

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO
COMPUTACIONAL PARA ESTUDOS DE ALÍVIO DE
CARGA POR SUBFREQUÊNCIA

ALYSSON LUIDDI SANT'ANA QUINTANILHA
SALEM GOMES LEITE

ORIENTADOR: MAURO MOURA SEVERINO

BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2005

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO
COMPUTACIONAL PARA ESTUDOS DE ALÍVIO
DE CARGA POR SUBFREQUÊNCIA.**

**ALYSSON LUIDDI SANT'ANA QUINTANILHA
SALEM GOMES LEITE**

**PROJETO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO ELETRICISTA.**

APROVADA POR:

**Prof. Mauro Moura Severino, (ENE-UnB)
(Orientador)**

Prof. Francisco Damasceno Freitas, (ENE-UnB)

Ricardo Marcelo Teixeira (Eletronorte)

BRASÍLIA/DF, JULHO - 2005

FICHA CATALOGRÁFICA

QUINTANILHA, ALYSSON LUIDDI SANT'ANA

GOMES LEITE, SALEM

Desenvolvimento de Aplicativo Computacional para Estudos de Alívio de Carga por Subfrequência. [Distrito Federal] 2005.

Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

QUINTANILHA, ALYSSON L. S. e LEITE, SALEM G. (2005). Desenvolvimento de Aplicativo Computacional para Estudos de Alívio de Carga por Subfrequência. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Alysson Luidi Sant'Ana Quintanilha e Salem Gomes Leite

TÍTULO: Desenvolvimento de Aplicativo Computacional para Estudos de Alívio de Carga por Subfrequência.

GRADUAÇÃO ANO: 2005

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Aos autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Alysson Luidi Sant'Ana Quintanilha
SQS 403 Bl J apt.: 306
Cep 70237 - DF - Brasil

Salem Gomes Leite
CLN 404 Bl. D apt.: 209
Cep 70845-540 - DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

A Deus, “Porque o Senhor dá a sabedoria, e da sua boca vem a inteligência e o entendimento”.

Aos parentes, em especial aos pais, que nos forneceram oportunidades, incentivos e educação para alcançarmos nossos objetivos.

Aos amigos, que nos ajudaram, nos divertiram e nos aconselharam.

Aos colegas de trabalho na Eletronorte, que nos deram apoio e, com as suas experiências, nos orientaram.

Aos professores, que nos ensinaram e desafiaram.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um programa computacional que simule o comportamento da frequência do sistema elétrico quando da perda de uma parte significativa da geração, com conseqüente desligamento coordenado de cargas.

Foi feito um estudo de um método iterativo para o cálculo da curva frequência *versus* tempo, que foi usada na implementação do programa.

O programa foi feito na linguagem Delphi, por ser um *software* que possibilita o desenvolvimento de aplicativos com interface gráfica. Assim sendo, fornece um ambiente amigável e de fácil utilização para o usuário.

O resultado do programa é comparado com o de outros aplicativos semelhantes, mostrando resultados satisfatórios, de acordo com o objetivo proposto para sua elaboração.

Pode-se concluir que o programa se torna mais útil em circunstâncias em que a geração não tem reserva girante, ou seja, em que os reguladores de velocidade e de tensão não influenciarão na recuperação da frequência para o seu valor de operação. Logo, ele será utilizado para simulação do “pior caso”. Com isso, fornece dados para aperfeiçoamento em programas mais elaborados, em que mais dados são considerados.

SUMÁRIO

1 - Introdução	1
DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO.....	II
COMPUTACIONAL PARA ESTUDOS DE ALÍVIO.....	II
DE CARGA POR SUBFREQUÊNCIA.....	II
Alysson Luidi Sant'Ana Quintanilha.....	ii
BRASÍLIA/DF, Julho - 2005.....	ii
Quintanilha, Alysson Luidi Sant'Ana.....	iii
Gomes Leite, Salem.....	iii
Quintanilha, Alysson L. S. e Leite, Salem G. (2005). Desenvolvimento de Aplicativo Computacional para Estudos de Alívio de Carga por Subfrequência. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.....	iii
CESSÃO DE DIREITOS.....	iii
AUTORES: Alysson Luidi Sant'Ana Quintanilha e Salem Gomes leite.....	iii
SQS 403 Bl J apt.: 306 CLN 404 Bl. D apt.: 209.....	iii
3.2.1. Modelo de carga	9
4.3.1. Dados de entrada do programa em relação ao sistema.....	17
OS RESULTADOS OBTIDOS ESTÃO RESUMIDOS NA	
TABELA ABAIXO.	33
ANALISANDO-SE OS RESULTADOS, NOTA-SE, EM	
TODAS AS SIMULAÇÕES, QUE MAIS GRUPOS FORAM	
DESLIGADOS NO PROGRAMA PROPOSTO EM RELAÇÃO	
AO FORNECIDO PELO ANATEM. ISTO SE DEVE,	
PRINCIPALMENTE, PELO FATO DE O ANATEM LEVAR	
EM CONSIDERAÇÃO NOS SEUS CÁLCULOS OS	
MODELOS DOS REGULADORES.....	34

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....35

POR MEIO DAS SIMULAÇÕES FEITAS NOS EXEMPLOS DO CAPÍTULO 5, NOTA-SE QUE OS DADOS DO PROGRAMA DESENVOLVIDO NESTE PROJETO SÃO COMPATÍVEIS COM OS ESPERADOS TEORICAMENTE.

35

EXISTE O DECRÉSCIMO DA FREQUÊNCIA, QUANDO DA PERDA DE GERAÇÃO, E ESSA QUEDA É ATENUADA QUANDO HÁ DESLIGAMENTO DE BLOCOS DE CARGA.

35

OS EXEMPLOS APRESENTADOS, TAMBÉM, MOSTRAM QUE OS RESULTADOS SÃO COMPATÍVEIS COM OS INFORMADOS NOS PROGRAMAS QUE FORNECERAM OS DADOS PARA A COMPARAÇÃO.35

COMO O PROGRAMA DESENVOLVIDO NÃO LEVA EM CONSIDERAÇÃO OS MODELOS DOS REGULADORES DAS MÁQUINAS, SEUS DADOS SERÃO MAIS PRECISOS QUANDO O SISTEMA ESTÁ SEM RESERVA GIRANTE....35

PODE-SE AFIRMAR QUE ESTE PROGRAMA SERÁ UMA FERRAMENTA ÚTIL NA ELABORAÇÃO DE ERACS, UMA VEZ QUE FORNECERÁ OS DADOS INICIAIS OU O “PIOR

**CASO” PARA A ANÁLISE E PARA OS AJUSTES
POSTERIORES EM PROGRAMAS MAIS ELABORADOS..35**

**É PROPOSTA, PARA TRABALHOS FUTUROS, A
IMPLEMENTAÇÃO, NO CÓDIGO DO PROGRAMA, DE
MÉTODOS QUE PERMITAM A ENTRADA DOS MODELOS
DOS REGULADORES DAS MÁQUINAS. ISSO
AUMENTARIA SUA EFICIÊNCIA E UTILIDADE.
ENTRETANTO, COMO JÁ EXISTEM PROGRAMAS COMO
O ANATEM, QUE JÁ TRABALHA COM MODELOS DE
REGULADORES E ESTES SÃO CONSIDERAVELMENTE
COMPLEXOS, PODE SER INTERESSANTE QUE O
PROGRAMA DESENVOLVIDO NESTE PROJETO NÃO
USE TAIS MODELOS, VISTO QUE DIMINUIRÁ O
ESFORÇO APLICADO EM SIMULAÇÕES MAIS
PRECISAS, A FIM DE SE OBTER OS AJUSTES
NECESSÁRIOS PARA CASOS MAIS PESSIMISTAS, NA
IMPLEMENTAÇÃO DE UM ERAC, SENDO DE MAIOR
UTILIDADE COMO UMA FERRAMENTA AUXILIAR
PARA PROGRAMAS MAIS ELABORADOS.....35**

**MELHORIAS NA PARTE DE VISUALIZAÇÃO E
IMPLEMENTAÇÃO DOS RESULTADOS PODERÃO SER
FEITAS, À MEDIDA QUE SE DESENVOLVEM MAIS
COMPONENTES PARA A LINGUAGEM DE**

PROGRAMAÇÃO DELPHI, QUE É A LINGUAGEM UTILIZADA NA ELABORAÇÃO DESTE PROGRAMA.....	35
REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
ANEXOS.....	37
ANEXO I – ALGORITMO DO PROGRAMA.....	38
PROGRAMA: CALCSUB.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Operação em regime de frequência não nominal.....	20
Tabela 5.1 – Dados de entrada para o exemplo proposto para comparação com o programa Varf-5.....	24
Tabela 5.2 – Dados de ajuste dos relés para o exemplo proposto para comparação com o programa Varf-5.....	25
Tabela 5.3 – Resumo dos resultados obtidos da simulação no programa Varf-5.....	26
Tabela 5.4 – Resumo dos resultados obtidos da simulação no programa proposto.....	26
Tabela 5.5 – Dados das máquinas da Usina Termoelétrica Santana.....	29
Tabela 5.6 – Dados das máquinas da Usina Hidroelétrica Coaracy Nunes.....	29
Tabela 5.7 – Dados de entrada de geração para o exemplo 2.....	30
Tabela 5.8 – Configuração de desligamento de carga do ERAC do Sistema Amapá.....	31
Tabela 5.9 – Tempo total para abertura dos disjuntores.....	31
Tabela 5.10 – Perdas de geração que serão simuladas.....	32
Tabela 5.12 – Dados de entrada.....	32
Tabela 5.13 – Resultados obtidos no programa proposto.....	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perda de geração de 5% (curva A) e de 40% (curva B).....	3
Figura 2.2 - Sistema sem rejeição de carga (curva A) e com rejeição de 23% da carga (curva B) para uma perda de 40% da geração total.....	4
Figura 4.1 - Fluxograma do programa.....	16
Figura 4.2 - Tela de entrada de dados (tempo).....	17
Figura 4.3 - Tela de entrada de dados (geração).....	18
Figura 4.4 - Tela de entrada de dados (carga).....	19
Figura 4.5 - Tela de entrada de dados (frequência).....	19
Figura 4.6 - Tela de entrada de dados ajuste dos grupos de rejeição.....	21
Figura 4.7 - Tela de saída de dados.....	22
Figura 5.1 - Gráfico de comparação Varf com o programa proposto.....	27
Figura 5.2 - Mapa do Amapá com a representação do sistema elétrico.....	28
Figura 5.3 - Diagrama unifilar do sistema elétrico do Amapá.....	30

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica

DT – Constante de amortecimento da carga

DL – Fator que depende da composição da carga

ECE – Esquema de Controle de Emergência

ERAC – Esquema de Rejeição Automática de Carga

f – Frequência

f_0 – Frequência inicial

FW – Primeira frequência encontrada abaixo da frequência de supervisão.

$F[N+1]$ – Frequência para a próxima iteração

GT – Geração total

GR – Geração remanescente

Hz – Hertz

H – Constante de inércia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PR – Potência restante

PC_0 – Potência da carga inicialmente

PG_0 – Potência da geração inicialmente

SE – Subestação

s – Segundos

TC – Conjugado da carga

TA – Conjugado elétrico

TG – Conjugado da geração

TC_0 – Conjugado da carga inicial

TG_0 – Conjugado da geração inicial

TC_{N-1} – Conjugado da carga na iteração anterior

TC_N – Conjugado da geração na iteração

TX – Taxa de variação

TEM_x – Tempo decorrido até o alcance da frequência de supervisão do relé.

$TEMPO[N+1]$ – Tempo decorrido na iteração atual

t – Tempo

UGG – Unidade Geradora a Gás

UGD – Unidade Geradora a Diesel

UGH – Unidade Geradora hidráulica

β – Fator de sobrecarga

f' – Derivada da frequência pelo tempo

θ – Ângulo elétrico do rotor da máquina síncrona

δ – Ângulo do rotor em relação a um eixo de referência

ω – Velocidade angular

ω_0 – Velocidade angular inicial

Δf – Variação (desvio) de frequência

Δt – Passo do método numérico

1. INTRODUÇÃO

Algo muito importante em sistemas elétricos de potência é a frequência dos mesmos, pois todos os elementos que constituem esses sistemas são feitos para atenderem ou usufruírem dela, a qual é previamente estabelecida com um valor fixo, no qual os sistemas elétricos devem operar.

Com a perda significativa de geração, provocada, por exemplo, por curtos-circuitos em linhas de transmissão que dão acesso às máquinas ou defeitos em equipamentos, ocorrerão perturbações no sistema, podendo submeter o sistema a afundamentos da frequência.

Os elementos de proteção chamados relés de frequência são ajustados para atuarem na ocorrência de variações na frequência, a fim de protegerem os equipamentos, como geradores, bem como garantir o funcionamento do sistema elétrico em níveis aceitáveis, isto é, que foram pré-determinados conforme estudos técnicos específicos.

Uma grande perturbação, como uma perda significativa de geração, quando provoca o afundamento da frequência do sistema elétrico, pode levar ao colapso total deste. Para tentar evitar este fenômeno, são utilizados esquemas de controle de emergência (ECEs), como o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC).

Para a implementação de um ERAC, utilizam-se aplicativos computacionais para simulações de contingências do tipo perda de geração em um sistema elétrico. Esses programas, como o Anatem, que é um *software* desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL), utilizam os dados elétricos do sistema, dados de máquina, bem como os modelos representando os reguladores de tensão e de velocidade dos geradores. No intuito de minimizar o esforço desenvolvido em tais aplicativos, no tocante à quantidade de simulações necessárias, elaborou-se o programa proposto neste projeto, sem a necessidade de se entrar com todos os dados elétricos do sistema e os modelos dos reguladores, fornecendo um resultado satisfatório e diminuindo consideravelmente o tempo de elaboração do ERAC. No entanto, este aplicativo é uma ferramenta auxiliar. Ele será utilizado tomando-se os dados de máquinas, de carga e prosseguindo com os ajustes dos relés de subfrequência e do percentual de alívio de carga, para posteriormente serem aperfeiçoados em programas mais elaborados, como o Anatem.

O trabalho está assim estruturado: o capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho; no capítulo 2, é apresentado um estudo sobre o equilíbrio carga-geração após a perda de

geração; o capítulo 3 apresenta o desenvolvimento teórico para elaboração da curva frequência *versus* o tempo; no capítulo 4, é proposto o aplicativo computacional para o estudo de alívio de carga por subfrequência; o capítulo 5 consiste em exemplos da aplicação do programa proposto na resolução do problema para manter o equilíbrio carga-geração após perda de geração; no capítulo 6, são apresentadas conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2. EQUILÍBRIO CARGA-GERAÇÃO APÓS A PERDA DE GERAÇÃO

[1]

2.1 PERDA DE GERAÇÃO

Em um sistema elétrico estável, quando ocorre uma perturbação como a perda de um gerador, tem como uma de suas conseqüências o afundamento da freqüência desse sistema, sendo tal perda pequena ou significativa. Se a perturbação for pequena, as regulações próprias do sistema e primárias das máquinas remanescentes, com seus reguladores de velocidade, forçam a freqüência do sistema a voltar ao seu valor de regime ou a um valor próximo deste, o mais rápido possível, desde que haja reserva girante suficiente para manter o equilíbrio carga-geração. Se a perturbação no sistema for considerável, poderá ocorrer um afundamento rápido na freqüência, e como as respostas dos reguladores de velocidade são lentas, tipicamente acima de um segundo para a abertura máxima dos atuadores ou posicionamento máximo dos distribuidores, a freqüência do sistema poderá atingir valores que levem à atuação das proteções de subfreqüência das máquinas, desligando-nas. Assim, na ocorrência de grandes perturbações, causadas por perda de geração, faz-se necessária a rejeição de cargas para manter o equilíbrio carga-geração e diminuir a velocidade de queda da freqüência, levando os reguladores de velocidade a atuarem mais rápidos, forçando a subida da freqüência ao seu valor de regime ou a um valor próximo deste.

As Figuras 2.1 e 2.2 seguintes são simulações efetuadas no programa Anatem. A figura 2.1 mostra o comportamento da freqüência com o tempo de um sistema elétrico isolado após as simulações da perda de uma pequena e de uma grande geração correspondendo, respectivamente, a 5% (curva A) e 40% (curva B) em relação a geração inicial total do sistema analisado, sem alívio de carga. A curva A tem um afundamento da freqüência, mas esta retorna (sobe) ao um valor próximo do nominal, inicial. Isso porque a perda de geração é pequena e as regulações próprias do sistema e primárias das máquinas forçam esta subida. No caso da curva B, o afundamento é tal que a freqüência não retorna ao seu valor inicial, nem próximo deste, uma vez que a perda de geração é considerável e os mecanismos de regulação não foram suficientes para forçar a subida da freqüência.

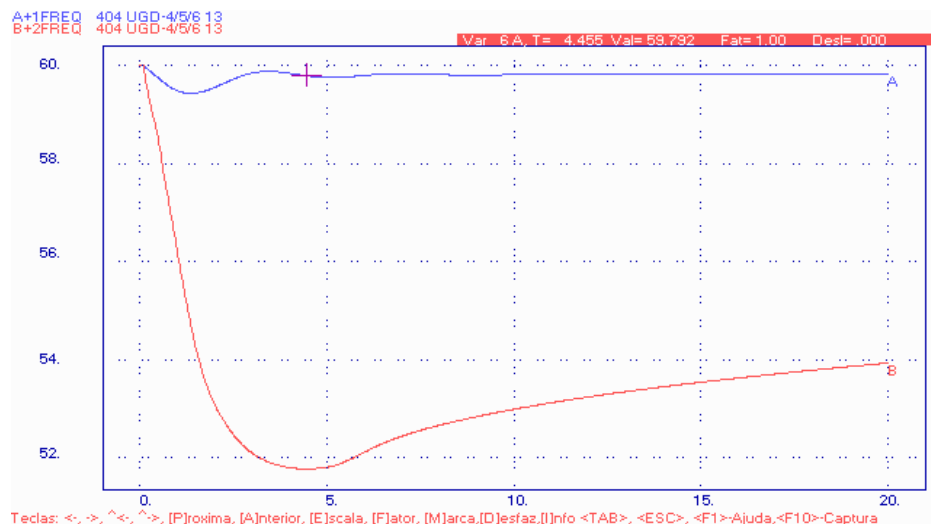


Figura 2.1 - Perda de geração de 5% (curva A) e de 40% (curva B)

A Figura 2.2 mostra o comportamento típico da frequência após as simulações da perda de uma geração correspondendo a 40% da geração inicial total do sistema sem rejeição (curva A) e com rejeição (curva B) de 23% da carga, também em relação a geração inicial total. A curva A desta figura é a curva B da figura 2.1. Aqui, nota-se que o alívio de carga força a uma subida da frequência, quando os mecanismos de regulação não são suficientes.

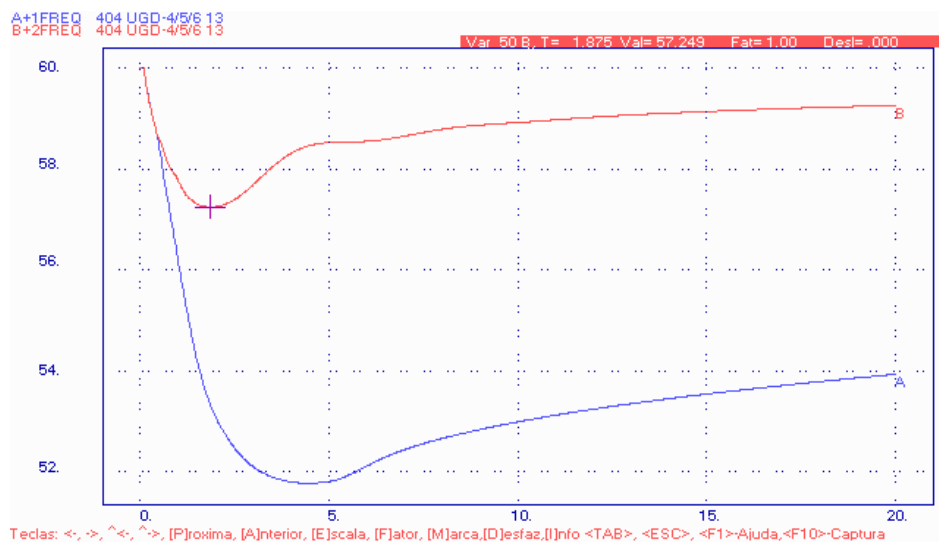


Figura 2.2 - Sistema sem rejeição de carga (curva A) e com rejeição de 23% da carga (curva B) para uma perda de 40% da geração total.

O problema a ser resolvido é manter o equilíbrio carga-geração de um sistema elétrico, após a perda de um ou mais geradores, fazendo uma retirada coordenada de carga, e não permitindo que na queda da frequência do sistema esta ultrapasse as faixas

permissíveis de frequências abaixo da nominal ou a frequência mínima permitida para o sistema elétrico analisado.

2.2 REJEIÇÃO DE CARGA

As rejeições de carga devem ser feitas segundo um esquema de controle de emergências (ECE), que atua quando acontecem grandes perturbações no sistema elétrico, como, por exemplo, a perda significativa de geração em um sistema elétrico.

Um ECE muito utilizado nos sistemas isolados é o esquema de rejeição automática de carga ou esquema regional de alívio de carga, ERAC, utilizando relés de subfrequência. Neste tipo de ECE, a frequência do sistema elétrico é monitorada. Assim, se ocorrer uma perda de geração que leve a frequência do sistema a cair abaixo de um valor pré-estabelecido, ou a cair com uma velocidade acima, também, de um valor pré-estabelecido, o esquema atuará, retirando carga do sistema elétrico para compensar a perda de geração, fazendo com que o sistema elétrico restabeleça a frequência nominal. Este procedimento preserva os geradores remanescentes de danos ou desligamentos por subfrequência, e evita o colapso total no fornecimento de energia ao sistema elétrico.

Isso pode ser obtido por meio do desligamento rápido e coordenado de cargas. Como retirar carga do sistema é sempre uma ação indesejável, o trabalho de minimizar o montante de carga é muito importante e deve ser bastante criterioso.

O esquema utilizado para essa finalidade pode ser constituído de relés de taxa de variação de frequência e relés de frequência absoluta que, instalados em pontos estratégicos do sistema, desliguem automaticamente alimentadores pré-selecionados, evitando que a frequência do sistema alcance valores considerados críticos, e assim restabelecer o estado de equilíbrio carga-geração.

Nos sistemas elétricos isolados, o impacto da perda de geração muitas vezes representa um percentual relativamente elevado da demanda total do sistema, o que, associado ao aspecto da inércia remanescente dos geradores ser relativamente baixa, faz com que o aspecto dinâmico mais relevante esteja associado ao desempenho dos esquemas regionais por alívio de carga por subfrequência.

Logo, para resolver o problema de manter o equilíbrio carga-geração, deve-se saber como se comporta a frequência do sistema elétrico em questão para determinadas contingências, como a perda de um ou mais geradores e, a partir desta informação, propor a rejeição coordenada e otimizada de determinados blocos de carga em função da taxa de

variação da frequência e da frequência absoluta do sistema elétrico para o restabelecimento do equilíbrio carga-geração.

3. CURVA FREQUÊNCIA *VERSUS* TEMPO

3.1. INTRODUÇÃO

Como foi visto, é preciso monitorar a frequência do sistema para a atuação do ERAC. Isso pode ser feito por meio da curva da frequência em função do tempo.

O desequilíbrio no sistema, provocado inicialmente por uma perda súbita de parte da geração ou linhas de interligação, produz variações na curva frequência pelo tempo, que também sofre variações bruscas quando são desligados blocos de cargas.

Sempre que ocorre uma mudança súbita no valor de carga, a taxa de variação $\frac{df}{dt}$ sofre uma modificação, e a curva frequência pelo tempo muda bruscamente a sua direção.

Para análise deste sistema em desequilíbrio, tornam-se necessárias as equações para o cálculo da curva frequência pelo tempo.

3.2. DETERMINAÇÃO DA CURVA FREQUÊNCIA *VERSUS* TEMPO POR MEIO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DIRETO

Um estudo bastante detalhado sobre este assunto foi publicado por Dalziel e Steinback [2].

Nesse trabalho, os autores demonstram equações que permitem determinar diretamente o tempo que um sistema desequilibrado leva para atingir uma determinada frequência.

Admitiu-se que a curva real frequência pelo tempo fica compreendida entre dois limites correspondentes às seguintes hipóteses: O conjugado de carga não depende da frequência e é constante (equação (3.1)) e o conjugado de carga é proporcional à frequência (equação (3.2)). [3]

$$TC = TC_0 \quad (3.1)$$

$$TC = TC_0 \times \frac{f}{f_0} \quad (3.2)$$

Em que:

f é a frequência, em hertz (Hz);

f_0 é a frequência inicial, em hertz (Hz);

TC é o conjugado elétrico da carga, que é calculado encontrado através da equação:

$$TA = TG - TC \quad (3.3)$$

Com:

TA sendo o conjugado acelerante, em p.u;

TG o conjugado mecânico da geração, em p.u.

As equações foram deduzidas independentemente para cada uma das hipóteses acima [3].

Para hipótese da equação 3.1, a equação encontrada foi:

$$t = \frac{2H}{f_0 \times TC_0} \times \left[f_0 - f + 2,30 \frac{f_0}{\beta} \times \log \left| \frac{\frac{f_0}{\beta} - f}{\frac{f_0}{\beta} - f} \right| \right] \quad (3.4)$$

Já para a hipótese da equação 3.2, a equação encontrada é:

$$t = \frac{2,30H}{TC_0} \times \log \left| \frac{f_0^2 - \frac{f_0^2}{\beta}}{f_0^2 - \frac{f_0^2}{\beta}} \right| \quad (3.5)$$

Em que:

t é o tempo dado em segundos;

H é a constante de inércia em p.u., na mesma base da geração remanescente;

β que é o fator de sobrecarga.

A constante de inércia (H) é a relação entre a energia cinética da máquina e sua potência nominal, correspondendo ao tempo necessário para a máquina sair do repouso e atingir a velocidade síncrona quando se aplica em seus terminais a sua potência aparente nominal [4].

O fator β é definido como a relação entre os conjugados ou as potências da carga e da geração no instante inicial da perturbação [3].

$$\beta = \frac{TC_0}{TG_0} = \frac{PC_0}{PG_0} \quad (3.6)$$

Já no trabalho desenvolvido por Berdy [5], é deduzida a seguinte equação, que permite determinar a frequência em função do tempo [3]:

$$f' = \frac{TA}{DT} \times \left| 1 - e^{-\left(\frac{DT}{2H}\right)t} \right| \quad (3.7)$$

Em que:

f' é a variação da frequência, em p.u., na mesma base de f_0 ;

TA é o conjugado acelerante, em p.u., na mesma base da geração remanescente;

DT é o fator de amortecimento total;

H é a constante de inércia do sistema em p.u., cuja base é a geração remanescente.

O valor de f' é negativo quando a frequência está diminuindo.

O valor da frequência, em hertz, é encontrado fazendo [3] [4]:

$$f = f_0 + f' \times f_0 \quad (3.8)$$

O valor de DT é calculado pela equação [3]:

$$DT = TG + (DL - 1) \times TC \quad (3.9)$$

DL é o fator que depende da composição da carga e normalmente é estimado ou determinado experimentalmente. Pode também ser chamado de constante de amortecimento.

3.2.1. Modelo de carga

Geralmente, a representação da carga de uma subestação é feita por um modelo composto que considera parcelas de carga, como a iluminação incandescente, que apresentam um comportamento de variação da potência com o quadrado da tensão e são, dessa forma, denominadas cargas tipo impedância constante. Cargas como os motores, que não variam significativamente suas potências com a tensão, são chamadas cargas tipo potência constante. Outras cargas, como os consumidores eletrointensivos (produção de alumínio), em regime permanente, variam linearmente com tensão e são denominadas cargas tipo corrente constante [1].

O procedimento-padrão para identificar o modelo de uma carga é realizar testes e medições específicas, mas, devido às dificuldades de execução destes testes e medições nas diversas subestações de um sistema elétrico, recorre-se a outros métodos, tais como o levantamento das características das cargas com base na sua composição por classe de consumidores, bem como na análise de determinadas ocorrências registradas [1].

Alguns tipos de carga, como a dos consumidores eletrointensivos, ou outros consumidores especiais, necessitam de modelos bem mais elaborados, baseados na modelagem matemática do processo industrial usado pelo consumidor, nos registros de

medições específicas, como as distorções harmônicas e análise das respostas a distúrbios involuntários ou voluntários, como curtos-circuitos [1].

A equação (3.7) é válida para uma variação da frequência partindo do valor nominal [3].

Quando ocorre alguma descontinuidade como, por exemplo, o desligamento de um bloco de carga, passa-se para uma nova curva exponencial.

Neste caso ainda vale a equação (3.7), porém é necessário determinar novos valores de TG e TC para a frequência na qual ocorreu a descontinuidade .

Comparando os dois métodos mencionados acima, verifica-se que as equações de Dalziel e Steinback [2] têm a vantagem de fornecer o tempo em função da frequência, o que é mais prático em cálculos de esquemas de conservação de carga onde se deseja saber em que ponto será atingida uma determinada frequência. Por outro lado, essas fórmulas somente determinam as curvas correspondentes aos dois casos extremos (conjugado da carga constante ou proporcional à frequência), que limitam a faixa na qual se verificam os valores práticos [3].

Já a equação deduzida no trabalho de Berdy [5] permite utilizar qualquer coeficiente de variação da carga com a frequência, porém exige extrapolações para determinação do tempo correspondente a uma determinada frequência [3].

3.3. DETERMINAÇÃO DA CURVA FREQUÊNCIA *VERSUS* TEMPO POR MEIO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO “PASSO-A-PASSO”

Para utilização em aplicativos computacionais, métodos de cálculo “passo-a-passo” são mais adequados.

Um método de cálculo “passo-a-passo” da curva frequência *versus* tempo é apresentado abaixo e foi utilizado na implementação do programa apresentado neste projeto.

Seja θ o ângulo elétrico do rotor de uma máquina síncrona, em relação a uma referência fixa, e δ o ângulo deste rotor em relação a um eixo de referência que gira com a velocidade síncrona ω_0 [3].

Então:

$$\theta = \delta + \omega_0 t \quad (3.10)$$

$$\delta = \theta - \omega_0 t \quad (3.11)$$

Derivando em relação ao tempo:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_0 \quad (3.12)$$

Ou,

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (3.13)$$

Derivando novamente em relação ao tempo:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} \quad (3.14)$$

Como $\omega = 2\pi f$, pode-se escrever:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = 2\pi \times \frac{df}{dt} \quad (3.15)$$

Ou:

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (3.16)$$

Por outro lado, temos a equação do movimento dos rotores de máquinas elétricas:

$$TA = \frac{d^2\delta}{dt^2} \times \frac{H}{\pi f_0} \quad (3.17)$$

Ou:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} \times (TG - TC) \quad (3.18)$$

Onde:

TG e TC são, respectivamente, os conjugados da geração e da carga em p.u. que variam em função da frequência.

A Equação (3.18), diminuída do fator de amortecimento da carga $DT(f - f_0)$, é conhecida como equação de balanço ou *swing*:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} [TA - DT(f - f_0)] \quad (3.19)$$

O termo $DT(f - f_0)$ representa a variação da carga com a frequência, caracterizando a regulação própria ou auto-regulação do sistema. Assim, desvios negativos da frequência resultam em decréscimo da carga e vice-versa. Um valor de $DT=2$ significa que uma variação de 1% na frequência causa uma variação de 2% na carga [1]. Esse termo pode ser incorporado ao termo da potência elétrica da carga conforme indicado na equação (3.21).

Substituindo (3.18) em (3.16) tem-se:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0}{2H} \times (TG - TC) \quad (3.20)$$

Essa equação diferencial é a base do programa proposto do projeto, onde TG e TC são proporcionais à frequência e são dados por:

$$TC = TC_0 \times \left(\frac{f}{f_0} \right)^{DT-1} \quad (3.21)$$

$$TG = TG_0 \times \frac{f_0}{f} \quad (3.22)$$

4. APLICATIVO COMPUTACIONAL PROPOSTO PARA O ESTUDO DE ALÍVIO DE CARGA POR SUBFREQUÊNCIA

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado um método computacional para o cálculo da curva frequência pelo tempo.

Esta curva estará sujeita a variações, caso ocorra queda na geração ou queda na carga. Com isso, pode-se simular o sistema em desequilíbrio, por perda de geração, e o que ocorre com o mesmo quando são desligados blocos de carga.

4.2. DETERMINAÇÃO DA CURVA FREQUÊNCIA *VERSUS* TEMPO NO PROGRAMA

A resolução da equação diferencial (3.20) pode ser feita por vários métodos numéricos. Com os intervalos de tempo que serão utilizados no programa, verifica-se que o Método de Euler Simples é o recomendado, pois gera erros aceitáveis e aproximados aos de métodos mais elaborados como o do Euler Modificado [3].

O Método de Euler Simples é feito para pequenos intervalos dt nos quais:

$$f_N = f_{N-1} + \Delta f \Big|_{N-1}^N \quad (4.1)$$

Sendo que:

$$\Delta f \Big|_{N-1}^N = \Delta t \times \frac{df}{dt} \Big|_{N-1}^N \quad (4.2)$$

Onde Δt é o passo do método de Euler simples.

Substituindo (3.20) em (3.22) e usando o resultado assim obtido em (3.21), tem-se a equação que determina a frequência no instante t_N , em função dos valores de f , TG e TC , no instante t_{N-1} .

$$f_N = f_{N-1} + \frac{f_0}{2H} \times (TG_{N-1} - TC_{N-1}) \Delta t \quad (4.3)$$

TG e TC são admitidos constantes no intervalo t_{N-1} a t_N , porém o seu valor tem que ser recalculado para a nova frequência no fim deste intervalo, de acordo com as seguintes equações:

$$TG_N = TG_{N-1} \left| \frac{f_{N-1}}{f_N} \right| \quad (4.4)$$

$$TC_N = TC_{N-1} \left| \frac{f_N}{f_{N-1}} \right|^{DT-1} \quad (4.5)$$

Como pode ser verificado na equação (4.3), o programa desenvolvido calculará as frequências em diversas iterações “N”.

O número dessas iterações dependerá do valor do passo Δt .

Para cada frequência calculada, novos valores de TC e TG serão calculados e esses, por sua vez, gerarão um novo valor da frequência.

Essas iterações constituem o “corpo” principal do programa.

4.3. UTILIZANDO A CURVA FREQUÊNCIA *VERSUS* TEMPO DO PROGRAMA, NA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE MANTER O EQUILÍBRIO CARGA-GERAÇÃO APÓS PERDA DE GERAÇÃO

Como visto anteriormente, um sistema em desequilíbrio, provocado inicialmente por uma perda súbita de parte da geração ou linha de interligação, também sofre variações bruscas quando são desligados blocos de carga.

Isso é comprovado ao se analisar o valor do conjugado da carga (TC) no instante inicial e no instante logo após o desligamento de um bloco de carga.

O valor inicial de TC para o cálculo da primeira iteração do programa será dado pela equação:

$$TC_0 = \frac{GT}{GR} \quad (4.6)$$

Em que:

GT é o despacho total de geração da área estudada.

GR é a geração restante após a perda de uma porcentagem da geração total.

Como se pode perceber, o dado inicial para o conjugado da carga (TC_0) é igual à sobrecarga imposta ao sistema. Isso mostra que a equação (4.3) é influenciada pela perda de geração.

As próximas iterações do programa calcularão a curva frequência *versus* tempo utilizando as equações (4.4), (4.5) e (4.6).

As simulações de desligamentos de blocos de carga são feitas através de ajustes de relés, que podem ser de taxa de variação ou de frequência absoluta.

Quando a frequência, calculada pela equação (4.3), do programa fica abaixo da ajustada pelo relé, o bloco de carga associado a esse relé é desligado. Nesse momento, é recalculado o valor de TC, com a nova configuração de carga, através da equação:

$$TC_{N+1} = TC_N \times \left[\left(\frac{F[n+1]}{F[n]} \right)^{DT-1} - \frac{PR}{100} \times \frac{GT}{GR} \left(\frac{F[n+1]}{FI} \right)^{DT-1} \right] \quad (4.7)$$

Onde PR é a porcentagem da carga desligada referente ao respectivo grupo. Isso garante que a equação (4.3) é influenciada pela perda de carga. Dessa forma, é possível garantir que a frequência do sistema estudado decairá após uma perda de parte de sua demanda de geração e que ele crescerá quando uma parte de sua carga for desligada.

O algoritmo estruturado do programa é apresentado no Anexo I, e um fluxograma simplificado do programa é apresentado na figura seguinte (4.1).

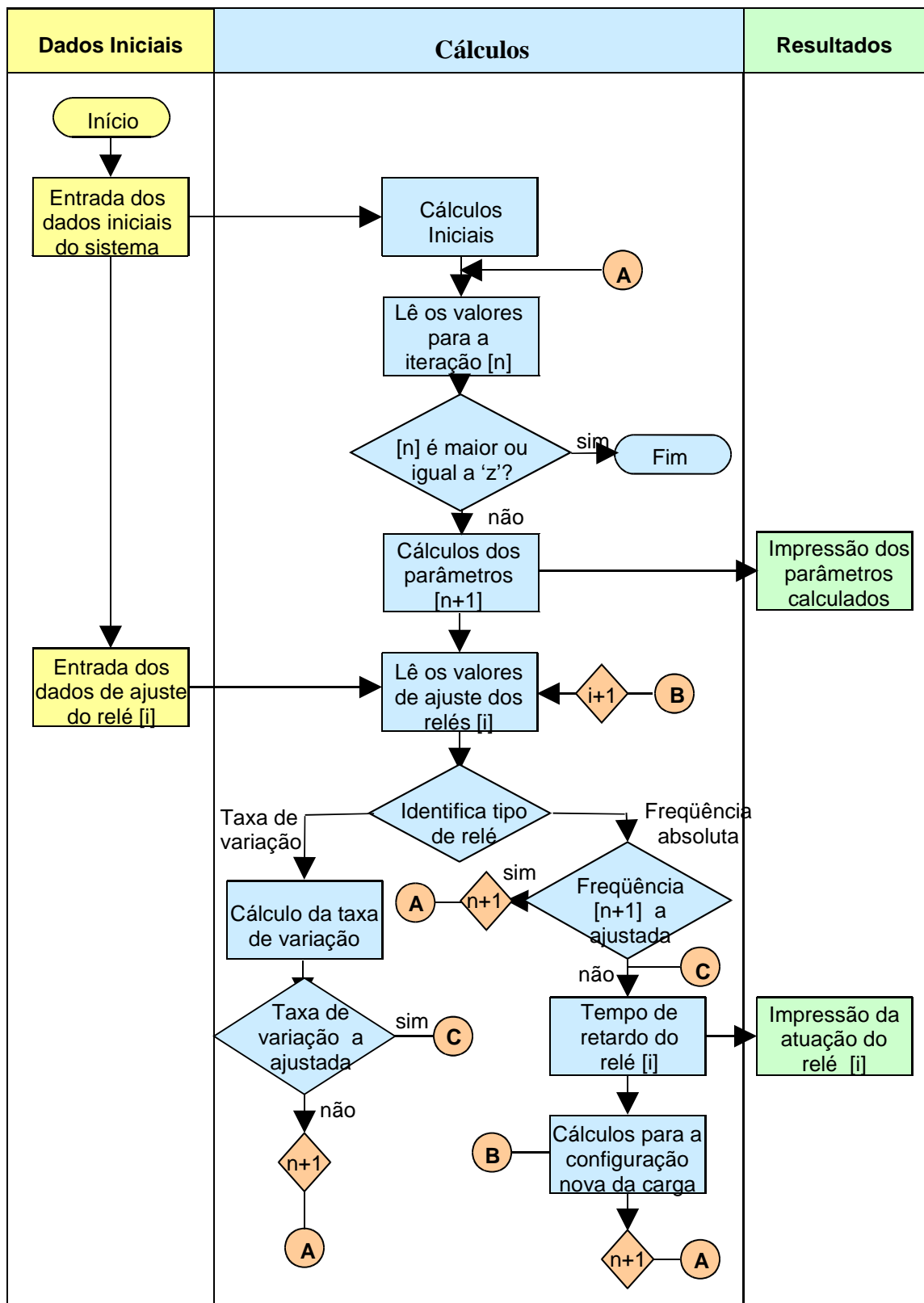


Figura 4.1 – Fluxograma do programa

O programa foi feito utilizando técnicas de programação orientadas a objeto e utilizou-se o Delphi 5 [6] [7].

Os dados de entrada do programa são divididos em relação ao sistema e em relação a ajuste de relés.

4.3.1. Dados de entrada do programa em relação ao sistema

O programa deve ser alimentado, através das telas apresentadas nas figuras seguintes, com:

- O tempo de simulação, que é o tempo em que o programa efetuará as iterações, deverá ser informado em segundos.
- O passo Δt do método de Euler Simples, que também deverá ser informado em segundos.

A janela de diálogo intitulada "Dados" possui quatro abas: "Tempo", "Carga", "Geração" e "Frequência". A aba "Tempo" está ativa. O formulário contém duas seções principais:

- Tempo de Execução (s):** Possui três botões de opção com os valores 2, 4 e 6. O botão com o valor 4 está selecionado.
- Intervalo de tempo para calculo:** Possui dois botões de opção. O primeiro, "Padrão: 0,01 s", está selecionado. O segundo, "Personalizado:", é acompanhado de um campo de entrada de texto contendo o valor "0,01" e uma unidade "s".

Na base da janela, há dois botões: "OK" e "Cancela".

Figura 4.2 – Tela de entrada de dados (tempo)

- A constante de amortecimento da carga.

Figura 4.3 – Tela de entrada de dados (carga)

- A geração, GT, total da área estudada em MW.
- A geração, GP, perda, também em MW.
- A constante de inércia, H, equivalente das máquinas, colocadas na mesma base

e em $\frac{MJ}{MVA}$.

A base utilizada no cálculo da constante de inércia equivalente, em MVA, normalmente é de 100 MVA.

The image shows a software window titled "Dados" with four tabs: "Tempo", "Carga", "Geração", and "Frequência". The "Geração" tab is selected. It contains three main input sections:

- Geração Total:** A text box containing "5756" followed by the unit "MW".
- Geração Perdida:** A text box containing "1158" followed by the unit "MW".
- Constante de Inércia:** This section contains two sub-inputs:
 - Geração remanescente:** A text box containing "204,7" followed by the unit "MJ/MVA".
 - Base utilizada:** A text box containing "100" followed by the unit "MVA".

At the bottom of the window are two buttons: "OK" and "Cancela".

Figura 4.4 – Tela de entrada de dados (geração)

A frequência inicial do sistema, em hertz, que geralmente é 60 Hz.

A Fmaior (Hz), que é a máxima frequência permitida para a variação acima de 60Hz.

A Fmenor (Hz), que é mínima frequência permitida para a variação abaixo de 60 Hz.

Figura 4.5 – Tela de entrada de dados (frequência)

Os valores de frequências permitidas para variação acima e abaixo do 60 Hz são dados pelos Procedimentos de Rede publicados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e são reproduzidos na tabela 4.1 [8].

Tabela 4.1 – Operação em regime de frequência não nominal

REQUISITOS	DESCRIÇÃO	BENEFÍCIO
1. Operação em regime de frequência não nominal para usinas hidrelétricas.	(a) Operação entre 56,5 e 66 Hz sem atuação dos relés de sub e sobrefrequência instantâneos; (b) Operação abaixo de 58,5Hz por até 20 segundos; (c) Operação entre 58,5 e 63 Hz sem atuação dos relés de sub e sobrefrequência temporizados; (d) Operação acima de 63 Hz por até 10 segundos.	Evitar o desligamento dos geradores quando de déficit de geração.
1. Operação em regime de frequência não nominal para usinas termelétricas.	(a) Operação entre 57 e 63 Hz sem atuação dos relés de sub e sobrefrequência instantâneos; (b) Operação abaixo de 57,5 Hz por até 5 segundos; (c) Operação abaixo de 58,5 Hz por até 10 segundos; (d) Operação entre 58,5 e 61,5 Hz sem atuação dos relés de sub e sobrefrequência temporizados; (e) Operação acima de 61,5 Hz por até 10 segundos.	Evitar o desligamento dos geradores quando de déficit de geração, antes que o esquema de alívio de carga atue completamente ou em condições de sobrefrequência controláveis.

4.3.2. Dados de entrada do programa em relação aos ajustes dos relés

O programa deve ser alimentado, para relés de frequência absoluta:

- Frequência absoluta, em Hz, ajustada para o relé;
- Retardo total: soma do retardo do relé com o tempo de abertura do mesmo, dado em segundos;

Porcentagem de carga rejeitada em relação à carga total do sistema estudado;

Para relés de taxa de variação:

- Taxa de variação de frequência ajustada para o relé;
- Frequência de supervisão, em Hz;
- Frequência de corte, em Hz.

Figura 4.6 – Tela de entrada de dados de ajuste dos grupos de rejeição

A taxa de variação do relé deve ser ajustada através das frequências de corte e frequência de supervisão. O programa comparará a taxa de variação ajustada de acordo com a fórmula:

$$TX = \left(\frac{FW - F[n+1]}{TEMx - TEMPO[n+1]} \right) \quad (4.8)$$

Em que:

TX é a taxa de variação calculada pelo programa e que será a comparada com a ajustada;

FW é a primeira frequência calculada que ficou abaixo da frequência de supervisão

F[n+1] é a primeira frequência calculada que ficou abaixo da frequência de corte;

TEMx é o instante em que ocorre a frequência FW;

TEMPO[n+1] é o instante em que ocorre a frequência F[n+1].

4.3.3. Os dados de saída do programa

Os resultados apresentados pelo problema são mostrados em uma tabela onde, para cada iteração feita durante o tempo de execução do problema, têm-se: O tempo decorrido desde o início, a frequência, a taxa média, DF/DT , o conjugado da geração, o conjugado da carga, o tempo acumulado em que a frequência ficou abaixo da frequência mínima permitida, Fmenor, e o tempo acumulado em que a frequência ficou acima frequência máxima permitida, Fmaior.

Sempre que ocorre uma rejeição de carga, aparece indicado na tabela o instante em que ocorreu tal rejeição.

Quando houver algum grupo cujo relé seja o de taxa de variação de frequência, deverá aparecer na tabela geral de resultados a taxa calculada, para ser comparada com a taxa ajustada.

Alisub								
Arquivo Configurações Editar Visualizar								
Tempo(s)	Freq(Hz)	Taxa(Hz/s)	TGer(pu)	TCarga(pu)	Tempo Acima(s)	Tempo Abaixo(s)	Disparo do Relé	Taxa calculada
0,01	59,9830288226	-1,6971177332E	1,00028293298	1,2516715727	0	0	0	0
0,02	59,9660886424	-1,6940180250E	1,00056550891	1,2514948141	0	0	0	0
0,03	59,9491794150	-1,6909227337E	1,00084772778	1,2513183535	0	0	0	0
0,04	59,9323010965	-1,6878318571E	1,00112958959	1,2511421906	0	0	0	0
0,05	59,9154536425	-1,6847453929E	1,00141109433	1,2509663252	0	0	0	0
0,06	59,8986370091	-1,6816633390E	1,00169224202	1,2507907568	0	0	0	0
0,07	59,8818511522	-1,6785856929E	1,00197303265	1,2506154852	0	0	0	0
0,08	59,8650960277	-1,6755124525E	1,00225346623	1,2504405099	0	0	0	0
0,09	59,8483715915	-1,6724436155E	1,00253354275	1,2502658307	0	0	0	0
0,1	59,8316777997	-1,6693791796E	1,00281326224	1,2500914472	0	0	0	0
0,11	59,8150146083	-1,6663191424E	1,00309262470	1,2499173592	0	0	0	0
0,12	59,7983819733	-1,6632635016E	1,00337163013	1,2497435661	0	0	0	0
0,13	59,7817798507	-1,6602122549E	1,00365027855	1,2495700678	0	0	0	0
0,14	59,7652081967	-1,6571654000E	1,00392856998	1,2493968639	0	0	0	0
0,15	59,7486669674	-1,6541229345E	1,00420650443	1,2492239540	0	0	0	0
0,16	59,7321561188	-1,6510848560E	1,00448408191	1,2490513378	0	0	0	0
0,17	59,7156756072	-1,6480511621E	1,00476130245	1,2488790150	0	0	0	0
0,18	59,6992253887	-1,6450218505E	1,00503816606	1,2487069853	0	0	0	0
0,19	59,6828054195	-1,6419969188E	1,00531467276	1,2485352482	0	0	0	0

Figura 4.7 – Tela de saída dos dados

5. EXEMPLOS DA APLICAÇÃO DO PROGRAMA NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE MANTER O EQUILÍBRIO CARGA-GERAÇÃO APÓS PERDA DE GERAÇÃO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados dois exemplos de um sistema de alívio de carga.

Por meio destes exemplos será mostrada a consistência do programa.

O primeiro é um caso virtual usando o programa Varf-5, o qual também é usado para implementar sistemas de alívio de carga [3].

O Segundo exemplo é real e é o ERAC do Sistema Isolado do Amapá, que é de responsabilidade da Eletronorte. Os resultados obtidos no programa vão ser comparados ao ERAC atual, que foi desenvolvido através das simulações feitas no programa Anatem, do CEPEL, e de dados recolhidos em campo [1].

5.2. EXEMPLO DO VARF-5

Este exemplo foi tirado da uma Nota Técnica da Eletronorte e seus resultados foram obtidos pelo programa Varf-5 [3], implementado a partir do Varf-4, desenvolvido, em Fortran, pelo Engenheiro Heinrich Parfijanowitsch [9], da Ligth, e apresentado no III Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.

O Varf-5 é o aplicativo computacional no qual foi baseado o programa desenvolvido neste projeto. Ele também não leva em conta os dados elétricos do sistema e os dados dos reguladores.

5.2.1. Dados de entrada

Os dados de entrada são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados de entrada para o exemplo proposto para comparação com o programa Varf-5

DADOS DE ENTRADA	
Frequência inicial	60,0 Hz
Constante de inércia do sistema	204,7 MJ/MVA
Base utilizada nos cálculos da constante de inércia	100,0 MVA
Constante de amortecimento da carga	1,5
Demanda inicial da área	5756,0 MW
Geração ou interligação perdida	1158,0 MW
Intervalo de tempo dos cálculos	0,01 s
Tempo de execução	4,0 s

5.2.2. Dados de ajuste do relé

São ajustados nove grupos de rejeição, sendo que os dois primeiros são implementados com relés de taxa de variação de frequência e os outros por frequência absoluta.

Os dados de ajustes para cada grupo estão relacionados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dados de ajuste dos relés para o exemplo proposto para comparação com o programa Varf-5

AJUSTES DOS RELÉS DE FREQUÊNCIA							
Tipo	Grupo	Frequência Absoluta (Hz)	Retardo (s)	Carga Rejeitada (%)	Taxa de Variação	Frequência Supervisão (Hz)	Frequência Corte (Hz)
Taxa de variação	1	—	0,100	5,00	0,90	59,90	59,60
Taxa de variação	2	—	0,100	5,00	0,40	59,90	59,20
Frequência Absoluta	3	58,80	0,100	5,00	—	—	—
Frequência Absoluta	4	58,40	0,100	6,00	—	—	—
Frequência Absoluta	5	58,00	0,100	7,20	—	—	—
Frequência Absoluta	6	57,60	0,100	7,20	—	—	—
Frequência Absoluta	7	57,20	0,100	5,60	—	—	—
Frequência Absoluta	8	56,80	0,100	5,60	—	—	—
Frequência Absoluta	9	56,40	0,100	6,00	—	—	—

5.2.3. Resultados obtidos no programa Varf-5

Os resultados fornecidos pelo programa Varf –5 são apresentados no Apêndice C.

Apesar do programa efetuar cálculos a cada 0.01 segundos, os resultados exibidos no Apêndice C são a cada 0.02 segundos, com exceção dos instantes em que há desligamento de carga.

Outros resultados exibidos são:

A taxa de variação ajustada e a calculada pelo programa no instante em que há desligamento de carga; a frequência, o conjugado da carga, o conjugado da geração, a área acumulada abaixo de 59 Hz, a área acumulada entre 59 e 60 Hz e a área acumulada acima de 60 Hz.

Um resumo dos resultados obtidos é dado na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resumo dos resultados obtidos da simulação no programa Varf-5

RESULTADOS VARF-5

Grupo desligado	Instante	Frequência	Taxa de variação	Transitório da Carga	Transitório da Geração	Área Abaixo 59Hz	Área entre 59 e 60 Hz	Taxa de variação calculada
1	0,350	59,429	-1,567	1,246	1,010	0,0	0,104	1,6383
2	0,660	59,084	-1,077	1,015	1,180	0,0	0,337	1,3770
3	1,210	58,737	-0,600	1,021	1,114	0,058	0,939	—
4	3,390	58,386	-0,133	1,027	1,048	1,039	4,101	—

5.2.4. Resultados obtidos no programa elaborado

O programa foi alimentado conforme os dados fornecidos acima, e gerou como resultado, os exibidos na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resumo dos resultados obtidos da simulação do programa proposto

Tempo (s)	Frequência (Hz)	Taxa (Hz/s)	T. Ger (pu)	T. Carga (pu)	Tempo acima (s)	Tempo abaixo (s)	Ocorre disparo do relé	Taxa de variação calculada
0,000	60,0000	0,0000	1,0000		0	0,00	—	—
0,200	59,6640	-1,6389	1,0055	1,2483	0	0,00	—	—
0,350	59,4241	-1,5900	1,0096	1,1678	0	0,00	sim	1,6512
0,400	59,3710	-1,1380	1,0105	1,1673	0	0,00	—	—
0,600	59,1634	-1,2030	1,0141	1,1652	0	0,00	—	—
0,670	59,0975	-1,0074	1,0154	1,0917	0	0,00	sim	1,0447
0,800	59,0263	-0,5040	1,0164	1,0911	0	0,00	—	—
1,000	58,9270	-0,4850	1,0181	1,0901	0	0,15	—	—
1,200	58,8320	-0,4680	1,0198	1,0890	0	0,35	—	—
1,370	58,7539	-0,4540	1,0212	1,0204	0	0,52	sim	—
1,400	58,7539	0,0053	1,0210	1,0204	0	0,55	—	—
1,600	58,5640	0,0051	1,0212	1,0204	0	0,75	—	—
1,800	58,7559	0,0049	1,0211	1,0204	0	0,95	—	—
2,000	58,7560	0,0047	1,0211	1,0204	0	1,15	—	—
2,200	58,7570	0,0046	1,0210	1,0204	0	1,35	—	—
2,400	58,7587	0,0044	1,0211	1,0205	0	1,56	—	—
2,600	58,7590	0,0042	1,0210	1,0204	0	1,76	—	—
2,800	58,7605	0,0041	1,0210	1,0205	0	1,96	—	—
3,000	58,7610	0,0039	1,0210	1,0200	0	2,16	—	—
3,200	58,7621	0,0038	1,0210	1,0200	0	2,36	—	—
3,400	58,7629	0,0097	1,0205	2,5590	0	2,56	—	—
3,600	58,7635	0,0035	1,0200	2,7590	0	2,76	—	—
3,800	58,7640	0,0034	1,0205	2,9550	0	2,96	—	—

5.2.5. Comparação dos resultados

Ao se comparar os dados, nota-se a semelhança no começo das iterações. Já a frequência no programa desenvolvido se estabilizou mais rapidamente em relação à simulação feita no Varf - 5. Com isso, não houve a necessidade de disparo do grupo IV.

Para mostrar essa comparação utilizou-se o gráfico abaixo.

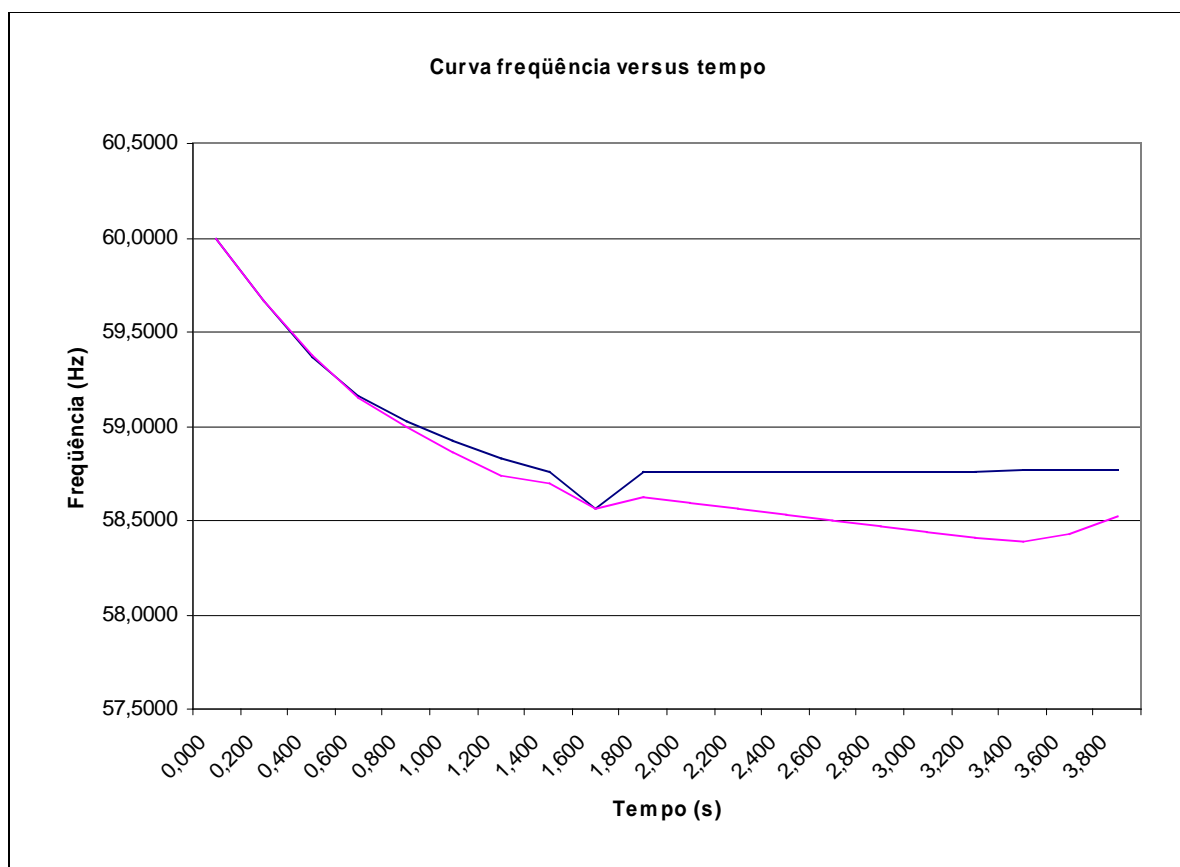


Figura 5.1 – Gráfico de comparação Varf e programa proposto

5.3. EXEMPLO SISTEMA ISOLADO AMAPÁ

O sistema elétrico do Amapá é um sistema isolado hidrotérmico e está dentro da área de atuação das Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte).



Figura 5.1 – Mapa do Amapá com a representação do sistema elétrico.

As linhas de transmissão entre as usinas Coaracy Nunes, Santana e as subestações em Macapá são apresentados no mapa exibido na figura 5.1 acima.

5.3.1. Dados do sistema

O sistema elétrico do Amapá atualmente é formado pela usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, composta de três geradores com um total de aproximadamente 70 MW disponíveis, e pela usina termelétrica Santana composta de sete unidades térmicas com um total de 110 MW disponíveis. Os parâmetros das máquinas são apresentados nas tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 5.5 – Dados das máquinas da Usina Termoeletrica Santana

MÁQUINA		UGG-01	UGG-02	UGG-03	UGD-04 A 07
Tipo de Turbina		LM2500	LM2500	LM2500	WARTISILA
Gerador: número de referência		60728A-1G	60759A-1G	60729A-1G	-
Modelo do gerador		BDAX7-167E	BDAX7-167E	BDAX7-167E	HSG1600SR14
Potência aparente (kVA)		28291	26111	28291	18581
Fator de potência		0,85	0,90	0,85	0,85
Constante de inércia (kW.s/kVA)	na base da máquina	1,91	2,07	1,91	1,4852
	na base 100	0,54	0,54	0,54	0,2760

Tabela 5.6 – Dados das máquinas da Usina Hidroeletrica Coaracy Nunes

MÁQUINA		UGH-01	UGH-02	UGH-03
Tipo de Turbina		KAPLAN(HITACHI)	KAPLAN(HITACHI)	KAPLAN(HITACHI)
Gerador: número de referência		511468-1	511468-2	SP97110156401
Modelo do gerador		-	-	1DH7139-3WF24-Z
Potência aparente (kVA)		28291	26111	28291
Fator de potência		0,85	0,85	0,95
Constante de inércia (kW.s/kVA)	Na base da máquina	0,429006	0,429006	0,4943116
	Na base 100	1,8652433	1,8652433	1,6259180

5.3.2. Dados de ajuste dos relés

O ERAC do sistema elétrico do Amapá é formado apenas por relés de frequência absoluta.

A configuração desse ERAC é dada na tabela 5.8 abaixo, e esses serão também os dados ajustados para rejeição dos grupos no programa.

O tempo de abertura (tabela 5.9) será a soma da temporização (tabela 5.8), e do tempo de retardo dos disjuntores, ou só o retardo dos disjuntores nos ajustes instantâneos.

Tabela 5.8 – Configuração de desligamento de carga do ERAC do Sistema Amapá

ERAC DO AMAPÁ					
Grupo	Subestação	Ajustes		Carga selecionada	
		FREQÜÊNCIA (Hz)	Temporização (s)	Carga Ativa (%)	Carga Ativa (MW)
1	Equatorial	58,5	instantânea	13,92	2 x 3,6
2	Macapá II	58,5	0,40	8,48	1 x 3,6
3	Santana	58,0	0,30	5,44	1x 7,2
4	Macapá I	57,2	instantânea	5,06	1 x 1,8
5	Macapá I	57,2	1,3	9,62	1 x 5,4

Tabela 5.9 – Tempo total para abertura dos disjuntores

DISJUNTORES 13,8 KV			
Subestação	Tempo de Abertura (s)	Função Subfrequência (s)	Tempo total (s)
Equatorial	0,048	0,040	0,088
Macapá II	0,080	0,060	0,140
Santana	0,050	0,040	0,090
Macapá I	0,110	0,050	0,160
Macapá I	0,050	0,040	0,090

5.3.3. Dados obtidos no programa elaborado

Serão simulados cinco casos diferentes de perda de geração. Esses dados são apresentados na tabela 5.10 abaixo.

Tabela 5.10 – Perdas de geração que serão simuladas

SITUAÇÃO	UNIDADE GERADORA PERDIDA	GERAÇÃO PERDIDA (MW)	GERAÇÃO PERDIDA SOBRE GERAÇÃO
1	UGH03	27,00	23,85
2	1 UGH	20,00	17,67
3	2 UGH	47,00	41,52

4	1 UGD	15,00	13,25
5	3 UGD	45,00	39,75
6	1 UGG	6,00	5,30

5.3.4. Comparação dos dados com o ERAC atual para o Sistema Isolado do Amapá

Os casos simulados com o ERAC proposto no programa Anatem forneceram como resultados os apresentados na tabela 5.11 abaixo.

Tabela 5.11 – Resultados obtidos no Anatem

SITUAÇÃO	TAXA (df/dt)	FREQÜÊNCIA MÍNIMA	GRUPOS ATUADOS
1	2,65	58,37	1
2	2,00	58,50	1
3	6,92	57,42	1, 2 e 3
4	1,02	58,81	-
5	3,53	57,12	1 a 4
6	0,55	59,49	-

Fazendo a simulação do ERAC no programa proposto, utilizando como dados a tabela abaixo.

Tabela 5.12 – Dados de entrada

SITUAÇÃO	GERAÇÃO PERDIDA (MW)	CONTANTE DE INERCIA EQUIVALENTE DA GERAÇÃO RESTANTE (pu base 100MW)
1	27	0,75
2	20	1,05
3	47	0,54
4	15	1,25
5	45	0,54
6	6	1,86

Os resultados obtidos estão resumidos na tabela abaixo.

Tabela 5.13 – Resultados obtidos no programa proposto

SITUAÇÃO	FREQÜÊNCIA MÍNIMA	GRUPOS ATUADOS
1	58,07	1 e 2
2	58,13	1 e 2
3	57,1	1 a 3
4	58,81	1 e 2

5	57,08	1 a 4
6	58,9	—

Analisando-se os resultados, nota-se, em todas as simulações, que mais grupos foram desligados no programa proposto em relação ao fornecido pelo Anatem. Isto se deve, principalmente, pelo fato de o Anatem levar em consideração nos seus cálculos os modelos dos reguladores.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio das simulações feitas nos exemplos do capítulo 5, nota-se que os dados do programa desenvolvido neste projeto são compatíveis com os esperados teoricamente.

Existe o decréscimo da frequência, quando da perda de geração, e essa queda é atenuada quando há desligamento de blocos de carga.

Os exemplos apresentados, também, mostram que os resultados são compatíveis com os informados nos programas que forneceram os dados para a comparação.

Como o programa desenvolvido não leva em consideração os modelos dos reguladores das máquinas, seus dados serão mais precisos quando o sistema está sem reserva girante.

Pode-se afirmar que este programa será uma ferramenta útil na elaboração de ERACs, uma vez que fornecerá os dados iniciais ou o “pior caso” para a análise e para os ajustes posteriores em programas mais elaborados.

É proposta, para trabalhos futuros, a implementação, no código do programa, de métodos que permitam a entrada dos modelos dos reguladores das máquinas. Isso aumentaria sua eficiência e utilidade. Entretanto, como já existem programas como o Anatem, que já trabalha com modelos de reguladores e estes são consideravelmente complexos, pode ser interessante que o programa desenvolvido neste projeto não use tais modelos, visto que diminuirá o esforço aplicado em simulações mais precisas, a fim de se obter os ajustes necessários para casos mais pessimistas, na implementação de um ERAC, sendo de maior utilidade como uma ferramenta auxiliar para programas mais elaborados.

Melhorias na parte de visualização e implementação dos resultados poderão ser feitas, à medida que se desenvolvem mais componentes para a linguagem de programação Delphi, que é a linguagem utilizada na elaboração deste programa.

REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TEIXEIRA, RICARDO MARCELO. *Análise e Aperfeiçoamento do Esquema de Controle de Emergências do Tipo Esquema Regional de Alívio de Carga por SUBFREQUÊNCIA*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica UnB, 2003.
- [2] DALZIEL, C. F., STEINBACK E. W.. *Underfrequency Protection of Power Systems for System Relief*. IEEE Paper 59806, 1959.
- [3] SOUSA, EDUARDO CASTROVIEJO. *Programa Varf-V – Estudos de Esquemas de Conservação de Carga – Manual de Utilização*. Nota Técnica Eletronorte 00SE-03/90, 1990.
- [4] CAMARGO, I.M.T.. *Estabilidade de Sistemas de Potência*. Material Didático UnB/Eletróbrás/Prodespo, 2000.
- [5] BERDY, J.. *Load Shedding – Application Guide*. Publicação interna da General Electric CO.
- [6] CARVALHO, FAIÇAL FARHAT DE. *Delphi 6: Programação voltada a objeto*, Editora Érica, 2001.
- [7] SONNINO, BRUNO. *Desenvolvendo Aplicação com Delphi 6*, Makron Books, 2001.
- [8] ONS. *Procedimentos de Rede – Módulo 3: Aceso aos Sistemas de Transmissão*. Rio de Janeiro, abril de 2001.
- [9] PARFIJANOWITSCH, H.. *Aplicação de Computadores Digitais em Estudos de Esquemas de Conservação de Carga – Apresentação no III Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.

ANEXOS

ANEXO I – ALGORITMO DO PROGRAMA

Programa: CalcSub

Declare variáveis: TE, FI, DELT, H, cc, BMVA, GT, GP, Fmaior, Fmenor, GR, SBC, CONST, n, TOD, menorF, TEMx, TEMy, maiorF, FW; **reais.**

u, i, j, k, s, z; **inteiras.**

FR[i], TR[i], PR[i], Z[i], TV[i], FX[i], FY[i], INTO[i], TX[i]; **vetor de reais**

onde i: 1 → u.

F[n], TEMPO[n], DF[n], TG[n], TC[n], TFmaior[n], TFmenor[n]; **vetor de**

reais onde n: 0 → z.

TE ← ‘*’, ! recebe dos dados de entrada o tempo de simulação.

DELTR ← ‘*’, ! recebe dos dados de entrada o tempo de cálculo.

$z \leftarrow \frac{TE}{DELTR}$, ! cálculo do nº de iterações que o programa fará.

n ← 0, ! fator de iteração do vetor: armazenamento de frequências.

TFmaior [n] ← 0, ! recebe o tempo que a frequência ficou acima da permitida.

! para a 1º iteração recebe o valor 0.

TFmenor [n] ← 0, ! recebe o tempo que a frequência ficou abaixo da permitida.

! para a 1º iteração recebe o valor 0.

TEMPO [n] ← 0, ! recebe o tempo em que o programa está em execução.

DF[n] ← 0, ! recebe a taxa de variação para cada iteração.

TG[n] ← 1, ! recebe o conjugado mecânico da geração .

! para a 1º iteração recebe 1.

GT ← ‘*’, ! recebe dos dados de entrada a geração total.

GP ← ‘*’, ! recebe dos dados de entrada a geração perdida.

GR ← GT - GP, ! geração restante.

$TC[n] \leftarrow \frac{GT}{GR}$, ! sobrecarga imposta.

! e valor do conjugado elétrico da carga para a 1º iteração.

$SBC \leftarrow (TC[n] - 1) \times 100$, ! sobrecarga imposta em %.

H ← ‘*’, ! constante de inércia equivalente das

! máquinas restantes colocadas na mesma base.

BMVA ← ‘*’, ! base utilizada no cálculo da constante de inércia equivalente.

$H \leftarrow \frac{H \times BMVA}{GR}$, ! constante de inércia em ‘pu’ cuja base é GR.

j ← 0, ! desabilita cálculo de tempo para abertura de relé.

FI ← ‘*’, ! recebe dos dados iniciais o valor da frequência inicial.

F[n] ← FI, ! valor da frequência inicial para a 1º iteração recebe o valor da
! frequência inicial.

$CONST \leftarrow \frac{FI}{2H}$, ! valor do fator de multiplicação da fórmula frequência x tempo

i ← 1, ! fator de iteração dos vetores de iteração relé.

INTO[i] ← 0, ! recebe o instante em que ocorre o desligamento do grupo ‘i’.

TX[i] ← 0, ! vetor que recebe a taxa de variação do relé ‘i’.

TOD ← 0, ! tempo decorrido desde de que ocorreu o disparo do relé.

Execute: PROCEDIMENTO I,

Escreva: F[n], TEMPO[n], DF[n], TG[n], TC[n], TFmaior[n], TFmenor[n]; **vetor** onde n: 0 → z.

Escreva: INTO[i], TX[i]; **vetor** onde i: 1 → u.

Escreva: menorF, maiorF;

FIM PROGRAMA

PROCEDIMENTO I: Cálculo das frequências x tempo.

Repita

leia: n,

se: n > z,

então: **INTERROMPA**,

fim

leia: TEMPO[n], F[n], TC[n], i, TG[n], CONST,

$F[n+1] \leftarrow F[n] + \text{CONST} \times (TG[n] - TC[n]) \times \text{DELT}$, ! equação frequência x tempo.

$DF[n+1] \leftarrow \frac{F[n+1] - F[n]}{\text{DELT}}$, ! cálculo da taxa de variação.

$TG[n+1] \leftarrow TG[n] \times \frac{F[n]}{F[n+1]}$, ! novo valor de TG para a próxima iteração.

$\text{TEMPO}[n+1] \leftarrow \text{TEMPO}[n] + \text{DELT}$, ! incremento do tempo.

Fmaior \leftarrow '*', ! máxima frequência permitida.

Fmenor \leftarrow '*', ! o valor da mínima frequência permitida.

cc \leftarrow '*', ! a constante de amortecimento da carga.

se: F[n+1] > Fmaior,

executar: **PROCEDIMENTO II**,

fim

se: F[n+1] < Fmenor,

executar: **PROCEDIMENTO III**,

fim

k \leftarrow 0, ! habilita cálculo do TC no intervalo em que não há desligamento de carga.

Z[i] \leftarrow '*', ! recebe dos dados de entrada o tipo de relé 'i'.

! onde 1: frequência absoluta e 2: taxa de variação.

FR[i] \leftarrow '*', ! recebe a frequência absoluta do relé 'i'.

TR[i] \leftarrow '*', ! recebe o tempo de retardo do relé 'i'.

se: Z[i] = 1 $\underline{\text{E}}$ j = 0 $\underline{\text{E}}$ F[n+1] \leq FR[i],

se: j \leftarrow 1,

fim

se: Z[i] = 2 $\underline{\text{E}}$ j = 0,

executar: **PROCEDIMENTO IV**,

fim

se: j = 1,

executar: **PROCEDIMENTO V**,

fim

se: k = 0,

$TC[n+1] \leftarrow TC[n] \times \left(\frac{F[n+1]}{F[n]} \right)^{cc-1}$, ! cálculo do novo valor de TC.

fim

! quando não ocorreu desligamento de carga no intervalo.

se: F[n+1] > F[n],

maiorF \leftarrow F[n+1], ! armazena a maior frequência atingida durante a

fim

! execução do programa.

fim Repita

FIM PROCEDIMENTO

PROCEDIMENTO II: Cálculo da frequência acumulada acima da permitida até o instante n.

TFmaior [n+1] \leftarrow TFmaior [n] + DELT,

FIM PROCEDIMENTO

PROCEDIMENTO III: Cálculo da frequência acumulada abaixo da permitida até o instante n.

TFmenor [n+1] \leftarrow TFmenor[n] + DELT,

se: F[n+1] < F[n],

fim menorF \leftarrow F[n+1],

! armazena a menor frequência atingida.

FIM PROCEDIMENTO

PROCEDIMENTO IV: Disparo do relé de taxa de variação

TV[i] \leftarrow '*',

! recebe dos dados de entrada a taxa de variação do relé 'i'.

FX[i] \leftarrow '*',

! recebe dos dados de entrada a frequência de supervisão do relé 'i'.

s \leftarrow 0,

! permite fixar o tempo e a frequência em que foi superada a

! frequência de corte.

FY[i] \leftarrow '*',

! recebe dos dados de entrada a frequência de corte do relé 'i'.

TX[i] \leftarrow 0,

! vetor que receberá a taxa de variação quando do disparo o relé 'i'.

se: F[n+1] \leq FX[i] \wedge s = 0,

! comparando com a frequência de supervisão.

TEMx \leftarrow TEMPO [n+1],

! armazena o instante em que a frequência fica

! abaixo da frequência de supervisão.

FW \leftarrow F[n+1],

! armazena a frequência no instante em que ficou abaixo da

! frequência de supervisão.

s \leftarrow 1,

fim

se: F[n+1] \leq FY [i],

! comparando com a frequência de corte.

TX[i] \leftarrow [valor absoluto real de] $\left\{ \frac{FW - F[n+1]}{TEMx - TEMPO[n+1]} \right\},$

! taxa de variação

! calculada.

fim

se: TX[i] \geq TV [i]

j \leftarrow 1,

s \leftarrow 0,

fim

FIM PROCEDIMENTO

PROCEDIMENTO V: comparar tempo de disparo com o tempo de retardo

TOD \leftarrow TOD + DELT,
TR[i] \leftarrow ‘*’, ! recebe dos dados de entrada o tempo de retardo do relé ‘i’.

se: TOD \geq TR[i],
executar: PROCEDIMENTO VI

fim

FIM PROCEDIMENTO

PROCEDIMENTO VI: desligamento de carga

INT0 [i] \leftarrow TEMPO [n+1] ! instante em que ocorre abertura do relé.
PR [i] \leftarrow ‘*’, ! recebe dos dados de entrada a
! porcentagem de carga rejeitada.

$$TC[n+1] \leftarrow TC[n] \times \left[\left(\frac{F[n+1]}{F[n]} \right)^{cc-1} - \frac{PR[i]}{100} \times \frac{GT}{GR} \left(\frac{F[n+1]}{FI} \right)^{cc-1} \right], \quad ! \text{ novo valor de TC}$$

! quando da abertura do relé ‘i’.

j \leftarrow 0,
TEMx \leftarrow 0,
TEMy \leftarrow 0,
i \leftarrow i + 1,
k \leftarrow 1

FIM PROCEDIMENTO.

ANEXO II – RESULTADOS EXIBIDOS PELO PROGRAMA VARF-5

A tabela seguinte é uma reprodução do relatório de saída do programa Varf-5

TEMPO SEG	FREQ. HZ	TAXA HZ/SEG	T.GER. PU	T. CARGA PU	A 59 N U. AREA	A 60 N U. AREA	A 60 P U.AREA
0,200	59,668	-1,622	1,005	1,249	0,0	0,035	0,0
TAXA CALCULADA = 1,6383				TAXA AJUSTADA = 0,9000			
0,350	59,429	-1,567	1,010	1,246	0,0	0,104	0,0
FOI REJEITADO O GRUPO I NO INTERVALO ANTERIOR							
0,400	59,372	-1,138	1,010	1,183	0,0	0,134	0,0
TAXA CALCULADA = 1,3700				TAXA AJUSTADA = 0,4000			
0,600	59,149	-1,091	1,014	1,181	0,0	0,284	0,0
0,660	59,084	-1,077	1,015	1,180	0,0	0,337	0,0
FOI REJEITADO O GRUPO II NO INTERVALO ANTERIOR							
0,800	58,992	-0,648	1,017	1,116	0,000	0,472	0,0
1,000	58,865	-0,624	1,019	1,115	0,015	0,687	0,0
1,200	58,743	-0,600	1,021	1,114	0,055	0,927	0,0
1,210	58,737	-0,600	1,021	1,114	0,058	0,939	0,0
FOI REJEITADO O GRUPO III NO INTERVALO ANTERIOR							
1,400	58,701	-0,188	1,022	1,051	0,111	1,183	0,0
1,600	58,564	-0,182	1,023	1,051	0,175	1,447	0,0
1,800	58,628	-0,174	1,023	1,050	0,246	1,718	0,0
2,000	58,594	-0,169	1,024	1,050	0,324	1,996	0,0
2,200	58,561	-0,163	1,024	1,050	0,409	2,280	0,0
2,400	58,529	-0,157	1,025	1,049	0,500	2,572	0,0
2,600	58,498	-0,151	1,026	1,049	0,597	2,869	0,0

2,800	58,468	-0,146	1,026	1,049	0,701	3,173	0,0
3,000	58,440	-0,142	1,027	1,049	0,810	3,482	0,0
3,200	58,412	-0,137	1,027	1,048	0,925	3,797	0,0
3,390	58,386	-0,133	1,027	1,048	1,039	4,101	0,0

FOI REJEITADO O GRUPO IV NO INTERVALO ANTERIOR

3,400	58,390	0,348	1,027	0,973	1,046	4,117	0,0
3,600	58,458	0,337	1,026	0,974	1,160	4,432	0,0
3,800	58,524	0,327	1,025	0,974	1,262	4,734	0,0
4,000							0,0