-	$1/2(P_{mo} - P_{eo})$	kP_{ao}	0	δ_o	$(1/2)\Delta\delta_o$	V_{TO}	E_{GO}
t_1	P_{m1}	P_{e1}	$P_{m1} - P_{e1}$	kP_{a1}	KP_{ao}	$\delta_1 = \delta_o + \Delta\delta_1$		V_{T1}	E_{G1}
					$\Delta\delta_1 + KP_{a1}$				
					$\Delta\delta_{n-2}$		$\frac{1}{2}(\Delta\delta_{n-2} + \Delta\delta_{n-1})$	$V_{T(n-2)}$	$E_{G(n-2)}$
t_{n-2}	$P_{m(n-2)}$	$P_{e(n-2)}$	$P_{a(n-2)}$	$kP_{a(n-2)}$	$\Delta\delta_{n-1}$	δ_{n-1}		$V_{T(n-1)}$	$E_{G(n-1)}$
t_{n-1}	$P_{m(n-1)}$	$P_{e(n-1)}$	$P_{a(n-1)}$	$kP_{a(n-1)}$	$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + KP_{a(n-1)}$	$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n$			
t_n									

Fig. 6.3 - Ficha para Cálculo da Curva de Balanço

Uso Conjugado "Off - Line" de Analisadores de Circuitos e Computadores Analógicos

No Computador Analógico, os valores correspondentes aos erros de tensão e de velocidade são injetados através de potenciômetros, e que por isso devem ser ajustados novamente para cada ponto da curva que se for calcular. O ajuste desses potenciômetros é mostrado na fig. 6.3, restando-nos definir as constantes multiplicativas c e D. Para isto, comparemos os ajustes dos potenciômetros de entradas dos análogos dos sistemas de excitação (cap. 4, tabelas 4.1, 4.3, 4.5 e 4.7) e dos análogos dos reguladores de velocidade (cap. 5, Tab. 5.1), com as expressões dadas na ficha da fig. 6.3.

$$c\ V_T = \frac{V_T}{V_{TMAX} \cdot a \cdot T_R} \qquad (6.7)$$

$$\frac{|\Delta\delta|}{\Delta\delta_{MAX}} = D.|\Delta t.\Delta\omega| = D.|\Delta\delta|$$

donde,

$$c = \frac{1}{V_{TMAX} \cdot a \cdot T_R} \qquad (6.8)$$

$$D = \frac{1}{\Delta\delta_{MAX}}$$

Cabe ainda uma observação, sobre o caso de um sistema de excitação tipo 3, cuja simulação exige operações com fasores, as quais o Computador Analógico não tem possibilidade de fazer. No caso específico do cálculo ponto por ponto da curva de balanço esse problema pode ser contornado conforme foi mencionado no cap. 4, item 4.6.3. As operações com fasores são feitas manualmente e injetadas no Computador através de um potenciômetro cujo ajuste é dado na tabela 4.5 (vide), e que aqui repetimos:

$$\text{Ajuste} = \frac{10}{V_{AMAX}} V_{THEV} \sqrt{1-A}$$

onde,

$$V_{THEV} = |K_p \dot{V}_T + JK_I \dot{I}_T|$$

$$A = \left(\frac{0{,}78\ I_{FD}}{V_{THEV}} \right)^2$$

Se $A > 1 \longrightarrow V_B = 0$

V_B = sinal de entrada da fonte de excitação.

Evidentemente, quando um gerador tiver um sistema de excitação tipo 3, deveremos usar, no cálculo de sua curva de balanço, uma ficha separada, mais completa, com colunas para valores de $\dot{I}_T$, I_{FD}, $\dot{V}_T$, A e ajuste do potenciômetro de entrada desses valores.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

7.1 - OBSERVAÇÕES SOBRE PRECISÃO

A precisão é o principal motivo pelo qual pode ser colocada em discussão a validade de se levar em conta as influências dos reguladores de tensão dos geradores, e dos reguladores de velocidade de suas máquinas motrizes, em um computador analógico, nos estudos de estabilidade realizados com o uso de Analisadores de Circuitos.

O fato de se usar um Analisador de Circuitos implica em representar as diversas máquinas por uma tensão atrás da reatância transitória dessas máquinas, introduzindo-se então algumas simplificações: são desprezados o estado sub-transitório e a saliência do rotor, o que, evidentemente levará a erros dos resultados calculados em relação aos valores reais. Pergunta-se então: tendo em vista as simplificações introduzidas, são as influências dos reguladores de tensão e de velocidade tão apreciáveis que justifiquem sua consideração?

Cada um dos reguladores deve ser analisado separadamente.

No capítulo 4, item 4.7 foi feita a simulação de um caso de perda de carga de um gerador, com a finalidade de se verificar o comportamento de um sistema de excitação típico. Vimos que um erro de tensão de 20% foi completamente corrigido em pouco menos de 1 segundo. Ora, num estudo de estabilidade transitória, a grande maioria dos casos examinados são curto-circuitos, onde a tensão nos terminais dos geradores pode cair abaixo da metade do valor referência, o que faz com que os reguladores de tensão atuem rápida e energicamente, elevando consideravelmente a f.e.m. de cada gerador, e consequentemente, alterando substancialmente a potência elétrica que cada máquina transfere ao sistema.

Os reguladores de tensão dos sistemas de excitação tipo 1 não são dos mais rápidos existentes hoje em dia, por causa das excitatrizes serem máquinas rotativas, cujos valores de constante de tempo são apreciáveis. Os sistemas de excitação tipo 3, que são totalmente estáticos, possuem velocidades de resposta muito maiores do que as dos demais tipos, pois suas excitatrizes são retificadores controlados, totalmente estáticos, e portanto, com baixos valores de constantes de tempo. No caso de ocorrer uma falta do tipo curto-circuito no sistema de potência, a qual faz com que os valores das tensões terminais dos geradores caiam para valores bem menores do que o valor referência, estes sistemas de excitação irão atuar de maneira bastante violenta, mudando rápida e fortemente as magnitudes das ff.ee.mm. dos geradores. E neste ponto, é conveniente chamar a atenção para um fato que foi constatado experimentalmente. Ao contrário do que se pode pensar inicialmente, nem sempre o uso de sistemas de excitação cada vez mais rápidos melhoram as condições de estabilidade transitória. Um regulador de tensão excessivamente rápido pode, muitas vezes, piorar as condições de estabilidade transitória do gerador em que ele estiver instalado, ao invés de melhorá-las. Nestas condições, já não podemos ter certeza se a omissão dos reguladores de tensão irá nos conduzir a resultados pessimistas; se o regulador for prejudicial à estabilidade, a sua omissão conduz a resultados otimistas, e portanto, inadequados para, por exemplo, servirem como referência para a escolha de um sistema de proteção. Essa possibilidade torna então quase que obrigatória a simulação dos sistemas de excitação nos estudos de estabilidade transitória, pois qualquer omissão ou aproximação que se faz em qualquer estudo, deve conduzir a resultados pessimistas, de modo que a solução adotada proporcione uma margem de segurança. Se tal não acontece, essa omissão ou aproximação não deve ser feita.

O regulador de velocidade, ao contrário do regulador de tensão , atua de forma praticamente imperceptível durante o período em que se define a estabilidade da máquina, logo após a perturbação. Tal fato se deve não somente ao maior valor das constantes de tempo do regulador, sistema de energia e turbina, mas também ao pequeno valor do erro de velocidade, o qual, quando chega aos 5%, certamente já terá ocorrido a perda da estabilidade, pois a esse erro, num sistema cuja frequência seja de 60 Hertz, corresponderá um desvio de frequência de 3 hertz. A própria equação de balanço, pela forma como é resolvida até hoje, mesmo pelos processos mais sofisticados, confirma o que acabamos de afirmar, pois em sua dedução supõe-se que a quantidade de movimento angular (M) é um parâmetro, o que em verdade não ocorre, pois quantidade de movimento é o produto do momento de inércia (J) pela velocidade angular (ω).

Feitas essas considerações, concluimos que os estudos de estabilidade transitória feitos com o uso conjugado "off - line" do Analisador de Circuitos e Computador Analógico são perfeitamente válidos, justificando-se, entretanto, a simulação analógica apenas dos sistemas de excitação.

7.2 - COMPARAÇÃO COM O SISTEMA DIGITAL

A utilização de Computadores Digitais para estudos da estabilidade transitória dos sistemas elétricos de potência começou com programas para o cálculo passo a passo da curva de balanço, da mesma forma que eram feitos manualmente, isto é, as máquinas eram representadas através de tensão constante atrás da reatância transitória. A partir de 1960 foram desenvolvidos programas mais perfeitos para estudos de estabilidade, e tornou-se possível fazer a representação completa do gerador, incluindo-se então a resistência ôhmica da armadura, saliência da máquina, e estado subtransitório, além dos reguladores de tensão e de velocidade. Os programas atualmente existentes possibilitam estudos de sistemas bastante grandes,

existindo programas para sistemas com até 5000 barras e 1000 geradores, sendo bastante comuns programas para sistemas com 1000 barras e 500 geradores. Por essas razões, os resultados obtidos nos Computadores Digitais são bastante precisos, além da excepcional rapidez com que os cálculos são feitos, em relação aos métodos convencionais.

O uso conjugado "off-line" de Analisadores de circuitos e Computadores Analógicos é limitado pelo tamanho do sistema de potência. Um estudo de estabilidade feito com 10 geradores do Analisador já é bastante trabalhoso. Os maiores Analisadores tem, em média 24 geradores. Apesar de todas as vantagens do Computador Digital, um estudo de estabilidade usando um Analisador de Circuitos e um Computador Analógico proporciona aos operadores uma visão muito mais completa dos fenômenos estudados, o que não acontece com o Computador Digital, o qual, embora forneça todos os resultados com precisão, não dá uma idéia do fenômeno em estudo, ficando difícil a localização de possíveis erros, por exemplo, de entrada de dados. A interpretação de resultados de cálculos feitos com o uso de um Analisador e um Computador Analógico é imediata e clara; para interpretar os resultados de cálculos feitos em Computador Digital, deve-se ter um conhecimento completo do fenômeno, e que, no caso específico da estabilidade transitória, muito provavelmente terá sido adquirido, em parte, trabalhando-se num Analisador de Circuitos.

7.3 - PERSPECTIVAS DO USO CONJUGADO "ON-LINE" DE ANALISADOR DE CIRCUITOS E COMPUTADOR ANALÓGICO

A combinação do Analisador de Circuitos com o Computador Analógico oferece possibilidades bastante interessantes para a análise dos sistemas elétricos de potência. O Analisador, devido ao tipo de fonte de tensão que o alimenta, sozinho é usado principalmente para estudos do regime permanente, tendo muitas limitações no estudo de transitórios, e que foram mostradas no capítulo 2. O Computador Analógico, por sua

vez, não tem um circuito disponível para simular um sistema de potência cujas máquinas tenham controle automático.

Quando o Analisador opera sozinho, as máquinas são representadas por fontes de tensão, que são alimentadas de u'a maneira convencional (grupo motor-gerador ou oscilador RC);as magnitudes de tensão e os respectivos ângulos de fase são ajustados nas fontes de tensão ou na mesa de comando. Segundo a ref. 9, com o Analisador e o Computador operando juntos, as fontes de tensão do Analisador seriam desligadas; as tensões necessárias seriam fornecidas por amplificadores individuais comandados pelo Computador Analógico, no qual seriam feitos os ajustes de amplitude e ângulo de fase dessas tensões.

Um analisador de circuitos interligado, com um Computador Analógico permitirá a realização dos seguintes estudos:

I) Estudos combinados dos Sistemas de Controle Automático de Várias Máquinas Conectadas ao mesmo Circuito: através da montagem do circuito, com as tensões e potências das máquinas sendo comandados através dos sinais de saída dos análogos dos sistemas de controle.

II) Efeito de Chaveamento: um chaveamento pode ser simulado através de um comparador, cuja chave muda de posição num tempo pré-fixado, comandando relés que representariam os disjuntores operados no chaveamento a ser simulado.

III) Efeito dos Sistemas de Controle nas Correntes de Curto-Circuito: ao ocorrer um curto, as tensões terminais caem, fazendo com que os reguladores de tensão atuem, aumentando as f.e.m. dos geradores, e, portanto, as magnitudes das correntes de curto-circuito. Com os análogos dos reguladores de tensão controlando a magnitude da tensão fornecida pelo Computador, é fácil obter o comportamento das correntes de Curto-Circuito.

IV) Curvas das Correntes de Curto-Circuito em Relação ao Tempo: podem ser vistas nos osciloscópios disponíveis no Computador Analógico.

V) Estabilidade Transitória: podem ser realizados com enorme facilidade, e levando-se em consideração os reguladores de tensão e de velocidade. Permanece a limitação quanto ao estado subtransitório e a saliência das máquinas de polos salientes, visto que a única representação possível das máquinas é por uma f.e.m., que é variável por causa da regulação de tensão, mas atrás de uma impedância constante (reatância transitória). A equação de balanço de u'a máquina

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (7.1)$$

é solucionada no computador analógico com um programa como o mostrado na figura 7.1.

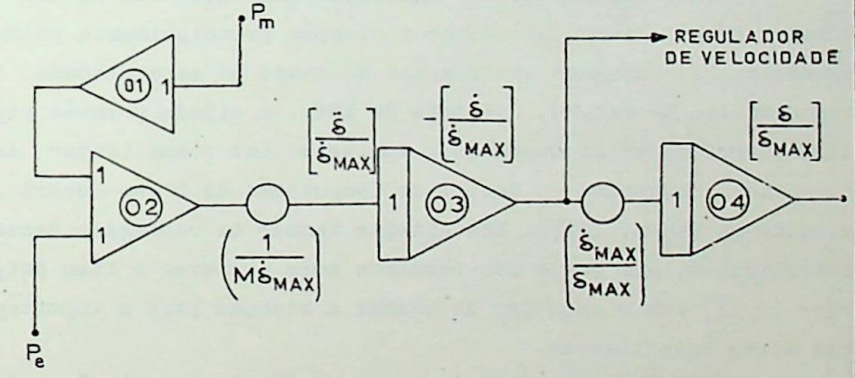


Fig. 7.1 - Solução Analógica da Equação de Balanço

O sinal de P_m (potência mecânica) é obtido na saída do análogo do regulador de velocidade, cuja entrada é o erro de velocidade, e é disponível na saída do integrador (03) $(\frac{d\delta}{dt})$. O sinal de P_e é obtido na saída do amplificador individual correspondente ao gerador em estudo. Os sinais de comando que o computador analógico deve injetar nesse amplificador são a saída do análogo do sistema de excitação, para a f.e.m., e a saída do integrador (04) para o ângulo de fase. Desta forma consegue-se o traçado automático da curva de balanço, a qual é obtida também da saída do integrador (04).

É interessante salientar que um análogo de sistema de excitação, para ser montado, utiliza cerca de 18 elementos ativos; um análogo de turbina com regulador de velocidade, 12 elementos ativos. Entretanto, dentro das limitações de tamanho do Computador Analógico, a melhor maneira de se resolver um sistema de equações de balanço é através do uso conjugado "on-line" de um Analisador de Circuitos e um Computador Analógico, pela rapidez, pela visualização, e pela possibilidade que o método oferece de se conseguir várias curvas de balanço, correspondentes a diversos tempos de desligamento de falta, mediante simples ajustes de potenciômetros.

7.4 - COMENTÁRIO FINAL

A interligação de um Computador Analógico com um Analisador de Circuitos chamou-nos a atenção principalmente pelas excepcionais vantagens que oferece no campo da estabilidade transitória. Na ref. 9, que data de 1961, é citada a então próxima interligação do Computador Analógico com o Analisador de Circuitos existentes no Centro de Computação da Brown-Boveri, situado em Baden, Suiça. São citadas também as vantagens dessa interligação, nas quais nos baseamos para escrever o item anterior (7.3), com o objetivo de chamar a atenção para a importância dessa interligação.

Hoje, naquele Centro, o uso conjugado "on-line" do Analisador de Circuitos com o Computador Analógico já deve ser uma realidade, proporcionando grande facilidade para os estudos de estabilidade transitória, e principalmente, completa visualização dos fenômenos da estabilidade.

O que acabamos de escrever, sobre o uso conjugado"off -line" de Analisadores de Circuitos e Computadores Analógicos teve dois objetivos: o primeiro, apresentar u'a metodologia de cálculo das curvas de balanço das máquinas de um sistema de potência, considerando as influências dos sistemas de controle dessas máquinas; o segundo, e mais importante, tomar um primeiro contato com os problemas a serem enfrentados na rea-

lização da interligação do Analisador de Circuitos com o Computador Analógico. Cremos ter atingido nosso objetivo.

A P Ê N D I C E A

SUBSÍDIOS DE CONTROLES E SERVOMECANISMOS

APÊNDICE A

SUBSÍDIOS DE CONTRÔLES E SERVOMECANISMOS

A.1 - GENERALIDADES

A teoria dos Controles e Servomecanismos consiste no estudo de métodos gráficos e matemáticos para a análise e projeto dos sistemas automáticos de controle. Neste trabalho estamos interessados tão somente em obter as correções feitas pelos reguladores de tensão e velocidade de grupos geradores, quando estes são submetidos a perturbações que façam a tensão e velocidade dos grupos controlados pelos reguladores irem a valores diferentes dos desejados.

Todo sistema de controle automático é excitado por um sinal de entrada, ou comando, ao qual vai corresponder uma saída de potência capaz de fazer o equipamento controlado (carga), chegar na condição desejada, fixada através do sinal de entrada. Existem dois tipos de sistemas de controle automático: em malha aberta e em malha fechada. Num sistema em malha aberta, o sinal de entrada é aplicado, geralmente é amplificado, obtendo-se então a saída de potência. Os componentes básicos usual-

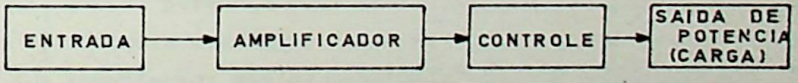


Fig. A.1 - Sistema de controle em malha aberta

mente encontrados num sistema de controle em malha aberta são indicados no diagrama de blocos da fig. A.1.

Os sistemas de controle em malha fechada tem os mesmos componentes básicos da fig. A.1, com algumas características adicionais. O valor real (saída do sistema de controle) é medido, e um sinal correspondente a esta medida é injetado na entrada do sistema, onde é comparado com o valor referência (saí

da desejada).

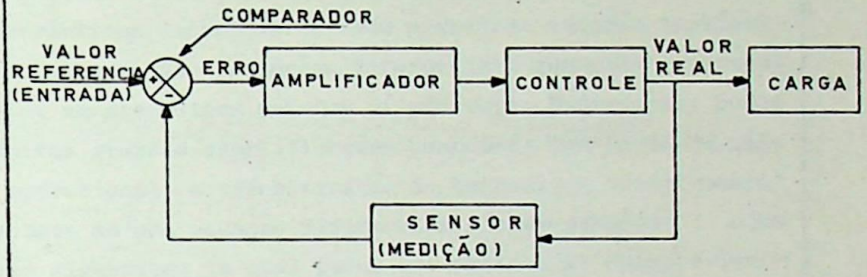


Fig. A.2 - Sistema de Controle em malha fechada

A comparação é feita em algum dispositivo que produza um sinal proporcional a diferença entre os dois sinais nele injetados. Esse sinal diferença é comumente chamado "erro", se os dois sinais comparados são realmente os sinais de entrada e saída. Frequentemente, o sinal de realimentação pela saída é modificado de alguma forma, antes da comparação com o sinal de entrada, e neste caso é evidente que o sinal diferença não será o erro. De qualquer maneira, este sinal é que irá acionar o sistema, sendo, portanto, chamado de "sinal de atuação".

Os sistemas em malha fechada que, além de medirem a saída e compará-la com a referência, também usam o erro (ou uma função do erro) para controlarem a magnitude e/ou a direção da potência aplicada à saída, são chamados de sistemas de controle contínuo. Todos eles são sistemas de controle com realimentação, que se subclassificam em reguladores e servomecanismos. Os reguladores são normalmente projetados para compensar os erros devidos a perturbações na carga ou na saída, e com o sinal de entrada (valor referência) mantido fixo; esta restrição não é aplicável aos servomecanismos, nos quais os valores referência podem ser variáveis.

Embora a maioria dos reguladores seja projetada por outros métodos, eles podem ser analisados e projetados através da teoria dos servomecanismos. Num sistema físico, compreendendo um equipamento dotado de reguladores, e os próprios

reguladores, as características dinâmicas de cada componente' desse sistema estão implícitos em sua equação diferencial. As características dinâmicas de todo o sistema estarão implíci - tas num sistema de equações diferenciais que pode ser resol vido por um dos muitos métodos disponíveis. Entretanto, podem ser feitas grandes simplificações usando-se uma forma de cálculo operacional: a transformação de Laplace. A transformada' de Laplace de uma equação diferencial linear resulta numa equação algébrica, da qual podem ser obtidas as características dinâmicas do componente que aquela equação diferencial representava. Quando o componente é usado de tal forma que um sinal de entrada é injetado em um ponto, e um sinal de saída é obtido em outro ponto, então a equação algébrica pode ser manipulada de modo a formar a relação entre o sinal de saída' e o de entrada. Esta equação (para todas as condições inici - ais nulas) é chamada "função de transferência" do componente, e é através das funções de transferência que podemos determinar as compensações introduzidos pelos reguladores nos respectivos sistemas controlados, a fim de que essas compensações ' possam ser consideradas num estudo qualquer do sistema, que ' se deseje fazer.

A.2 - TRANSFORMADAS DE LAPLACE

A.2.1 - INTRODUÇÃO: A transformação de Laplace é baseada no uso da integral de Laplace, e através dela surgiu uma forma ' moderna e válida de cálculo operacional. Em servomecanismos , quando uma equação, expressa em termos de tempo, é operada pela integral de Laplace, uma nova equação, ou uma equação ' "transformada", é obtida, em termos de uma variável complexa' arbitrária da forma $\sigma + j\omega$. Este processo é conhecido como transformada direta de Laplace da equação. Normalmente, a equação transformada é puramente algébrica, e portanto pode ser manipulada algebricamente para ser resolvida e obter- se então o resultado desejado. Evidentemente, o resultado obtido é uma função explícita da variável complexa; portanto, será

necessário executar o processo inverso para que tenhamos o resultado desejado em função de t. Este último processo é chamado de "transformada inversa de Laplace".

A.2.2 - DEFINIÇÃO: Os símbolos matemáticos usados em servomecanismos para operações com transformadas de Laplace são:

f(t) = uma função qualquer do tempo.

s = variável complexa da forma $\sigma + j\omega$

F(s) = expressão resultante, função da variável s, quando f(t) é operada pela integral de Laplace

$\mathcal{L}$ = um símbolo operacional que precede a função a ser transformada pela integral de Laplace; este símbolo indica a operação de transformação.

Portanto: $F(s) \triangleq \mathcal{L}[f(t)]$ (A.1)

onde o símbolo $\triangleq$ indica "igual por definição". A equação A. 1 indica que a aplicação da transformação de Laplace em uma expressão f(t) resulta numa outra expressão F(s). A integral de Laplace, que é representada simbólicamente por $\mathcal{L}$, é definida como

$$\mathcal{L} \triangleq \int_0^\infty e^{-st}\, dt \qquad (A.2)$$

desta forma temos:

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^\infty e^{-st} dt\,[f(t)] = \int_0^\infty f(t)e^{-st} dt \qquad (A.3)$$

Portanto, a transformada de Laplace de uma equação na qual a variável independente é t, é obtida multiplicando-se a expressão a ser transformada por e^{-st}, e integrando-se o produto assim obtido de t = 0 até t = ∞. Evidente que a variável independente pode ser qualquer; estamos usando t porque é a variável comum na teoria dos servomecanismos.

A.2.3 - LINEARIDADE DA TRANSFORMADA DE LAPLACE: a integral de Laplace é um operador linear e possui as seguintes propriedades, aqui apresentadas sem demonstração:

1ª Propriedade - a transformada de uma soma é a soma das transformadas

$$\mathcal{L}\left[f_1(t) + f_2(t)\right] = \mathcal{L}\left[f_1(t)\right] + \mathcal{L}\left[f_2(t)\right] \qquad (A.4)$$

2ª Propriedade - Se k for uma constante, tem-se que:

$$\mathcal{L}\left[k\, f(t)\right] = k\ \mathcal{L}\left[f(t)\right] \qquad (A.5)$$

A.2.3 - TRANSFORMADAS DE LAPLACE IMPORTANTES: mostramos a seguir as transformadas de Laplace que são de nosso interesse neste trabalho, o que nos permitirá visualisar melhor o comportamento dos reguladores. Mostraremos os resultados sem deduções, porque estas estão fora do objetivo deste trabalho. As transformadas são obtidas a partir da equação A.3.

1ª) Função degrau: $f(t) = k\,u(t)$, onde $u(t) = \begin{cases} 0 \text{ para } t < 0 \\ 1 \text{ para } t > 0 \end{cases}$

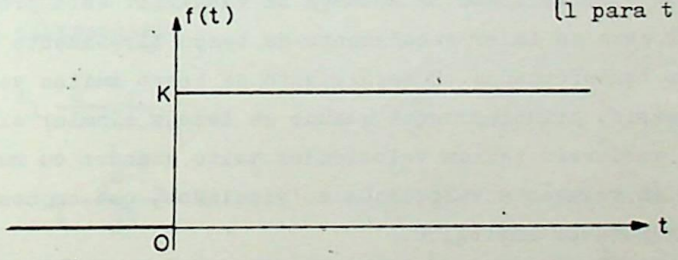


Fig. A.3 - Função Salto unitário

$$\mathcal{L}\left[f(t)\right] = F(s) = \frac{k}{s} \qquad (A.6)$$

2ª) Função exponencial: $f(t) = e^{at}$

$$\mathcal{L}\left[f(t)\right] = \mathcal{L}\left[e^{at}\right] = \frac{1}{s - a}$$

$$\mathcal{L}\left[e^{-at}\right] = \frac{1}{s + a} \qquad (A.7)$$

3ª) Transformadas de derivadas:

Se tivermos $\mathcal{L}\left[f(t)\right] = F(s)$

então, $$\mathcal{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) - f(0) \qquad (A.8)$$

Para obtenção de uma derivada de ordem qualquer, basta aplicar a equação A.8 um número de vezes igual a ordem da derivada que se quer obter.

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = s^n F(s) - s^{n-1} f(0) - \ldots - s f^{n-2}(0) - f^{n-1}(0) \qquad (A.9)$$

4ª) Transformada de integral

Se $\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$

$$f^{-1}(t) \triangleq \int f(t)dt \qquad (A.10)$$

então,

$$\mathcal{L}\left[\int f(t)dt\right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{f^{-1}(0)}{s} \qquad (A.11)$$

A.2.4 - PROPRIEDADE DA MUDANÇA DE VARIÁVEL: esta propriedade é útil para se fazer escalamento de tempo diretamente nas expressões transformadas. O escalamento de tempo muitas vezes é necessário, principalmente quando se deseja simular sistemas cujas variáveis tenham velocidades muito grandes ou muito pequenas em relação a velocidade do simulador, que em nosso caso é o computador analógico.

Se tivermos uma função f(t) tal que $\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$, se fizermos x = at, sendo a uma constante, demonstra-se que

$$\mathcal{L}[f(at)] = \mathcal{L}[f(x)] = \frac{1}{a} F\left(\frac{s}{a}\right) \qquad (A.12)$$

A.2.5 - TEOREMA DO VALOR FINAL: Demonstra-se que, se $\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$, então,

$$\lim_{t \to \infty} f(t) = \lim_{s \to 0} sF(s) \qquad (A.13)$$

A.3 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A Função de Transferência de um sistema qualquer é definida como sendo o quociente da transformada de Laplace da variável de saída do sistema pela transformada de Laplace da variável de entrada, admitindo-se condições iniciais nulas.

As características dinâmicas de um sistema linear são representadas por um grupo de equações diferenciais lineares. A transformação de Laplace de derivadas (eq. A.9) possibilita transformar essas equações diferenciais em equações algébricas, que podem ser manipuladas até que se obtenha uma única equação, na qual só aparecem as variáveis da entrada e da saída que interessam.

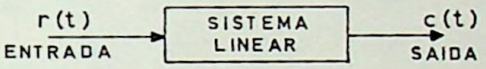


Fig. A.4 - Representação de um Sistema Linear

Num sistema como o da fig. A.4 podemos obter a seguinte equação diferencial.

$$A_o \frac{d^n r}{dt} + A_1 \frac{d^{n-1} r}{dt^{n-1}} + \ldots\ldots + A_{n-1} \frac{dr}{dt} + A_n\, r(t) =$$

$$= B_o \frac{d^m c}{dt} + B_1 \frac{d^{m-1} c}{dt} + \ldots\ldots + B_{m-1} \frac{dc}{dt} + B_m\, c(t) \qquad (A.14)$$

Admitindo que todas as condições iniciais são nulas, a transformada de Laplace da equação A.14 será:

$$(A_o s^n + A_1 s^{n-1} + \ldots\ldots + A_{n-1} s + A_n)\, R(s) =$$

$$= (B_o s^m + B_1 s^{m-1} + \ldots\ldots + B_{m-1} s + B_m)\, C(s)$$

Dividindo a saída pela entrada vem:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{B_o s^m + B_1 s^{m-1} + \ldots\ldots + B_{m-1} s + B_m}{A_o s^n + A_1 s^{n-1} + \ldots\ldots + A_{n-1} s + A_n} \qquad (A.15)$$

G(s) é a função do sistema linear representado na figura A.4

EXEMPLO A.1 - Determinar a função de transferência do Circuito série da fig. A.5

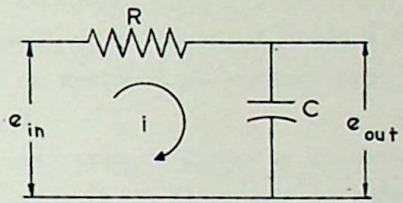


Fig. A.5 - Circuito Série RC

$$e_{in} = iR + \frac{1}{c} \int i\,dt = R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{c}$$

$$e_{out} = \frac{q}{c} \qquad \text{(A.16)}$$

Tomando a transformada das equações A.16 obtemos:

$$E_{in}(s) = (Rs + \frac{1}{c})Q(s) \qquad \text{(A.17)}$$

$$E_{out}(s) = \frac{1}{c}\,Q(s)$$

Dividindo as eq. A.17 membro a membro temos:

$$\frac{E_{out}(s)}{E_{in}(s)} = G(s) = \frac{1}{RCs + 1} \qquad \text{(A.18)}$$

Fica claro então que as características de um sistema linear dependem exclusivamente das propriedades de seus componentes. Portanto, a função de transferênciaG(s) é uma propriedade somente dos elementos do sistema, e é independente da excitação e das condições iniciais.

A.4 - DIAGRAMA DE BLOCOS

Nas diversas partes de um sistema, as variáveis intermediárias de entrada e saída de cada uma dessas partes podem ser relacionadas entre si, de modo que se conheça a operação que ali é realizada. Se representarmos simbolicamente cada parte do sistema por um bloco, a reunião adequada dos blocos assim obtidos será uma forma bastante visual de descrever o sistema, de maneira completa, desde a entrada até a saída, e que é denominado DIAGRAMA DE BLOCOS do sistema. Os blocos são descritos em termos de suas funções de transferência, de forma que a

transformada da variável de saída de um bloco é igual ao produto da transformada da variável de entrada pela função de transferência do bloco.

Basicamente, são três os símbolos utilizados na representação de sistemas através de diagramas de blocos:

I) Bloco: $C(s) = G(s)R(s)$ (A.19)

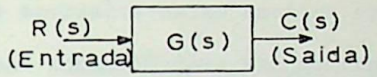


Fig. A.6 - Bloco

II) Ponto de soma, ou somador:

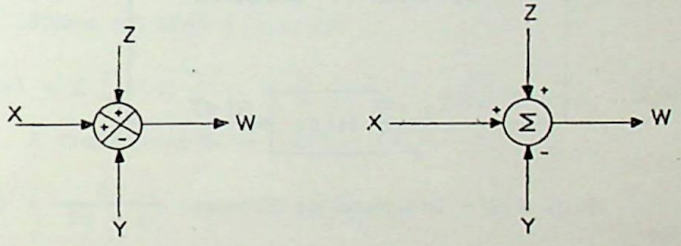


Fig. A.7 - Representações usuais de somador

$$W = X - Y + Z \qquad (A.20)$$

III) Pontos de identidade ou de retirada

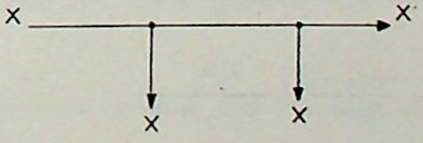


Fig. A.8 - Pontos de retirada

Portanto, o Diagrama de Blocos é a melhor maneira de representar os sistemas mais complicados, pois desmembra a função de transferência em outras mais simples, ao mesmo tempo que permite visualizar o processo que está ocorrendo. Por isso , quase todos os fabricantes apresentam as relações entre as variáveis de saída e de entrada dos seus sistemas na forma de Diagramas de Blocos, que permitem determinar o comportamento desses sistemas, através de métodos matemáticos comuns, sem que se conheça as suas características construtivas.

EXEMPLO A.2 - Relacionamento das transformadas das variáveis de entrada, saída e intermediárias do Diagrama de Blocos da Fig. A.9

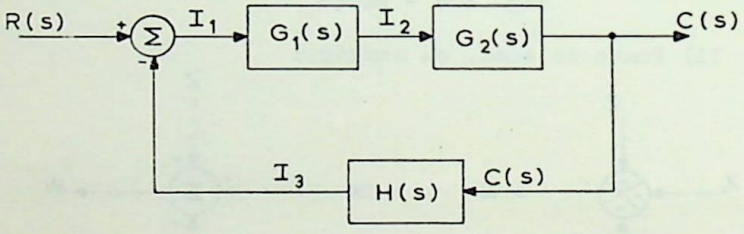


Fig. A.9 - Diagrama de Blocos

$$I_1 = R - I_3$$
$$I_3 = HC \qquad (A.21)$$
$$I_2 = G_1 I_1$$
$$C = G_2 I_2$$

Das equações (A.21) podemos relacionar as variáveis de saída e de entrada, obtendo a função de transferência total do sistema

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1 G_2}{G_1 G_2 + H} \qquad (A.22)$$

A.5 - CONSTANTE DE TEMPO E GANHO DE UM SISTEMA

Na grande maioria dos casos, o que se deseja de um sistema, ou parte dele, é que o sinal de saída seja exatamente

proporcional ao sinal de entrada, o que muitas vezes não se consegue, principalmente quando se faz uma amplificação de potência. Geralmente o sistema apresenta uma inércia, e que faz com que o sinal de saída só atinja o valor desejado após decorrido um certo tempo.

Consideremos o caso de um sistema como o da figura A.10, ao qual aplicamos na entrada um degrau unitário

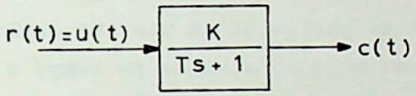


Fig. A.10 - Sistema com Ganho e uma Constante de Tempo

Vimos no item A.3.3 que

$$R(s) = \mathcal{L}\left[r(t)\right] = \mathcal{L}\left[\mu(t)\right] = \frac{1}{s} \qquad (A.23)$$

A transformada da saída é dada por

$$C(s) = \frac{K}{Ts+1} R(s) = \frac{K}{(Ts+1)s} = K\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}}\right) \qquad (A.24)$$

A saída c(t) é dada pela antitransformada da equação A.24

$$c(t) = K(1 - e^{-t/T}) \qquad (A.25)$$

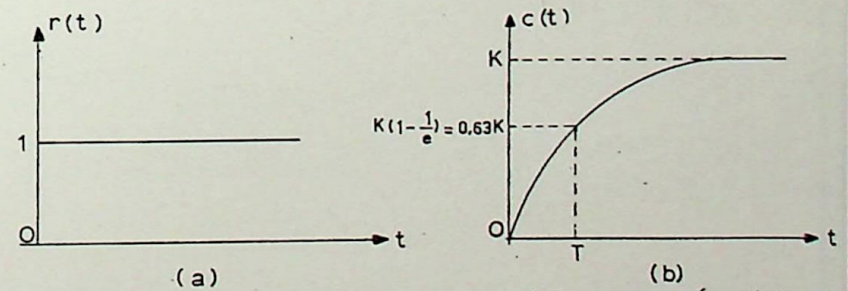


Fig. A.11 - Curvas no Tempo da entrada (a) e da saída (b) do sistema da fig. A.10

Portanto, para esse sistema, o sinal de saída só atinge o valor desejado K após decorrido um certo tempo, como se

vê na figura A.11(b), que e a representação gráfica da equação A.25. O exame desta equação torna evidente que a maior ou menor rapidez com que o sinal de saída atinge o valor desejado c(t) = K depende diretamente do valor de T, que deve ter a dimensão de tempo, para que o expoente (t/T) seja adimensional. Sendo T um valor característico do sistema, é por isso denominado CONSTANTE DE TEMPO do sistema.

A presença das Constantes de Tempo num sistema indica então um atraso do sinal de saída em relação ao sinal de entrada. Quase todos as partes de um sistema qualquer são caracterizadas por uma ou mais constantes de tempo e um fator de amplificação K, que é chamado de GANHO do sistema. A cada constante de tempo de um sistema corresponde um fator do tipo (Ts + 1) na função de transferência; a quase totalidade dos sistemas lineares são representados por Diagramas de Blocos nos quais as funções de transferência são do tipo mostrado na fig. A.10.

A P Ê N D I C E B

SUBSÍDIOS DE COMPUTAÇÃO ANALÓGICA

APÊNDICE B

SUBSÍDIOS DE COMPUTAÇÃO ANALÓGICA

B.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo iremos apresentar os tópicos de Computação Analógica nos quais é baseada a simulação dos reguladores de tensão e velocidade.

Os elementos existentes num Computador Analógico se dividem em elementos PASSIVOS e ATIVOS. Um elemento ativo se caracteriza por apresentar em seu circuito um amplificador operacional de alto ganho ($\pm 10^5$); os elementos ativos geralmente realizam a operação que lhes é peculiar com inversão do sinal de entrada. O elemento passivo não apresenta amplificadores operacionais no seu circuito e não inverte o sinal de entrada.

Dos elementos que serão apresentados a seguir, os integradores, os somadores e os inversores são ativos; os multiplicadores constantes são passivos.

B.2 - ELEMENTOS DO COMPUTADOR ANALÓGICO

B.2.1 - SOMADORES: São os elementos dos computadores que são análogos à operação matemática de soma. São representados pelo símbolo seguinte.

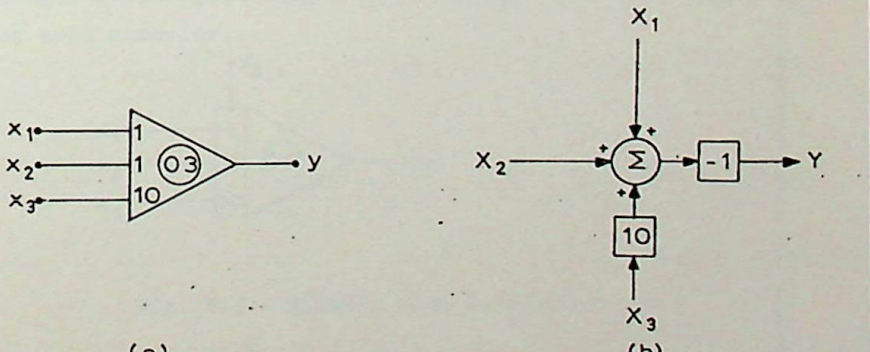


Fig. B.1 - Somador no Computador Analógico: a) Símbolo para Programação; b) Diagrama de Blocos

onde:

$$y = -(x_1 + x_2 + 10x_3) \qquad (B.1)$$

O somador normalmente tem várias entradas e as variáveis conectadas a estas entradas são previamente multiplicadas por constantes (indicadas no símbolo) antes de somadas. O número (03) mostrado na fig. B.1 é o número do somador em um programa.

Existe um tipo específico de somador, que possui somente uma entrada com multiplicador 1, que é denominado INVERSOR

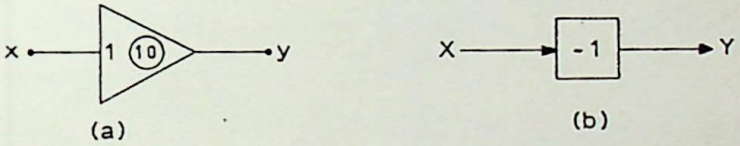


Fig. B.2 - Inversor no Computador Analógico: a) Símbolo para Programação; b) Diagrama de Bloco

$$y = -x \qquad (B.2)$$

B.2.2 - INTEGRADORES: São os elementos dos Computadores que são análogos à operação matemática de integração. São representados pelo símbolo:

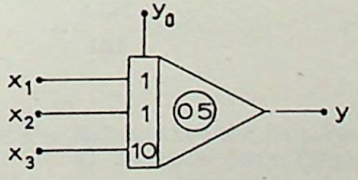


Fig. B.3 - Símbolo para integrador

$$y = -\left[\, y_o + \int_0^t (x_1 + x_2 + 10x_3)\,dt \,\right] \qquad (B.3)$$

Vê-se que também o integrador executa a multiplicação das várias entradas por valores fixos, fazendo depois a soma' antes da integração propriamente dita. Há ainda a possibilidade de se adicionar uma condição inicial à integração, cujo ' terminal de entrada é identificado nos computadores analógicos pela letra A.

O diagrama de blocos de um integrador como o da figura B.3, para condição inicial nula, é:

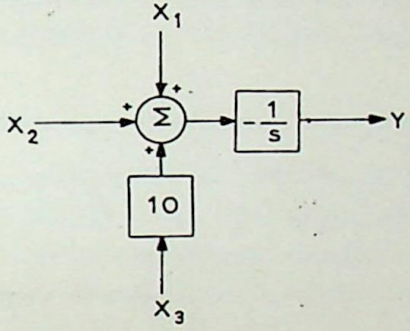


Fig. B.4 - Diagrama de Blocos do Integrador

B.2.3 - MULTIPLICADORES CONSTANTES: são os elementos dos computadores que são análogos à operação matemática de multiplicação por uma constante. São representados pelo símbolo seguinte:

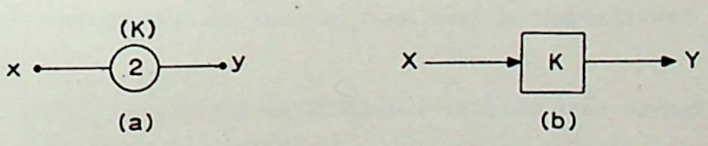


Fig. B.5 - Multiplicador Constante no Computador Analógico:
a) Símbolo para Programação; b) Diagrama de Bloco

NOTA IMPORTANTE: Este elemento NÃO inverte o sinal de entrada. O Valor K é ajustável entre 0 e 1.

B.2.4 - REFERÊNCIAS: São elementos análogos às constantes matemáticas. Como se sabe, os Computadores Analógicos atuais ' são simuladores eletrônicos, sendo as variáveis do problema '

representadas por tensões elétricas, no computador.

Os circuitos dos Computadores Analógicos tem limites de tensão que não devem ser ultrapassados sob pena de perda de precisão e mesmo de significado da solução. Estes máximos, normalmente entre $\pm$ 10 e $\pm$ 100 volts nos computadores atuais, são denominados "Unidade de Máquina" (U.M.).

Há então, nos painéis de programação dos Computadores Analógicos, tomadas disponíveis correspondentes a +U.M., a -U.M. e a "0" (zero).

B.3 - CONTROLE E MEDIDA DOS COMPUTADORES ANALÓGICOS

Normalmente, os computadores Analógicos possuem um painel de controle e medição com, pelo menos, as funções que listamos a seguir, e descrevemos quando necessário. Maiores detalhes, se desejados, deverão ser procurados nas Bibliografias 5 e 6.

B.3.1 - AJUSTE DO VALOR DOS MULTIPLICADORES CONSTANTES: é feito através do giro de botões existentes em um painel próprio. A cada multiplicador corresponde um botão.

B.3.2 - AJUSTE DO TEMPO DE CÁLCULO: controlará o tempo decorrido desde o início do cálculo até o seu término, quando se opera nas modalidades de cálculo "uma vez" e "Repetitivo" (vide B.3.4).

B.3.3 - BOTÕES DE COMANDO DE OPERAÇÃO: existem três desses botões, e que são os seguintes:

a) BOTÃO PAUSA ou CONDIÇÕES INICIAIS: é o botão de repouso do Computador Analógico. Nesta posição é que se pode programar o computador ou alterar os programas já feitos.

b) BOTÃO CALCULE: é o botão que leva o computador a calcular. Os integradores passam a integrar e a simulação está em marcha nesta posição.

c) BOTÃO SUSTENTE: É um botão que permite ao operador do Computador interromper um cálculo em execução a qualquer instante, sem, entretanto, perder o estado do cálculo naquele instante. Quando se opera este botão, os integradores param de integrar, mantendo nas saídas os valores que lá estavam no instante escolhido. Apertando-se depois o botão CALCULE, o cálculo continua a partir do ponto em que parou. O botão SUSTENTE pode ser operado quantas vezes se queira, durante um cálculo.

d) BOTÃO SUSTENTE AO PARAR: É um botão utilizado quando se opera nas modalidades "uma vez" e "Repetitivo", isto é, com um tempo de cálculo indefinido. Quando se opera este botão durante um cálculo, o Computador realiza esse cálculo normalmente até o final do tempo ajustado, quando os integradores param de integrar, e mantém nas saídas os valores que lá estavam no final do tempo de cálculo.

B.3.4 - MODOS DE CÁLCULO: podem ser três:

a) CONTÍNUO: É o modo de cálculo no qual o computador calcula até que o operador aperte ou o botão PAUSA ou o SUSTENTE.

b) UMA VEZ: É o modo de cálculo no qual o Computador calculará durante o tempo que tiver selecionado no ajuste do tempo de cálculo, e, ao final dele, passará automaticamente a pausa.

c) REPETITIVO: É o modo de cálculo no qual o computador operará ciclicamente de PAUSA para CALCULE para SUSTENTE, para PAUSA, etc... até que o operador aperte, ou o botão PAUSA ou o SUSTENTE AO PARAR.

B.3.5 - LEITURA DOS RESULTADOS: Nos Computadores Analógicos, as variáveis dependentes do sistema simulado são as tensões de saída dos elementos do sistema análogo, e que podem ser lidas nos equipamentos comuns de leitura de tensões, como Vol

tímetros e osciloscópios de corrente contínua, e Traçadores de Gráficos XY. A variável independente é sempre o tempo.

B.4 - SIMULAÇÃO

B.4.1 - PRELIMINARES: Já dissemos que a simulação em Computadores Analógicos consiste em montar o análogo de um sistema qualquer no computador, partindo diretamente do Diagrama de Blocos desse sistema.

Existem duas técnicas de simulação. Uma é considerando os elementos de cálculo básicos do Computador Analógico (somadores, integradores, etc...), e programando-se a sub-rotina a partir deles. A outra parte do amplificador operacional e de componentes convenientes (resistências, capacitores, etc...). Dessas duas técnicas, a primeira é muito mais utilizada, por ser muito mais flexível que a segunda. Esta, embora mais econômica, apresenta vários inconvenientes, tais como o de exigir componentes de circuito não usuais e inexistentes no computador, de apresentar dificuldade na variação dos parâmetros, de não permitir o uso do comando central dos computadores que os tem, etc... Por esta razão, descreveremos aqui somente a primeira técnica, que será utilizada no texto deste trabalho.

B.4.2 - DESCRIÇÃO DA TÉCNICA USUAL: Basicamente consiste em obter a equação diferencial que rege o comportamento do sistema a partir da sua função de transferência. Quando se considera que as condições iniciais são nulas, pode-se substituir o operador de Laplace s por d/dt e as variáveis transformadas pelas variáveis primitivas funções do tempo.

Faremos a seguir um exemplo de desenvolvimento de uma sub-rotina para um tipo de bloco, e logo após apresentaremos uma tabela com as sub-rotinas para os demais tipos de blocos que aparecem no texto.

EXEMPLO B.1 - SUB-ROTINA CORRESPONDENTE AO BLOCO $\boxed{\frac{K}{Ts + 1}}$

Denominando a variável de entrada r(t), e a variável de saída c(t), e sendo R(s) e C(s), respectivamente, as suas transformadas devemos ter o bloco em estudo funcionando como mostra a fig. B.6.

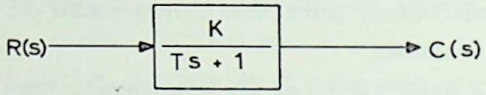


Fig. B.6 - Bloco em Estudo

vemos então que

$$C(s) = \frac{K}{Ts + 1} R(s) \qquad (B.4)$$

ou

$$(Ts + 1)C = KR \qquad (B.5)$$

ou ainda,

$$TsC + C = KR \qquad (B.6)$$

Se as condições iniciais são nulas, podemos escrever:

$$T \frac{dc}{dt} + c = Kr \qquad (B.7)$$

donde,

$$\frac{dc}{dt} + \frac{1}{T} c = \frac{K}{T} r \qquad (B.8)$$

Colocando B.8 na forma conveniente vem:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{K}{T} r(t) - \frac{1}{T} c(t) \qquad (B.9)$$

A equação B.9 tem o seguinte diagrama de solução:

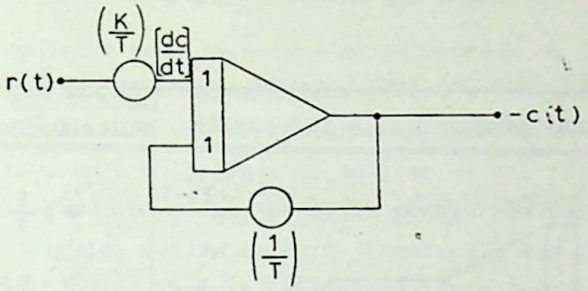


Fig. B.7 - Diagrama de Solução da Eq. B.9

O Diagrama de solução da fig. B.7 atua então, entre a entrada r(t) e a saída c(t) como um bloco da fig. B.6, com a ressalva de que a saída é fornecida com sinal invertido.

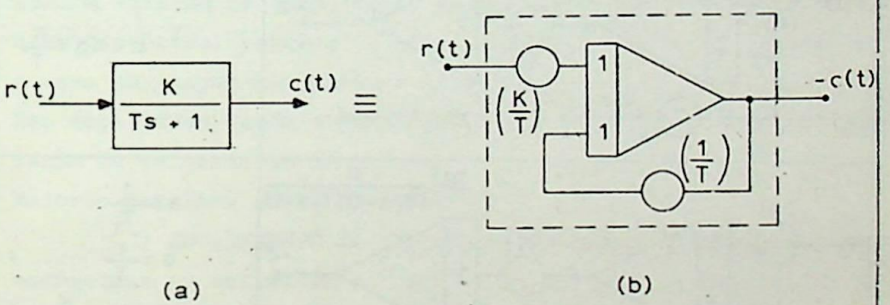
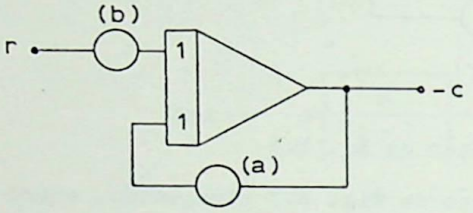
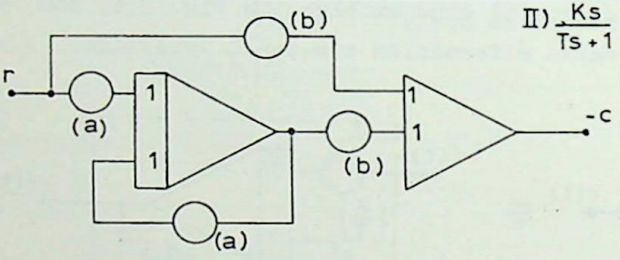
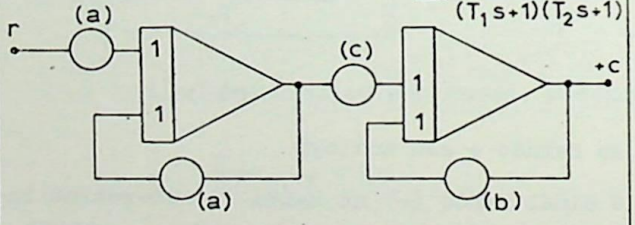
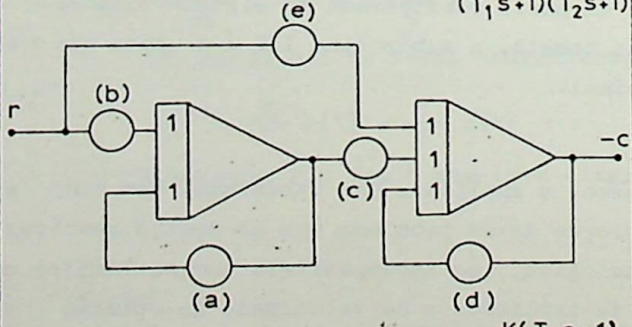


Fig. B.9 - Bloco em Estudo e seu Análogo

NOTA IMPORTANTE: O sinal menos (-) na saída da sub-rotina indica que a saída no análogo montado no Computador tem sinal contrário a saída da parte considerada do sistema simulado. Observe-se que, na tabela, a sub-rotina III é a única que não faz inversão de sinal.

B.5 - ESCALAMENTO:

Muitas vezes, a amplitude das variáveis, bem como as velocidades de solução de um problema que se deseja resolver por computação Analógica, são incompatíveis com os limites máximos ou mínimos de amplitude e de velocidade de solução do Computador. Se esses limites forem ultrapassados, a solução

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA G(s) E SUB-ROTINA	AJUSTE DOS MULTIPLICADORES CONSTAN.
I) $\frac{K}{Ts+1}$ 	$a = \frac{1}{T}$ $b = Ka = \frac{K}{T}$
II) $\frac{Ks}{Ts+1}$ 	$a = \frac{1}{T}$ $b = Ka = \frac{K}{T}$
III) $\frac{K}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$ 	$a = \frac{1}{T_1}$ $b = \frac{1}{T_2}$ $c = Kb = \frac{K}{T_2}$
IV) $\frac{Ks}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$ 	$a = \frac{1}{T_1}$; $b = \frac{K}{T_1^2}$ $c = d = \frac{1}{T_2}$ $e = Kab = \frac{K}{T_1 T_2}$
V) $\frac{K(T_2 s+1)}{(T_1 s+1)(T_3 s+1)}$	$a = \frac{1}{T_1}$ $b = e = KT_2$ $ac = \frac{KT_2}{T_1 T_3}$ $c = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}$ $d = \frac{1}{T_3}$

pelo computador pode se tornar antieconômica ou levar a resultados errados. No computador Analógico, a amplitude de qualquer variável deve manter-se entre os limites de $\pm$ U.M. Por outro lado, se a velocidade de solução de uma variável for muito alta, o equipamento de saída poderá não fornecer o resultado correto, devido ao erro decorrente das constantes de tempo, isto é, da inércia, características desses equipamentos; se a velocidade de solução for muito baixa, levando a um tempo excessivo de utilização do computador, a solução torna-se antieconômica.

Sente-se então a necessidade de adaptar os valores das amplitudes e velocidades de solução do problema em estudo para a solução no computador, de modo que ele trabalhe tanto quanto possível próximo de suas condições ideais de operação; a essa adaptação denominamos ESCALAMENTO. Para a adaptação das amplitudes temos o ESCALAMENTO DE AMPLITUDE, e para a adaptação de velocidades de solução temos o ESCALAMENTO DE TEMPO. Maiores detalhes sobre escalamento na Bibliografia 5.

I) ESCALAMENTO DE AMPLITUDE: Para ser feito, devem ser conhecidas ou estimadas as amplitudes máximas das variáveis do problema. Basicamente, consiste em não permitir que nenhuma das variáveis de saída de elementos ativos tenham valores tais que, ou ultrapassem a amplitude máxima permitida ($\pm$U.M.), ou sejam tão pequenos que os equipamentos de saída não consigam registrar o resultado.

Para ilustrar o problema do escalamento de amplitude, consideremos o caso de um integrador como o da fig. B.10, de entrada x qualquer e cuja saída deveria ser y; verificou-se entretanto que a variável y apresenta um valor máximo y_{max} muito inconveniente para o computador. Este problema é resolvido dividindo-se a entrada x pelo valor y_{max}, o que nos assegura ter um valor máximo de saída compatível com os máximos permitidos no computador, e a utilização total da faixa de variação da saída dos elementos, o que proporciona a obtenção

de resultados mais precisos. A fig. B.11 ilustra o problema do escalamento de amplitude.

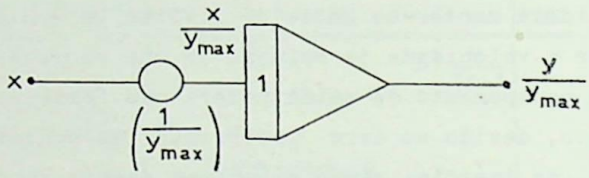
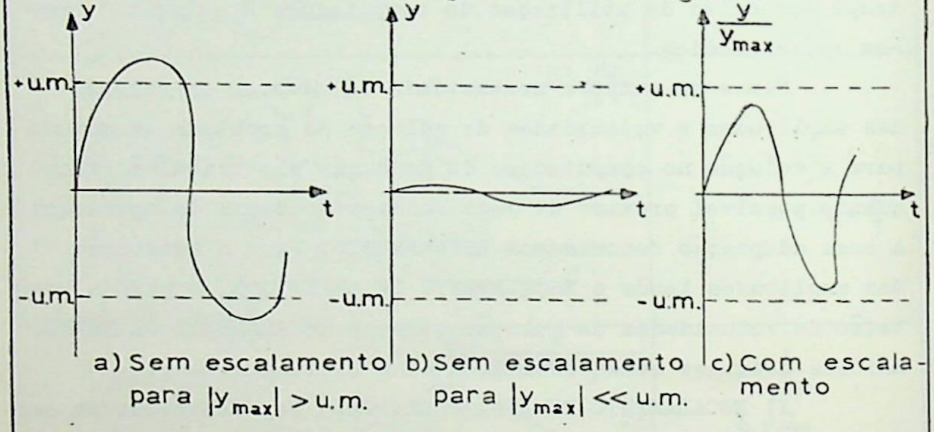


Fig. B.10 - Escalamento de amplitude num integrador



a) Sem escalamento para $|y_{max}| > u.m.$ b) Sem escalamento para $|y_{max}| << u.m.$ c) Com escalamento

Fig. B.11 - Resultados obtidos sem e com escalamento

II) ESCALAMENTO DE TEMPO: consiste em aumentar ou diminuir a velocidade de solução, de modo que a solução dada pelo computador seja dada numa velocidade boa para a saída dos resultados.

O escalamento de tempo é feito através da seguinte mudança de variável:

$$t_c = at \qquad (B.10)$$

onde,

t = tempo no sistema real

a = fator de escalamento

t_c = tempo no computador

Se $0 < a < 1$ a solução será acelerada.

Se $a > 1$ a solução será retardada.

Então, a variável independente no computador Analógico será o tempo t_c, isto implica em substituir t por t_c/a em todas as funções de tempo envolvidas no problema.

Consideremos um sistema no qual a entrada é r(t) e a saída é c(t)

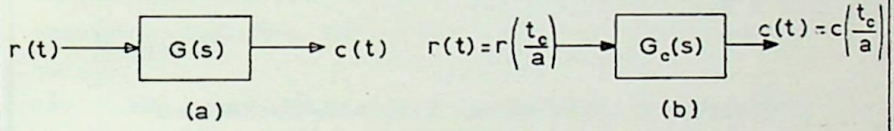


Fig. B.12 - Simulação com Escalamento de Tempo:
a) Sistema Real; b) Sistema Análogo.

A transformada de Laplace em relação à variável independente do computador, o tempo t_c, é dada pela eq. B.14

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t_c)e^{-st_c}dt_c = \mathcal{L}\left[f(t_c)\right] \qquad (B.14)$$

A equação de comportamento do sistema real, na forma operacional, é dada pela eq. B.15, e a do sistema simulado por B.16

$$C(s) = G(s)R(s) \qquad (B.15)$$

$$C_c(s) = G_c(s)R_c(s) \qquad (B.16)$$

NOTA: Toda variável afetada pelo índice c representa uma variável do computador.

Quando a simulaçao de um problema não requer escalamento, então $t_c = t$ e $G(s) = G_c(s)$. Entretanto, havendo necessidade de escalamento, as equações do sistema real tem a variável t substituída por t_c/a. Pelo teorema da mudança de variável, a eq. B.15, que representa o sistema real, fica:

$$a\,C(as) = aG(as)R(as)$$

donde,

$$\frac{a\ C(as)}{a\ R(as)} = G(as) \qquad (B.17)$$

Porém, de B.14 e do referido teorema temos que

$$a\ C(as) = \mathcal{L}\left[C(t_c/a)\right] = C_c(s) \qquad (B.18)$$

$$a\ R(as) = \mathcal{L}\left[r(t_c/a)\right] = R_c(s)$$

Dividindo as eq. B.18 membro a membro e comparando com B.16 e B.17 concluímos que

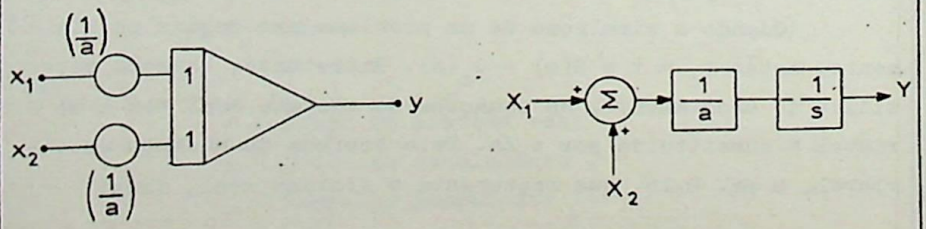
$$G_c(s) = G(as) \qquad (B,19)$$

Observando então as eq. B.10 e B.19, vemos que são duas as etapas a serem seguidas para se efetuar um escalamento de tempo:

I) substituir t por t_c/a em todas as funções de tempo envolvidas no problema.

II) multiplicar por 1/a todas as variáveis de entrada dos integradores.

Esta segunda etapa se prende ao fato do integrador ser o único elemento de um computador Analógico que apresenta em sua função de transferência a variável complexa s. A eq.B. 19 manda que a variável s seja mudada para as, quando a função de transferência do sistema real é implementada no computador. Vimos que a função de transferência do integrador é 1/s, devendo então ser substituída por 1/as, o que é feito multiplicando-se as entradas dos integradores por 1/a, conforme ilustra a fig. B.13



(a) (b)

Fig. B.13 - Escalamento de Tempo no Integrador: a) Integrador b) Diagrama de Blocos.

B.6 - FUNÇÃO LIMITAÇÃO (OU SATURAÇÃO)

É muito comum encontrar-se num sistema uma parte na qual a saída, por razões de construção, se mantém dentro de uma faixa de valores limitada por um máximo e um mínimo. Essa situação é representada pela FUNÇÃO LIMITAÇÃO (OU SATURAÇÃO), onde x é o valor que a variável em questão teria, e y é o valor que realmente ela tem, em razão da limitação de sua faixa de variação. Usaremos o nome FUNÇÃO LIMITAÇÃO a fim de evitar possíveis confusões com a função saturação das máquinas elétricas.

Graficamente, a função limitação tem a forma apresentada na fig. B.14

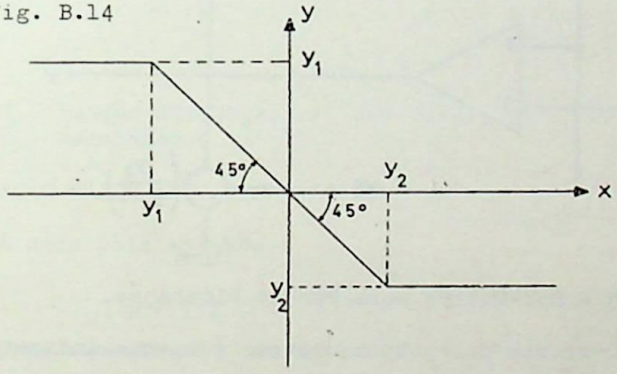


Fig. B.14 - Função Limitação

Vê-se então que a função limitação, analiticamente, é dada pelas expressões B.20

$$\begin{aligned} &\text{para } x < -y_1 && y = y_1 \\ &\text{para } -y_1 < x < y_2 && y = -x \\ &\text{para } x > y_2 && y = -y_2 \end{aligned} \qquad \text{(B.20)}$$

No Computador analógico, a função limitação é implementada lançando-se mão de três elementos ainda não citados neste apêndice, e que são:

I) Entrada s do somador: a entrada s do somador é uma entrada especial, que se caracteriza por estar ligada diretamente a entrada do amplificador operacional (vide Bibliogra -

fia 6).

II) Diodos

III) Potenciômetros especiais: são os potenciômetros não aterrados, e que por isso tem três terminais.

OBS.: Até aqui a denominação de potenciômetros não foi utilizada. No Computador Analógico os potenciômetros nada mais são do que os multiplicadores constantes.

A sub-rotina normal usada para implementação da função limitação no Computador Analógico é apresentada na fig. B.15.

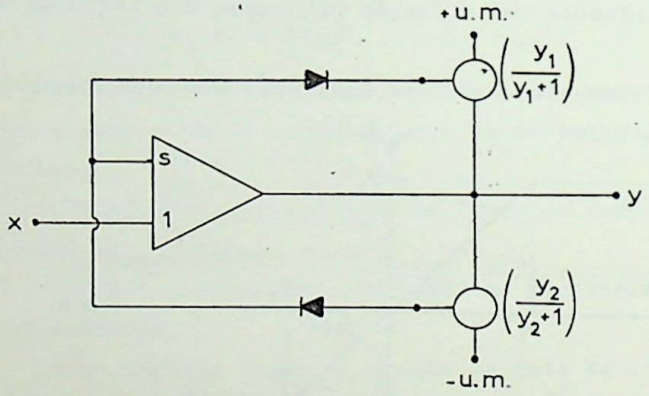


Fig. B.15 - Sub-Rotina para Função Limitação.

O ajuste dos potenciômetros é apenas indicativo, e sempre que se deseja maior precisão deve-se fazer o ajuste observando-se o resultado num osciloscópio.

Caso seja necessário, uma sub-rotina de precisão, mais sofisticada, pode ser encontrada na Ref. 6, pg. 152.

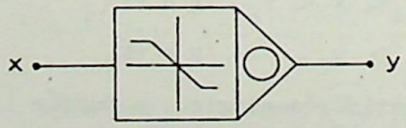


Fig. B.16 - Representação da Sub-Rotina para Função Limitação

AJUSTE DA FUNÇÃO LIMITAÇÃO CUJA VARIÁVEL DE ENTRADA É AFETADA POR ESCALAMENTO: quando, em um sistema a ser simulado

e no qual aparece a função limitação, a variável a ser limitada precisou de ser escalada, os valores máximo e mínimo da função limitação devem ser ajustados em função do valor máximo que foi adotado para o escalamento da variável a ser limitada. Esta providência é necessária para que o sistema simulado se comporte de forma idêntica ao sistema real.

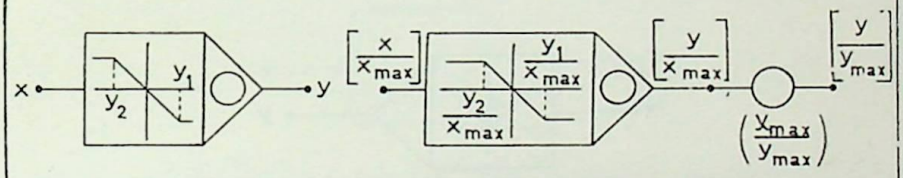


Fig. B.17 - Função Limitação: a) Sem escalamento; b) com escalamento.

B.7 - FUNÇÃO VALOR ABSOLUTO

É dada pela equação

$$y = | x | \qquad (B.21)$$

Graficamente, tem a forma apresentada na fig.B.18.

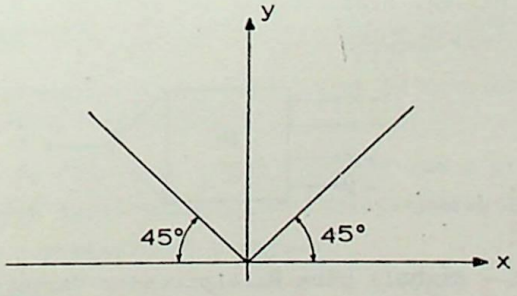


Fig . B.18 - Função Valor Absoluto

A sub-rotina normal é apresentada na fig. B.19.

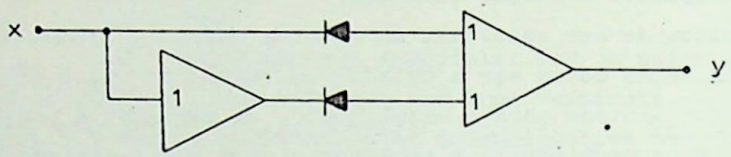


Fig. B.19 - Sub-Rotina para Função Valor Absoluto

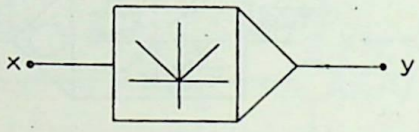


Fig. B.20 - Representação da Sub-Rotina para a Função Valor Absoluto

B.8 - MULTIPLICADORES VARIÁVEIS

São elementos não lineares do computador analógico, e que são análogos à operação matemática de multiplicação de uma variável por outra variável. É representado pelo símbolo' mostrado na fig. B.21

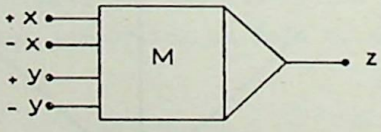


Fig. B.21 - Símbolo para Multiplicador Variável

A equação matemática é:

$$z = x.y \qquad (B.22)$$

Nota-se que, para o produto de duas variáveis x e y ' ser obtido no computador analógico, é necessário ter disponí-

veis os sinais correspondentes a +x, -x, +y e -y.

B.9 - GERADORES DE FUNÇÕES AJUSTÁVEIS

São elementos do computador nos quais se pode, mediante o ajuste de vários botões ou parafusos, gerar funções arbitrárias desejadas que sejam conhecidas em forma gráfica. São representados pelo Símbolo mostrado na fig. B.22.

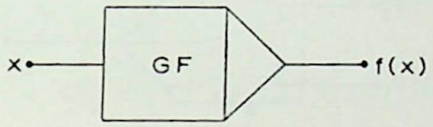


Fig. B.22 - Símbolo para Gerador de Funções Ajustáveis.

A representação das funções a gerar é feita por segmentos de reta, cujos inícios e fins são ajustados por botões ou parafusos, como é ilustrado pela fig. B.23.

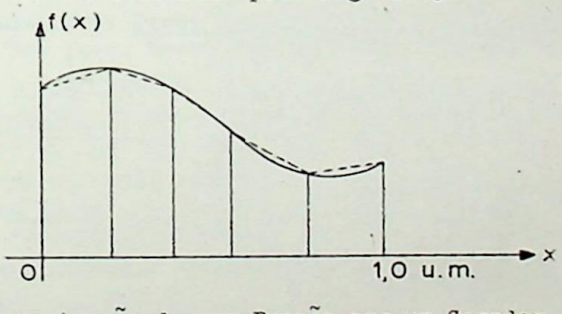


Fig. B.23 - Aproximação de uma Função por um Gerador de Funções Ajustáveis

O exame da fig. B.23 torna evidente que a precisão de representação será tanto maior quanto for o número de segmentos de reta que representarão a função.

B.10 - COMPARADORES

São elementos que permitem a comparação entre duas variáveis, usando o resultado da comparação para acionar uma chave de duas posições. Sua representação é dada na Fig. B.24, e sua equação é:

$$\left\{\begin{array}{l}\text{Se } x_1 + x_2 < 0\text{, a chave está na posição 0} \therefore z = y_1 \\ \text{Se } x_1 + x_2 > 0\text{, a chave está na posição 1} \therefore z = y_2\end{array}\right\} \qquad (B.23)$$

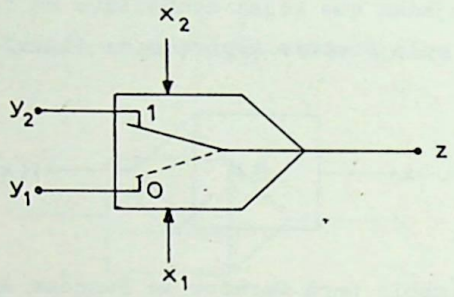


Fig. B.24 - Representação dos Comparadores.

B I B L I O G R A F I A

1) STEVENSON, Jr., W.D. Elements of Power System Analysis. New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1962. 388 p.

2) ROBBINS, L.W. & ROTHE, F.S. G-E Network Analyzers Manual. Schnectady, N.Y., General Electric Company, 1950, 106 p.

3) CRARY, Selden B. Power System Stability. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1955. 2 V.

4) THALER, George J. & BROWN, Robert G. Analysis and Design of Feedback Control Systems. New York, Mc-Graw-Hill Company, Inc., 1960. 648 p.

5) SANTOS, José Abel R. Computadores Analógicos - Programação Básica. Itajubá, MG, Secção de Publicaçoes da EFEI , 1970. 195 p.

6) SANTOS, José Abel R. Computadores Analógicos - Programação Avançada. Itajubá, MG, Secção de Publicaçoes da EFEI, 1970, 271 p.

7) IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. Computer Representation of Excitation Systems. New York, IEEE, V. PAS 87, n.6, June 1968, p. 1460/64

8) KIMBARK, Edward W. Power System Stability: Synchronous Machines. New York, Dover Publications, Inc., 1968. 322p.

9) THE BROWN BOVERI REVIEW. Methods of Investigating Electricity Networks. Baden, Suíça, Brown, Boveri & Company , Limited, v. 48, n. 5/6, May/June 1961, p. 313-20.

10) WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. Westinghouse Excitation System Constants for Use in System Studies. East Pittsburgh, Pennsylvania, Report n. 67-636, Aug.25, 1967.

11) WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. Stability Program - Data Preparation Manual. East Pittsburgh, Pennsylvania , Report n. 68-661, Jan.15, 1968.