

UTILIZAÇÃO DO LOAD FLOW

NO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE

POTÊNCIA A MÉDIO PRAZO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Utilização do Load Flow
no Planejamento de Sistemas de
Potência a Médio Prazo

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Rogério Flesch

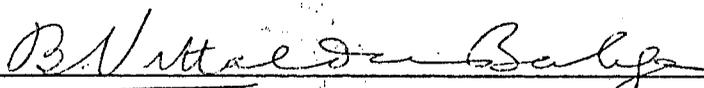
Outubro - 1974

A t e s e

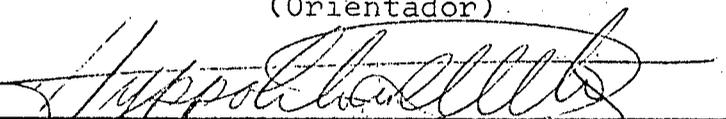
Utilização do Load Flow

no Planejamento de Sistemas de Potência a Médio Prazo

de autoria de Rogerio Flesch, foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciências - Especialidade Engenharia Elétrica, Opção Eletrotécnica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação.

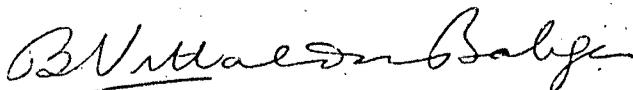

Prof. Bantval Vittaldas Baliga

(Orientador)

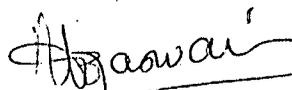

Prof. Hippólito do Vale Pereira Filho

(Integrador do Curso)

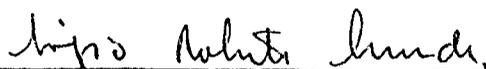
Apresentada perante a banca examinadora composta pelos professores



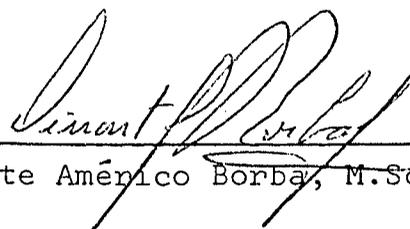
Bantval Vittaldas Baliga, Ph.D.



Rajamani Doraiswami, Ph.D.



Sérgio Roberto Arruda, M.Sc.



Dinarte Américo Borba, M.Sc.

V I T A E

Rogério Flesch, o autor, nasceu a 7 de março de 1949, em Blumenau-SC, onde realizou seus estudos preliminares. Concluiu o curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina, em 1971, tendo sido premiado pela obtenção do primeiro lugar em sua turma. Obteve os créditos de pós-graduação na mesma Universidade.

À Marcia, minha esposa

AGRADECIMENTOS

O autor expressa o seu agradecimento às seguintes entidades e pessoas:

- Dr. Bantval Vittaldas Baliga, pela orientação do trabalho de tese;
- CAPES, pelo auxílio prestado no curso de Pós-Graduação;
- CELESC, pela concessão de recursos materiais e dados do seu sistema;
- Professores componentes da banca examinadora pelas sugestões apresentadas;
- Prof^a Tânia Magnani, pela revisão do texto;
- Acadêmicos Wilmar Silveira Filho e Rita de Cássia Broering Nascimento, pela confecção das figuras e datilografia do trabalho.

Í N D Í C E

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Introdução e Estabelecimento do Problema	1
1.2 - Evolução Histórica	2
1.3 - Objetivo do Planejamento	2
1.4 - Finalidade do Estudo	3
1.5 - Atualização do Planejamento	4
CAPÍTULO II - EMPREGO DA SIMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA	5
2.1 - Load Flow: Preciosa Ferramenta de Simulação	6
2.2 - Sistema Aproximado Para Utilização do Load Flow	10
2.3 - Métodos Para Conduzir o Estudo do Planejamento de um Sistema	12
2.3.1 - Método Intuitivo	12
2.3.2 - Método Intuitivo Combinado Com Técnicas de Otimização	13
2.3.3 - Método Heurístico	14
2.3.4 - Programação Matemática	15
2.3.5 - Miscelânea de Métodos	15
CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO DO SISTEMA	17
3.1 - Introdução	17
3.2 - Sistema de Santa Catarina	17
3.2.1 - Área Norte	17
3.2.2 - Área do Vale	20
3.2.3 - Área da Capital	21
3.2.4 - Área Sul	21
3.2.5 - Área Oeste	21
3.3 - Influência do Sistema Federal	22

CAPÍTULO IV - ESTUDOS BÁSICOS	24
4.1 - Introdução	24
4.2 - Estudos Práticos	25
4.2.1 - Área Norte	25
4.2.2 - Área do Vale	26
4.2.3 - Área Oeste	26
4.2.4 - Área Sul	27
4.2.5 - Área da Capital	27
4.3 - Observações Finais	27
 CAPÍTULO V - ESTUDOS PARA EXPANSÃO DA GERAÇÃO	 29
5.1 - Introdução	29
5.2 - Considerações Gerais	30
5.3 - Simulação	31
5.3.1 - Estudos Preliminares	31
5.3.2 - Decisões Sobre Expansão	34
5.4 - Estudos Práticos	35
5.4.1 - Aumento da Geração Própria	36
5.4.2 - Aumento da Aquisição de Energia	39
5.4.3 - Resumo das Deduções	41
 CAPÍTULO VI - ESTUDOS PARA EXPANSÃO DA REDE	 42
6.1 - Introdução	42
6.2 - Considerações Gerais	42
6.3 - Configurações de Redes	45
6.4 - Simulação	46
6.5 - Estudos Práticos	49
 CAPÍTULO VII - CONCLUSÃO	 53
7.1 - Expansão da Geração	53
7.2 - Expansão da Rede	54
7.3 - Observações Finais	55
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 57

LISTA DE FIGURAS

1.- Sistema de Santa Catarina - Configuração Básica	18
2.- Sistema de Santa Catarina - Representação Geográfica Simplificada	19
3.- Sistema de Santa Catarina - Alterações Básicas até 1980 ..	28
4.- Diagrama de Blocos da Simulação Para Expansão da Geração .	32
5.- Sistema de Santa Catarina - Geração em Salto dos Pilões ..	38
6.- Confiabilidade de uma Linha	44
7.- Diagrama de Blocos da Simulação Para Expansão da Rede	48
8.- Sistema de Santa Catarina - Fechamento de Laços	51

R E S U M O

O crescimento da demanda de um sistema de potência tem duas implicações básicas: expansão da capacidade geradora e expansão da rede. O correto planejamento dos dois aspectos é essencial para a satisfação do consumo no futuro. No presente trabalho é apresentado o emprego da simulação para esta finalidade, com especial ênfase para o *Load Flow*. Assim, o trabalho de planejamento é dividido em: estudos básicos, estudos para expansão da geração e estudos para expansão da rede. Na primeira parte são estudadas as alterações de efeitos localizados, ou seja, aquelas que não modificam mais profundamente o desempenho global do sistema. A seguir são apresentados os estudos para expansão da geração, divididos entre ampliação da geração própria e aumento da aquisição de energia. Se a primeira hipótese é adotada, uma decisão de fundamental importância reside no tipo de usina, sendo tecidas considerações comparativas entre unidades hidráulicas, térmicas e nucleares. Localização e potência são outros aspectos fundamentais da decisão. Na última parte são apresentados os estudos relativos à expansão da rede, objetivando tornar possível o transporte da energia gerada e permitindo o atendimento da demanda dentro dos critérios de segurança, importância e emergência. Aqui são estudadas inclusive as modificações de efeito global, com especial atenção para o fechamento de laços na rede de alta tensão, pelo alcance dos seus efeitos. A teoria desenvolvida é aplicada ao sistema real do Estado de Santa Catarina, sendo apresentadas deduções teóricas e conclusões e recomendações práticas.

A B S T R A C T

The growth of demand in a power utility system has two basic annotations: generation and network expansion. Proper planning of both these aspects is essential for the satisfaction of the consumers in the future. This thesis deals with simulation of such aspects by use of Load Flow. Hence, there are three essential parts for this dissertation: basic studies, expansion studies of generation and network. The first part deals only with small changes that are necessary to satisfy the local loads. Then the generation planning is evaluated, which requires an initial option between increasing power injection from other systems or the utility's own generation capacity. In expanding or building a generating plant it is necessary to state the type of plant, depending on the availability of raw material its location and capacity. This is an intermediate-range problem. The corresponding network expansion is intended to make possible the transportation of the generated power, within the criteria of reliability, security and emergency. Among network modifications the most important is the closing of loops, and so this aspect is dealt with special attention in this thesis. The simulation of these planning aspects have to consider the intermediate range demand forecast as their data. The system performances for both situations are determined by using Load Flow. With the use of the developed theory, a practical example consisting of the real system of the State of Santa Catarina is worked out and finally theoretical deductions and practical conclusions and recommendations are presented.

C A P Í T U L O 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Introdução e Estabelecimento do Problema

Talvez o problema central que as companhias de energia elétrica enfrentam nos dias atuais resida na necessidade de prever as exigências que o crescimento da demanda vai impor ao sistema, e de que maneira este deve ser modificado para se manter em condições de atender à expansão do consumo. Atualmente, os coeficientes de crescimento da demanda são números bastante grandes, apresentando tendência a aumentar ainda mais, graças ao desenvolvimento tecnológico e industrial. A situação chegou a tal ponto que se pode avaliar facilmente o grau de desenvolvimento econômico de uma região pelo seu consumo de energia elétrica, uma vez que estes dois fatores estão intimamente relacionados.

O problema do planejamento seria facilmente resolvido se todos os aspectos que ele envolve fossem passíveis de codificação matemática. Na verdade, porém, o estudo envolve um grande número de diferentes decisões importantes, a maioria das quais de ordem técnica, econômica, financeira e mesmo social, além de muitas outras de menor relevância. Obviamente, nem todos estes aspectos podem ser representados sob forma matemática, para compor uma *função planejamento*, cujo ponto ótimo seria a solução do problema proposto. Pode-se concluir que o trabalho de planejar um sistema nunca poderá ser delegado integralmente a um processamento computacional, com dispensa da participação do engenheiro.

O planejamento de um sistema pode ser realizado de três modos: a curto prazo, a médio prazo e a longo prazo. No presente trabalho, o planejamento a médio prazo enfoca o sistema com antecedência de um a três anos.

Para que a tarefa seja realizada com eficiência é necessário desenvolver ao máximo o potencial homem-máquina. Por um lado

é preciso uma constante evolução do *know-how* disponível, com o aumento da capacidade de análise do sistema e aperfeiçoamento das técnicas computacionais empregadas. De outro lado tem-se o contínuo progresso da tecnologia dos computadores, que possibilita a utilização de máquinas cada vez mais eficientes, tanto em recursos disponíveis quanto em tempo de processamento.

1.2 - Evolução Histórica

Pelos idos de 1920 foi iniciada a simulação de sistemas elétricos por meio de modelos reduzidos, denominados analisadores de rede. Tais equipamentos constam de um grande número de resistências, bobinas, capacitores e fontes, que convenientemente interligados formam o modelo do sistema. Os resultados do procedimento são lidos diretamente em instrumentos de medida acoplados ao modelo.

Em torno de 1940 foi iniciada a utilização de computador digital para a mesma finalidade. Neste, o sistema é simulado matematicamente, por meio de seus parâmetros, e não eletricamente, como no caso anterior. A princípio os computadores apresentavam poucos recursos, pelo que os analisadores ainda continuaram em evidência por longo tempo. De lá para cá, entretanto, a par do enorme progresso da tecnologia do processamento eletrônico, houve uma busca incessante de melhores métodos de solução do problema matemático e de técnicas de programação cada vez mais sofisticadas. Além disto, o desenvolvimento de sistemas de porte cada vez maior foi dificultando em muito a montagem do modelo físico, bem como exigindo esquemas de planejamento bem mais complexos do que simplesmente analisar o desempenho do sistema para uma dada situação. Deste modo, nos dias atuais, os analisadores estão praticamente relegados a uma condição de importância apenas histórica.

1.3 - Objetivo do Planejamento

A construção de uma nova usina ou a montagem de uma grande

subestação costuma levar no mínimo cinco anos, donde a grande importância da previsão a longo prazo. Existem casos de erros em torno de 30% na determinação da potência de uma usina, sendo fácil imaginar a urgência com que a geração e a rede precisam ser expandidas num caso destes. Sendo esta expansão o principal aspecto do planejamento, é conveniente realizar um estudo anual, inclusive devido à instalação de cargas não previstas anteriormente.

Enquanto a previsão a longo prazo inclui um grande número de variáveis a serem simuladas, o trabalho para curto prazo é relativamente simples. Por outro lado, uma cuidadosa avaliação a longo prazo reveste-se de muito maior importância. Um método para minimizar o seu erro consiste em acompanhar constantemente o sistema para, através de um planejamento a médio prazo, modificá-lo com respeito à geração e à rede.

1.4 - Finalidade do Estudo

O presente estudo visa a desenvolver a utilização do *Load Flow* no planejamento de um sistema elétrico de potência a médio prazo. No capítulo 2 é apresentado o emprego da simulação para esta finalidade, com especial ênfase para o processo conhecido como *Load Flow*, sendo descritas ainda as simplificações que o sistema admite para a real utilização do programa, bem como os métodos para conduzir o estudo de planejamento. No capítulo 3 é descrito detalhadamente o sistema utilizado para modelo no presente trabalho. No capítulo 4 são mostradas as modificações básicas a serem introduzidas no sistema a fim de que a demanda possa ser satisfeita. Neste ponto são estudadas somente alterações de efeitos localizados, isto é, providências que não se refletem mais profundamente sobre o sistema global. No capítulo 5 são apresentados os estudos para expansão da geração, divididos entre ampliação da geração própria e da aquisição de energia. Se a primeira hipótese é adotada, a decisão inicial reside no tipo de usina, que poderá ser hidráulica, térmica ou nuclear, dependendo das disponibilidades de matéria prima e demais condições locais. Localização e potência são outros aspectos fundamentais do problema. No capítulo 6 são apresentados os estudos sobre a expansão da rede, sendo es-

tudadas especialmente as modificações de efeito global, com destaque para o fechamento de laços na rede de alta tensão, pela importância dos seus efeitos.

1.5 - Atualização do Planejamento

Ainda que um trabalho de planejamento seja criteriosamente elaborado, persiste a necessidade de um acompanhamento permanente do comportamento do sistema. É óbvio que a previsão da demanda nunca irá corresponder exatamente à realidade, além de os parâmetros do sistema sempre conterem algum erro de medida ou de avaliação. Assim, sempre haverá discrepâncias entre o desempenho previsto e o observado, sendo necessário acompanhar constantemente o sistema, para que inclusive seja possível providenciar alterações do planejamento realizado. Também aqui o computador desempenha papel fundamental, permitindo que, através da simulação do sistema, possam ser realizadas as verificações necessárias e planejadas as modificações requeridas. Sob este aspecto, o planejamento a médio prazo pode ser encarado como u'a modificação posterior para o planejamento a longo prazo.

Além do projeto de configurações, o planejamento de um sistema envolve estudos de estabilidade, proteção e muitos outros aspectos. Este trabalho, entretanto, visa tão somente à obtenção de configurações futuras através da expansão da rede e do aumento da capacidade geradora do sistema, com base nos dados específicos da previsão a médio prazo.

C A P Í T U L O 2

EMPREGO DA SIMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO

DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA

O objetivo deste capítulo é apresentar o roteiro a ser utilizado no planejamento de um sistema elétrico, com o emprego da simulação em computador digital. É mostrada ainda a principal ferramenta de simulação disponível para tal fim, bem como as simplificações que o sistema admite para a sua efetiva utilização.

Entende-se por simulação o desenvolvimento de modelos para observar sistemas ou fenômenos físicos que, por questões de conveniência, economia, problema de escala e outros, não podem ser observados diretamente^{1,2,3}

No desenvolvimento de um modelo de simulação aparecem dois tipos de variáveis⁴: exógenas e endógenas. Exógenas são as variáveis pré-determinadas, basicamente os dados do problema; endógenas são aquelas que o desenvolvimento da simulação irá determinar. A validade dos resultados para o segundo tipo de variável depende da veracidade dos dados⁵ disponíveis para o primeiro. No caso de um sistema elétrico, é óbvio que a confiança depositada em um estudo de planejamento depende em primeiro lugar da exatidão dos dados de previsão de carga. Supõe-se que a previsão seja suficientemente acurada, já que os erros de previsão, sendo cumulativos, causariam grandes alterações do planejamento. Esta é uma das variáveis exógenas do presente estudo.

2.1 - Load Flow: Preciosa Ferramenta de Simulação⁶

Há longo tempo a simulação de sistemas físicos através de modelos matemáticos é utilizada para o estabelecimento do desempenho de sistemas sob as mais diversas condições. No caso de um sistema elétrico de potência, esta simulação é realizada por meio do processo iterativo conhecido como *Load Flow*, cuja finalidade é de terminar o desempenho do sistema sob carga.

A idéia básica do método consiste em utilizar uma determinada situação como ponto de partida, verificando o comportamento do sistema para tais condições. Dispondo dos resultados deste caso básico, desenvolve-se uma série de hipóteses, repetindo-se o procedimento para cada uma delas. Esta série de hipóteses consiste principalmente de alterações na configuração da rede, na geração e na demanda, bem como de instalação de compensação reativa.

Para o estabelecimento do sistema básico, há necessidade de conhecer quase todas as características do mesmo, tais como dados de geradores, de linhas de transmissão, de transformadores, de cargas e de equipamentos de compensação reativa. As características transitórias⁷ do sistema não são consideradas, porque o *Load Flow* supõe operação em regime permanente.

A determinação do desempenho consiste praticamente da solução de um sistema de equações, que permite o conhecimento da tensão em cada barramento e do fluxo de potência em cada linha ou transformador. Estas duas grandezas estão intimamente ligadas, podendo-se reduzir o problema à determinação de uma delas.

O cálculo das tensões⁸ pode ser realizado através da resolução do sistema de equações:

$$V_p = \left[\frac{(P-jQ)_p}{V_p^*} - \sum_q Y^{pq} V_q \right] Z_{pp} \quad (1)$$

onde:

$$Z_{pp} = \frac{1}{Y^{pq} + Y^{gp}} \quad (2)$$

V_p = tensão no barramento p,

P_p = potência líquida injetada no sistema pela barra p,

Q_p = idem para a potência reativa,

Y^{Pq} = admitância da linha que une os barramentos p - q,

V_q = tensão no barramento q,

Y^{GP} = admitância à terra no barramento p.

Para ter a potência em forma explícita⁹, pode-se escrever:

$$P_p = V_p \sum_q V_q Y^{Pq} \cos(\theta_p - \theta_q - \phi_{pq}) \quad (3)$$

$$Q_p = V_p \sum_q V_q Y^{Pq} \text{sen}(\theta_p - \theta_q - \phi_{pq}) \quad (4)$$

onde: θ_p = ângulo de fase da tensão na barra p, arbitrado igual a zero o mesmo ângulo para a barra de compensação,

ϕ_{pq} = ângulo de fase dos elementos do ramo p - q na matriz de admitância.

De qualquer maneira, para definir um sistema será necessário determinar em primeiro lugar a matriz de impedância (Z_{BARRAS}), ou a de admitância (Y_{BARRAS}), para o que existem vários métodos¹⁰, entre os quais a utilização da teoria de grafos e a adição de elementos *step by step*.

Considerando o sistema definido pelas equações (3) e (4), observam-se como valores a determinar a potência ativa e reativa e o módulo e ângulo de fase da tensão em cada barramento. Como a potência está indicada em forma de valores líquidos, isto é, diferença entre potência gerada e consumida, existem seis incógnitas e duas equações para cada barramento. O sistema de equações assim formado não tem solução única, sendo necessário fixar valores para quatro incógnitas e calcular as outras duas. Dependendo de quais as incógnitas fixadas e quais as calculadas, uma barra pode ser classificada como de carga, de geração ou de compensação, conforme será visto no item seguinte.

Os principais métodos computacionais¹⁰ disponíveis para resolução do sistema de equações são os métodos iterativos de Gauss,

Gauss-Seidel, Newton-Raphson e relaxação. Há vários anos vem sendo desenvolvidas modificações para aperfeiçoar o emprego destes métodos. Entre elas está o emprego de fatores de aceleração, para diminuir o número de iterações necessárias para a convergência. Outra técnica importante consiste em tirar partido da esparsidade das matrizes utilizadas, possibilitando sensível redução nas exigências de memória do computador.

Dentre os métodos citados, o de Gauss pode ser imediatamente abandonado em favor do de Gauss-Seidel, uma vez que eles são absolutamente idênticos, com exceção do número de iterações, e conseqüentemente do tempo de computação, que é maior no primeiro caso. O método da relaxação também não é utilizado, pois requer maior número de iterações, além de maior número de operações matemáticas em cada iteração.

O método de Newton-Raphson tem o inconveniente de envolver operações com um jacobiano em cada iteração, redundando em maior complexidade e tempo de computação. Por este motivo deixa de ser utilizado, apesar de geralmente apresentar maior probabilidade e rapidez de convergência.

Desta maneira, é usual o emprego do método de Gauss-Seidel, utilizando matriz de admitância. Esta decisão se baseia na simplicidade de execução, rapidez e probabilidade de convergência. O emprego da matriz de admitância se justifica por esta ser uma matriz pouco povoada, diminuindo o número de operações por iteração, o gasto de memória e o tempo de processamento. Além disto, quando se processa uma série de casos, em que cada um é derivação do anterior, para atualização dos valores dos elementos matriciais basta recalcular os elementos da matriz associados com os ramos modificados, mantendo-se os demais valores.

A matriz de impedância, por seu turno, permite um procedimento simples, porém leva a maior número de operações por iteração, por ser densamente povoada. Neste caso, o tempo de processamento cresce com o quadrado do número de barramentos do sistema. A matriz de laços, por outro lado, tem estas mesmas desvantagens, além de requerer maior número de operações aritméticas e lógicas para relacionar os laços com os barramentos.

Mesmo com a escolha cuidadosa do método não há garantia de convergência para a solução do problema. No trabalho cotidiano a-

parecem muitos casos de não convergência, principalmente quando o sistema se aproxima do limiar de estabilidade¹¹. Deve-se notar, entretanto, que a não convergência não indica necessariamente instabilidade do sistema. O fato de um determinado procedimento divergir da solução de uma equação, ou de um sistema de equações, geralmente indica que o método não se aplica à equação ou sistema, e não que as raízes inexistam. No caso de um sistema de equações, uma regra mais ou menos grosseira de convergência exige que os elementos da diagonal da matriz coeficiente sejam maiores que os demais elementos. No caso de não convergência, durante o desenvolvimento do processo, as variáveis endógenas das equações acima tomam valores totalmente distanciados da realidade, aparecendo tensões da ordem de 500%, ângulos de tensão de 200° e outras incoerências. Assim, apesar de o *Load Flow* em computador digital ter sido exaustivamente desenvolvido nos últimos vinte anos¹², ele continua sendo um assunto atual e de grande interesse, justificando plenamente a pesquisa de novos métodos e o aprimoramento dos já existentes. Merecem citação o uso de computação híbrida¹³, o método de Newton modificado¹⁴, o processo do gradiente reduzido¹⁵ e a utilização da matriz hessiana¹⁶.

Os analisadores de rede¹⁷ constituem outro subsídio que já foi largamente utilizado para estudos de fluxo de carga. Eles têm a vantagem de simular fisicamente o sistema, permitindo melhor observação do ponto de vista físico. Além disto, não apresentam problemas de convergência. Mesmo assim foram perdendo terreno para os processos digitais que apresentam principalmente as seguintes vantagens: facilidade na preparação dos dados, impressão dos resultados pelo próprio computador, facilidade e rapidez na execução de alterações, restrições muito menos rígidas quanto ao tamanho do sistema e utilização do equipamento de simulação praticamente restrita ao tempo de execução do programa. Estas características permitem maior eficiência e menor custo operacional.

Também existe atualmente um método aproximado¹⁸ para determinação dos fluxos de potência ativa nas diversas linhas de um sistema. O processo é baseado em uma série de simplificações, visando linearizar o sistema de equações, que assim dispensa métodos iterativos de solução. O método pode ser empregado como uma aproximação grosseira do *Load Flow* convencional.

Observe-se que a execução de um programa de fluxo de carga leva apenas ao conhecimento de uma determinada situação dentro do sistema. Para se chegar a conclusões realmente valiosas é necessário realizar o estudo de um grande número de casos, cada qual sendo u'a modificação do anterior. Após um minucioso trabalho de análise e comparação entre os vários casos, muitos dos quais são abandonados no meio do caminho, por se apresentarem de todo inconvenientes, completa-se um estudo de fluxo de carga.

Tal estudo é uma das ferramentas indispensáveis para o estabelecimento de condições ótimas de operação, planejamento da rede, expansão da geração, análise do efeito do crescimento da demanda, dimensionamento dos equipamentos de proteção e muitas outras observações que podem ser tiradas do procedimento descrito.

2.2 - Sistema Aproximado Para Utilização do Load Flow

Existem várias simplificações que podem ser introduzidas em um sistema elétrico de potência para fins de estudos de fluxo de carga. O emprego destas simplificações leva à obtenção do sistema aproximado para utilização do *Load Flow*.

A primeira providência, que não chega a ser propriamente uma simplificação, consiste em redefinir as unidades elétricas utilizadas, pelo uso do sistema *per unit* (p.u.). A finalidade deste sistema é conduzir as grandezas a uma faixa relativamente estreita de valores, evitando assim o manuseio de números muito grandes ou muito pequenos. Deste modo, os campos de entrada e de saída dos dados e dos resultados do programa independem do tamanho do sistema a ser analisado.

A representação de um sistema elétrico para estudos de fluxo de carga não leva em conta as características transitórias, pois o programa foi desenvolvido para determinação do desempenho em regime permanente, no qual tais características não apresentam importância. Os geradores, por exemplo, são considerados máquinas ideais, capazes de entregar determinada quantidade de potência ativa e reativa para o sistema. Além disto, o programa supõe que o sistema seja balanceado. As condições de estabilidade também não são analisadas, dado o pressuposto de que o sistema seja estável.

Ao contrário do que poderia parecer à primeira vista, as

simplificações citadas no parágrafo anterior não podem ser consideradas como restrições do programa. Para estudos de planejamento, há interesse justamente na operação em regime permanente, estável e com equilíbrio de fases.

Supõe-se ainda que a potência consumida em cada barramento dependa apenas da carga a ser alimentada, e não da regulação que o sistema apresente naquele ponto.

Os barramentos que compõem o sistema podem ser classificados⁷ de acordo com três categorias: barra de carga, barra de tensão controlada e barra de compensação (*swing bus*).

Barra de carga é aquela que apresenta valores fixos para as potências ativa e reativa líquidas, determinando-se pelo programa o módulo e o ângulo da tensão. Integram esta categoria todos os barramentos que não possuem geração, conforme o próprio nome sugere.

A barra de tensão controlada, ou de geração, apresenta potência líquida e módulo da tensão previamente estabelecidos, restando determinar o ângulo de fase da tensão e a quantidade necessária de reativos para manter a tensão desejada, desde que esta quantidade atenda às limitações de capacidade da usina. Cabem nesta classe todos os barramentos conectados a geradores, exceto a barra de compensação, que constitui categoria à parte.

A barra de compensação é encarregada de garantir o fechamento do balanço energético do sistema. Neste caso, são especificados o módulo e o ângulo de fase da tensão, ficando a cargo do programa o cálculo da geração ativa e reativa para fechar o balanço de energia. Este barramento não pode estar sujeito a restrições de capacidade de geração, devido às características a que se presta. Para tanto, a escolha deve recair em local que possua uma grande usina ou que seja um ponto de injeção maciça de potência. Um ponto de injeção de potência é representado simplesmente por um gerador pois, para os fins deste estudo, eles são funcionalmente idênticos, já que ambos têm a função de fornecer potência ao sistema. Em termos reais, é desprezível o erro que esta simplificação introduz no processo.

Quando se deseja fixar a tensão em uma barra de carga, pode-se transformá-la em barra de geração. Para tanto, supõe-se que o barramento está conectado a um compensador síncrono de potência

ilimitada.

A simplificação mais importante consiste em não considerar a rede de distribuição, cujas tensões normalmente estão situadas na faixa de 220 V a 23 KV, no caso do sistema empregado neste trabalho. A demanda do sistema de distribuição é geralmente representada por uma carga na subestação que a alimenta. Esta simplificação é de enorme importância, uma vez que a distribuição costuma possuir um número muito grande de barramentos e a sua inclusão num processo iterativo iria acarretar enorme desperdício de tempo de processamento. Além disto, o desempenho desta parte do sistema pode ser facilmente determinado por inspeção, em uma análise à parte.

Algumas vezes, no entanto, é necessário um estudo mais minucioso de algum ponto da distribuição, em conjunto com todo o sistema. Neste caso, opta-se por sua inclusão no processo iterativo. Este procedimento foi adotado em uma pequena parte do sistema exemplo do presente trabalho, conforme será visto no capítulo seguinte.

2.3 - Métodos Para Conduzir o Estudo do Planejamento de um Sistema¹⁹

Existem basicamente quatro maneiras de conduzir o estudo de planejamento de um sistema elétrico de potência: método intuitivo, método intuitivo combinado com técnicas de otimização, método heurístico e programação matemática.

2.3.1 - Método Intuitivo

É muito difícil, talvez impossível, descrever com exatidão como se procede o estudo utilizando o processo intuitivo. Partindo de uma situação existente, ou suposta como tal, faz-se uma análise do sistema, área por área, ou ponto por ponto, verificando-se o desempenho em cada um deles. Executam-se então as alterações julgadas convenientes para melhoria do desempenho do sistema nos pontos em que ele não é satisfatório e retorna-se ao ponto de partida. O processo é assim repetido até que sejam alcançadas condições satisfatórias para todo o sistema.

Se for constatado, por exemplo, que os níveis de tensão em determinada área são muito baixos, ou que as perdas de potência são muito acentuadas, procura-se corrigir a situação de acordo com os fatores que a causam e com os meios disponíveis para solucionar o problema. Recorre-se à duplicação de linhas, compensação reativa, alteração de taps ou da capacidade de transformadores e outras medidas corretivas. A seguir é analisado o desempenho do sistema global para a nova situação, repetindo-se ou encerrando-se o procedimento de acordo com os resultados obtidos.

Este processo não leva a uma utilização racional do computador, pois geralmente é rodado um caso de cada vez, pela necessidade de análise de seus resultados antes do estabelecimento do caso seguinte. Este é um método de ensaio e erro (*trial and error method*).

Por ser este procedimento bastante subjetivo, é óbvio que o seu encaminhamento depende muito da pessoa que o está utilizando. Assim, se duas ou mais pessoas desenvolvem isoladamente o mesmo projeto, é quase certo que elas chegarão a resultados bastante diferentes. Este método é bastante útil para estudos de planejamento a curto prazo. Obviamente a sua utilização para longo prazo leva a enormes erros, invalidando a solução encontrada.

2.3.2 - Método Intuitivo Combinado com Técnicas de Otimização

Este processo consiste da introdução de técnicas de otimização para racionalizar o procedimento adotado no método intuitivo. Muitas situações supostas convenientes são estabelecidas a priori, de acordo com padrões pré-estabelecidos. Através da simulação em computador digital, o sistema é analisado para cada hipótese, a fim de que sejam determinadas a melhor ou as melhores configurações sob os pontos de vista técnico e econômico.

Neste processo pode ser rodado um grande número de casos de cada vez, possibilitando a racionalização do uso do computador e facilitando o trabalho de análise e comparação dos resultados obtidos. Este método não emprega otimização no verdadeiro sentido da palavra. Entretanto, um engenheiro com razoável vivência do sistema é capaz de estabelecer a priori todas ou quase todas as soluções possíveis. Para fins práticos é razoável admitir que a melhor dentre estas é a solução do problema. Poder-se-ia dizer que

deste modo o processo intuitivo está sendo "otimizado". De qualquer maneira, no entanto, o problema do planejamento a longo prazo não estaria resolvido.

2.3.3 - Método Heurístico

O método heurístico pode ser considerado como um aperfeiçoamento do método descrito no item anterior, com a substituição do procedimento intuitivo por decisões que podem ser pré-estabelecidas e codificadas. No método heurístico são fixadas regras mais ou menos exatas para reger o encaminhamento do estudo.

A técnica geralmente utilizada para o emprego da lógica heurística é a da correção, em cada fase do estudo, do problema mais grave que o sistema apresenta, analisando-se o sistema resultante e corrigindo-se o maior dentre os problemas remanescentes. O procedimento é repetido deste modo até que um desempenho satisfatório seja alcançado.

No caso de um sistema com muitos problemas de regulação, por exemplo, determina-se qual o barramento que está em piores condições de regulação em todo o sistema. Corrige-se (quando possível) esta deficiência através da duplicação de uma ou mais linhas, instalação de compensação reativa, fechamento de laços ou alguma outra providência, dependendo das características do sistema na região problemática. Sanado este problema, analisa-se o sistema completo, repetindo-se o procedimento até que todos os barramentos sejam dentro das condições desejadas.

No exemplo acima foi citado apenas um tipo de problema, qual seja, o da regulação do sistema. A lógica do procedimento, no entanto, é válida para qualquer situação que possa se apresentar.

Duas observações merecem destaque. Muitas vezes a correção de uma deficiência tem como consequência a correção de outras. A correção da regulação no extremo de um radial é um exemplo típico. Obviamente ela introduz melhoras na regulação de todo o radial. Ocorre também, com menor frequência, que correções em um ponto do sistema se refletem negativamente em outro ponto, piorando as suas condições de operação. Por este motivo, cada passo do método heurístico só é conhecido após a completa realização do passo anterior.

A segunda observação de ordem prática é também muito importante para racionalização do trabalho. Por inspeção intuitiva ou por conhecimento da sensibilidade de cada parte do sistema em relação às outras, muitas vezes é possível saber que determinada alteração não vai influir sensivelmente sobre outro ponto não satisfatório. Assim, para efeitos práticos, pode-se admitir que a instalação de um capacitor num barramento não vai se refletir por mais do que quatro ou cinco barramentos vizinhos. O mesmo ocorre com a duplicação de uma pequena linha. Deste modo, pode-se atacar diversos problemas simultaneamente, porém não muitos. Este procedimento melhora em muito a eficiência do processo.

Teoricamente, este método também não apresenta garantia de que seja obtida a solução ótima para o problema. Cabem aqui, no entanto, as mesmas palavras da conclusão do item anterior.

2.3.4 - Programação Matemática

No campo da programação matemática existem vários métodos para conduzir o estudo de planejamento. Entre eles figuram a programação linear e a programação dinâmica, que realmente constituem processos de otimização.

Os métodos matemáticos tem, entretanto, um sério inconveniente. É que eles exigem um grande número de coeficientes e de restrições, o que dificulta bastante a sua aplicação prática. Por este motivo, geralmente estes métodos ficam reservados mais para as áreas didáticas e de pesquisa. A sua utilização prática só é compensadora para grandes sistemas, com muitas alternativas de solução.

Neste trabalho é seguida a mesma filosofia. Os métodos matemáticos não são utilizados, dispensando-se inclusive a sua descrição mais detalhada.

2.3.5 - Miscelânea de Métodos

Todos os métodos apresentados nos itens anteriores apresentam diversas vantagens e desvantagens, dependendo de muitos fatores, inclusive do sistema em si. Por isto é impossível afirmar objetivamente qual o melhor processo a adotar para um estudo de pla

nejamento.

Como já foi citado, a vivência com o sistema capacita o engenheiro a estabelecer um grande número de soluções práticas possíveis. Além disto, a experiência que ele adquire ao longo do trabalho diário com o sistema, desenvolve a sua capacidade de análise intuitiva. Assim, o procedimento a ser adotado depende muito das particularidades de cada caso, não sendo mesmo necessário fixar um único método para todo o estudo. Na prática geralmente é empregada u'a miscelânea de intuição, heurística e otimização.

C A P Í T U L O 3

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

3.1 - Introdução

A finalidade do presente capítulo é fazer uma breve apresentação do sistema utilizado para modelo neste trabalho. O sistema cobre geograficamente quase todo o Estado de Santa Catarina, motivo pelo qual é denominado *Sistema de Santa Catarina*.

Conforme explanação desenvolvida no capítulo anterior, o sistema está bastante simplificado pela omissão de grande número de barramentos de seu diagrama unifilar. Deixaram de ser incluídas todas as barras que não apresentam importância relevante, qualidade caracterizada pela ausência de geração, cargas relativamente pequenas e baixas tensões de operação.

3.2 - Sistema de Santa Catarina²⁹

A figura 1 apresenta o diagrama unifilar do sistema objeto deste trabalho. Na figura 2 é mostrada a sua representação geográfica. Para facilitar o estudo e a visualização, o sistema pode ser dividido elétrica e geograficamente em cinco áreas distintas:

3.2.1 - Área Norte

Tem seu centro de carga na cidade de Joinville (JOI), que lidera uma região altamente industrializada, motivo de sua relevante importância. Compreende ainda São Bento do Sul (BEN), Mafra (MAF), Canoinhas (CAN), Rio Negrinho (NEG), Jaraguá do Sul (JAR), São Francisco do Sul (FCO) e Enseada (ENS). Este último barramento é responsável pela alimentação do terminal marítimo da Petrobrás. A própria cidade de Joinville possui mais duas subestações importantes (SE3 e SE4), nas proximidades das indústrias Han

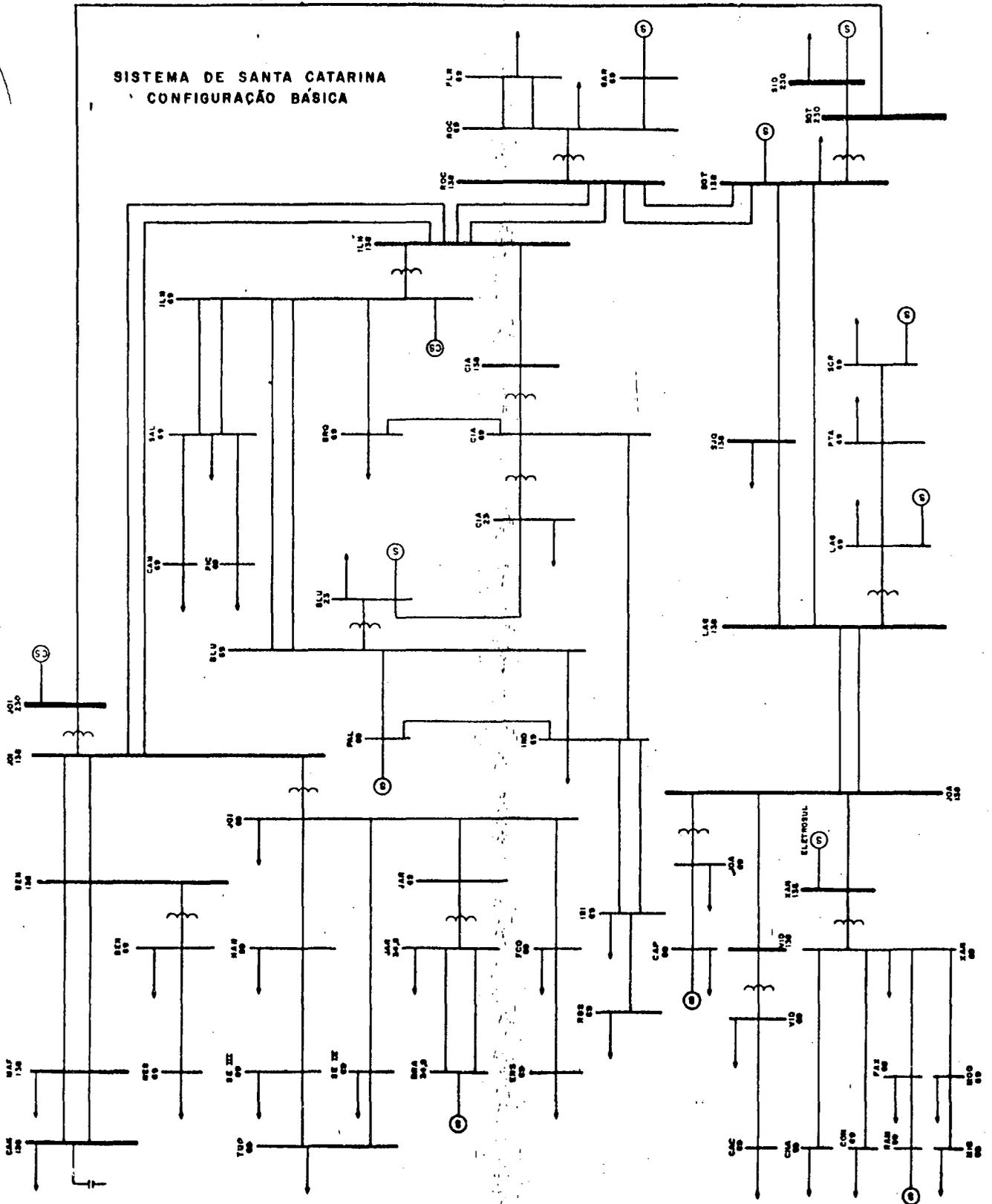
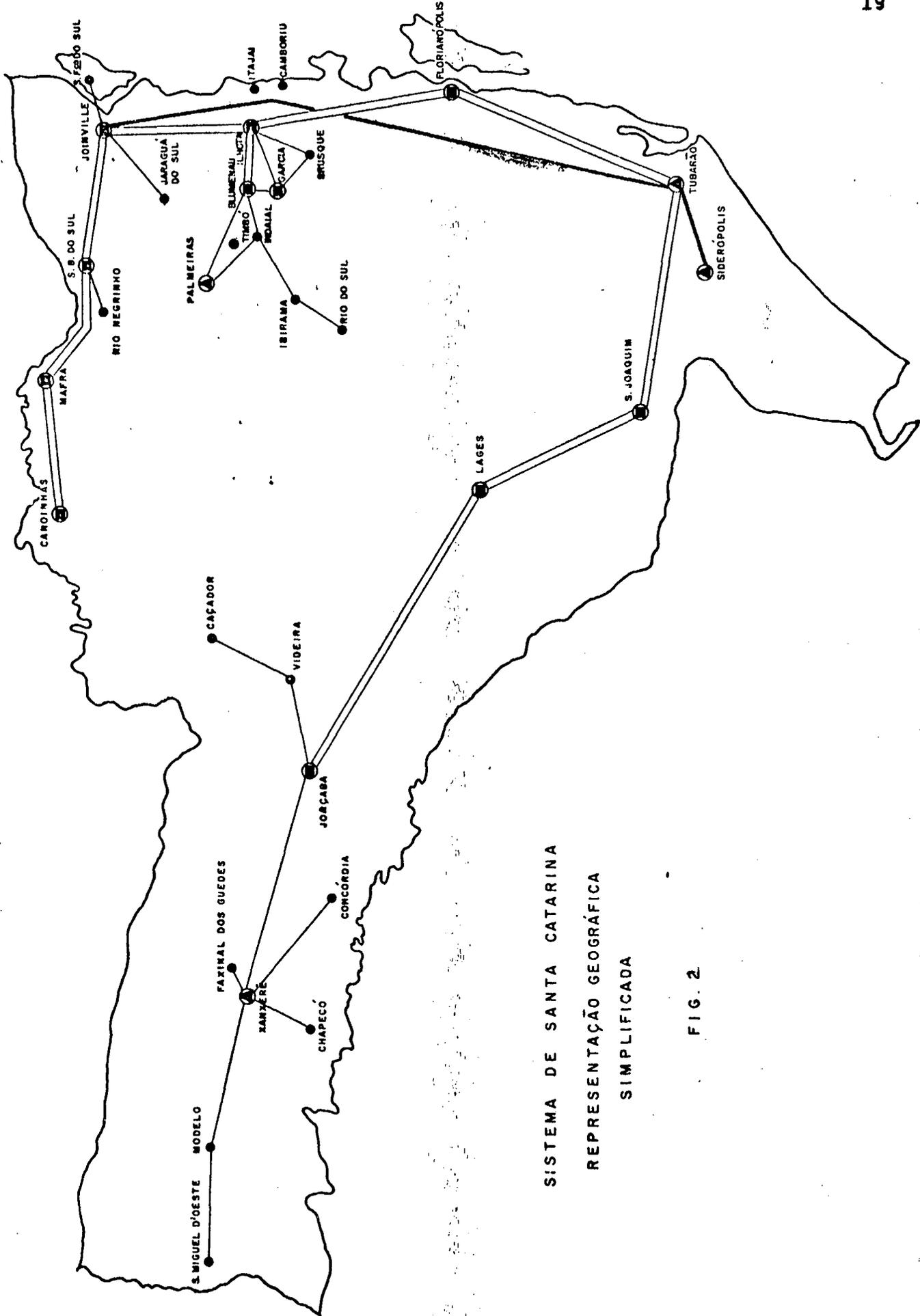


FIG. 1



SISTEMA DE SANTA CATARINA
REPRESENTAÇÃO GEOGRÁFICA
SIMPLIFICADA

FIG. 2

sen (HAN) e Tupi (TUP), que também possuem subestações próprias. A carga total da área é de 120 MW, representando 30% da demanda do sistema.

O diagrama mostra ainda um anel entre os barramentos de Joinville e Tupi. Este anel não existe fisicamente, pois a indústria Tupi é suprida por duas linhas independentes, a partir das subestações SE3 e SE4. O anel foi fechado teoricamente apenas para facilitar a simulação desta parte do sistema, pela suposição de que aquela indústria seja suprida por um único barramento. Também o condensador síncrono em Joinville não existe fisicamente, sendo introduzido no diagrama para indicar que este barramento é de tensão pré-fixada. Esta representação também foi justificada no capítulo anterior.

A carga desta região apresenta um crescimento bastante acelerado, devido à franca expansão da indústria local. Além disto, a carga industrial possui a característica de crescer aos saltos, muitas vezes de forma imprevista, com sérios transtornos para a previsão e o planejamento. Por isto, toda previsão de carga para regiões industriais deve ser encarada com certa reserva.

A geração nesta área consiste de apenas uma pequena usina em Bracinho (BRA). A região é predominantemente serrana, sem potencial hidráulico ou térmico, tornando inviável a geração local.

3.2.2 - Área do Vale

Com centro de carga na cidade de Blumenau (BLU), é segunda região em importância industrial dentro do Estado, apresentando também acentuado desenvolvimento. A principal carga industrial da aquela cidade é devida à indústria têxtil. Além de Garcia (CIA), bairro de Blumenau, compreende as subestações de Ilhota (ILH), Salseiros (SAL), Camboriú (CAM), Piçarras (PIC), Indaial (IND), Ibirama (IBI), Rio do Sul (RDS) e outras menores. Possui uma pequena hidroelétrica em Blumenau e mais duas usinas do mesmo tipo: Palmeiras e Cedros. Devido à pequena distância que separa as duas últimas, elas são consideradas conjuntamente (PAL no diagrama unifilar). A carga total da área é de 110 MW, representando 27% da demanda do sistema.

Esta área pode ser praticamente subdividida em três partes:

o Alto Vale, o Baixo Vale e uma região litorânea. O Alto Vale dispõe de razoável potencial hidráulico, inclusive com possibilidade de um aproveitamento da ordem de 500 MW em Salto dos Pilões²⁸ (PIL), próximo a Ibirama.

3.2.3 - Área da Capital

Esta área compreende a cidade de Florianópolis, capital do Estado, e sua vizinhança. Além de Garcia (GAR), pequena usina de ponta, apresenta apenas dois barramentos no diagrama: Florianópolis (FLN) e Roçado (ROC). O primeiro alimenta a demanda correspondente à Ilha de Santa Catarina e o segundo é encarregado do suprimento do restante da capital e de outras cidades vizinhas. A carga total da área é de 40 MW, representando 10% da demanda do sistema.

A região é absolutamente litorânea e não apresenta potencial hidráulico nem térmico.

3.2.4 - Área Sul

É de vital importância para o sistema, por se constituir em seu centro de geração. Possui a Usina Jorge Lacerda, termoelétrica de 232 MW, a maior unidade do Estado, localizada em Tubarão. Esta cidade, que também é o centro de carga da região, é apresentada no diagrama unifilar como Sotelca (SOT), nome antigo daquela usina. A Área Sul inclui ainda Siderópolis (SID), ponto de interligação e de balanço energético do sistema (barra de compensação). As demais cidades da área são consideradas como supridas pelos barramentos acima citados. A carga total da área é de 45 MW, representando 11% da demanda do sistema.

A atividade econômica básica na região é a mineração de carvão, que atualmente está sendo bastante estimulada. Este é o seu principal fator de desenvolvimento. Por ser uma região predominantemente carbonífera, possui elevada capacidade de geração térmica, não dispondo, entretanto, de potencial hidráulico.

3.2.5 - Área Oeste

Com centro de carga dividido entre Lages (LAG) e Joaçaba

(JOA), inclui ainda São Joaquim (SJQ), Videira (VID), Xanxerê (XAN), Chapecó (CHA), Caçador (CAC), Capinzal (CAP), Concórdia (CON), Faxinal dos Guedes (FAX), Modelo (MOD), São Miguel do Oeste (MIG), Ponte Alta do Sul (PTA), São Cristóvão do Sul (SCR) e outras. A carga total da área é de 90 MW, representando 22% da demanda do sistema.

Na zona de influência de Lages ocorre expansão da indústria do papel. Já na região de Concórdia, Chapecó e Videira, existem indústrias frigoríficas de certo porte, que possuem razoável significação dentro do contexto da Área Oeste.

A região possui somente pequenas hidroelétricas, como a Usina Celso Ramos (RAM), próxima a Faxinal dos Guedes, a Usina Caveiras, em Lages, e as usinas localizadas em São Cristóvão do Sul e Capinzal. Além disto, há em Xanxerê um ponto de interligação do sistema, representado no diagrama por meio de um gerador, conforme observações feitas anteriormente. Existe ainda a possibilidade de um aproveitamento hidráulico²⁸ da ordem de 30 MW nesta cidade. Fora isto, a região não dispõe de grandes rios nem de condições para geração térmica.

3.3 - Influência do Sistema Federal

No item anterior foi descrito o Sistema de Santa Catarina, objeto do presente trabalho. Na realidade ele não é um sistema estanque, fazendo parte de outro mais amplo, aqui denominado *Sistema Federal*, que cobre toda a região sul-brasileira. A interligação do Sistema de Santa Catarina com o restante do Sistema Federal é realizada nos barramentos de Siderópolis, Xanxerê e Joinville.

A subestação de Siderópolis foi escolhida como barra de compensação por apresentar características específicas que a recomendam para esta função. A escolha foi baseada principalmente no fato de a subestação pertencer ao Sistema Federal e possuir grande capacidade, permitindo injeção maciça de potência. Também a sua localização, à pequena distância da maior usina do Estado, facilita a tarefa de efetuar o balanço energético do sistema, pois em muitas situações os efeitos dos dois geradores podem ser considerados em forma conjunta. O inconveniente desta escolha reside no

fato de o centro de geração do sistema recair quase exclusivamente em uma única área. O problema seria superado com a escolha de Joinville para a função, porém neste caso as demais vantagens citadas, deixariam de existir.

Desta maneira, a subestação de Joinville foi considerada somente como ponto de interligação, não havendo inclusive injeção de potência ativa neste ponto. Foi suposta apenas absorção de reativos, para fins de regulação, simulada em computador através de um compensador síncrono.

Na subestação de Xanxerê, por outro lado, existe injeção de potência para suprimento de uma parte da Área Oeste. A existência do ponto de injeção está representada no diagrama unifilar por meio de um gerador.

C A P Í T U L O 4

ESTUDOS BÁSICOS

4.1 - Introdução

O estudo de planejamento de um sistema elétrico visa a lhe oferecer condições de acompanhar satisfatoriamente a expansão da demanda. Ele pode ser dividido basicamente em dois pontos: aumento da capacidade de geração e aumento da capacidade de transporte. O último tópico requer um conjunto de modificações da rede, algumas das quais alteram profundamente a sua constituição, enquanto outras têm efeitos mais ou menos localizados.

O presente capítulo tem por objetivo estudar as modificações que não alteram basicamente a configuração do sistema, sendo a única preocupação o atendimento da carga. Para tanto, faz-se uma análise do crescimento da demanda e seus efeitos sobre o sistema, estabelecendo maneiras para corrigir as falhas que o mesmo apresentar. O sintoma mais característico das incorreções de um sistema são os problemas de regulação, que na maioria das vezes denunciam linhas sobrecarregadas ou necessidade de compensação reativa.

Deste modo, o presente capítulo possui cunho eminentemente prático, sendo constituído quase exclusivamente de simulação. O desenvolvimento do estudo foi baseado na teoria apresentada no capítulo 2. Dentre os métodos descritos, o mais utilizado foi o da lógica heurística, por se tratar de um sistema relativamente pequeno. Foram utilizados os dados de previsão de carga para os anos de 1976, 1978 e 1980, sendo considerados ainda vários acréscimos de 5% sobre estes valores, até o limite de 20% para os dois primeiros casos e de 10% para o terceiro. Tal procedimento visou à análise do desempenho com o aumento progressivo da demanda, per

mitindo uma visualização da sensibilidade do sistema com respeito à carga e garantindo também u'a margem de segurança para o modelo de previsão.

4.2 - Estudos Práticos

O diagrama utilizado para início dos estudos é aquele que foi apresentado no capítulo anterior, mais precisamente na figura 1. O trabalho de simulação conduziu às deduções resumidas a seguir.

4.2.1 - Área Norte

Na Área Norte, o ponto crítico do sistema está no atendimento da indústria Tupi, que possui o barramento de maior carga dentro do Estado, com o agravante de estar situado no extremo de um pequeno radial. As quedas de tensão entre Joinville e Tupi são muito acentuadas, revelando total inconveniência de aquela empresa operar com fator de potência igual a 0,85, valor padrão assumido neste trabalho, e tornando necessária a instalação de compensação reativa. A solução que apresentou os melhores resultados foi a instalação, junto a esta indústria, de compensação reativa da ordem de 20 MVAR, para reduzir ao mínimo o fluxo reativo na linha correspondente. No final da década, entretanto, tal providência será insuficiente para resolver os problemas deste circuito, sendo necessário duplicar a linha JOI-SE4-TUP, que então estará sobrecarregada. O desempenho do sistema no restante da região apresenta-se de modo satisfatório, com exceção da linha que une a Usina Bracinho e Jaraguá do Sul. Esta linha não tem condições para transporte da potência gerada naquela usina, resultando numa regulação bastante falha. Este fato, no entanto, não tem reflexos maiores sobre o resto do sistema. Cabe ainda uma observação importante sobre a linha Joinville-Canoinhas, em 138 KV, circuito duplo. Esta linha foi mantida com as características que possuía na configuração utilizada como ponto de partida para o estudo. Se naquela configuração ela fosse uma linha simples, seria suficiente duplicá-la no trecho Joinville-São Bento do Sul. Desta cidade até Canoinhas o segundo circuito poderá trabalhar a vazio, servindo apenas para fins de compensação reativa, até que o seu concurso se

torne realmente necessário para o sistema.

4.2.2 - Área do Vale

Constitui-se em outra região de grandes problemas. O maior deles decorre da existência de um radial que se estende até Rio do Sul, e que sempre apresenta problemas de regulação. Uma das soluções está no fechamento de um laço, conseguido pela ligação desta cidade com Ponte Alta do Sul. Esta hipótese será discutida em detalhes na parte referente à expansão da rede, no capítulo 6. A solução que aqui se propõe é a compensação reativa, com a instalação de bancos de capacitores ou de um compensador síncrono em Rio do Sul, com injeção reativa da ordem de 10 MVAR neste barramento. Também a região de Salseiros, Camboriú e Piçarras deverá apresentar problemas de regulação ao final da década. Dentre as soluções estudadas, a que parece melhor é a da instalação de compensação reativa da ordem de 5 MVAR em Salseiros e duplicação da linha que liga este local a Camboriú. Outra providência a adotar nesta área é a duplicação de Garcia-Brusque ou Ilhota-Brusque, dependendo de qual das duas linhas deve se constituir no principal alimentador da cidade de Brusque. Mesmo com as correções acima, o desempenho do sistema nesta área sofre muito com o crescimento da carga. Tal fato se deve à grande distância elétrica que separa esta região do Sul do Estado, responsável maior pelo seu suprimento. Este problema se agrava acentuadamente a partir de 1978, tornando inaceitável o desempenho do sistema. A melhor solução para o problema parece ser a ligação, em 230 KV, de Tubarão a Blumenau²⁹, permitindo melhores condições de operação e maior capacidade de transporte de energia entre as duas áreas. Em Tubarão já existe o barramento de 230 KV, e em Blumenau ele seria instalado em Garcia, com transformação para 138 KV.

4.2.3 - Área Oeste

Também apresenta alguns problemas, todos, porém de solução relativamente simples. A linha de transmissão que se estende de Lages a São Cristóvão do Sul não tem condições de operação satisfatória dentro do modelo de previsão utilizado. Deste modo, torna-se necessário duplicar a linha, de Lages até Ponte Alta do Sul. A

lém disto, é possível um controle parcial da tensão nestes locais por meio da mudança do tap do transformador de Lages, contribuindo para melhorar a situação. Também o Extremo-Oeste do Estado tem alguns problemas a resolver. Até 1980 será conveniente providenciar a duplicação das linhas que partem de Xanxerê para Chapecó, Concórdia e Modelo, sendo também aconselhável o emprego de compensação reativa em São Miguel d'Oeste, para melhorar a regulação da linha que aí termina.

4.2.4 - Área Sul

Ao contrário das regiões anteriores, não apresenta problemas específicos de operação. Tratando-se do maior centro de geração do sistema, e sendo uma região geograficamente pequena, é bastante natural que isto aconteça.

4.2.5 - Área da Capital

Esta área também é bastante pequena, além de se beneficiar de sua proximidade com o principal centro de geração do sistema. Por este motivo, também não apresenta problemas relativos a esta parte do trabalho.

4.3 - Observações Finais

Na figura 3 estão plotados os principais resultados da simulação do sistema, incluídas as modificações recomendadas neste capítulo.

Deste modo, foram apresentadas as principais modificações de efeitos localizados a serem introduzidas no sistema, ficando para o capítulo 6 as alterações que modificam a estrutura básica da rede.

ESTUDOS PARA EXPANSÃO DA GERAÇÃO

5.1 - Introdução²⁰

À medida que a demanda de um sistema elétrico de potência cresce, vai se tornando necessária a instalação de novas unidades geradoras, capazes de satisfazer àquele crescimento. Estas novas unidades podem ser hidráulicas, térmicas ou nucleares, dependendo das disponibilidades.

É possível também satisfazer a demanda através da aquisição de energia, mantendo constante a geração própria. Esta solução, no entanto, obriga o sistema a uma dependência de outras companhias, causando muitas vezes uma série de transtornos. Um deles reside na dificuldade, e às vezes impossibilidade, de minimização do custo-hora de operação, uma vez que ele se torna totalmente dependente²⁵.

Outro tópico que deve ser lembrado é a necessidade de se garantir o suprimento em situações de emergência. No caso do Sistema de Santa Catarina, uma destas situações ocorreu recentemente, quando das inundações do Sul do Estado. Houve paralização total da Usina Jorge Lacerda, justamente a maior do sistema. Também a linha que demanda para a Área Oeste esteve fora de operação por alguns dias. Em tão graves circunstâncias, é admissível que o sistema seja operado precariamente, porém persiste a necessidade do atendimento dos demais centros consumidores. Para estes, os efeitos da catástrofe devem se refletir tão suavemente quanto possível.

5.2 - Considerações Gerais

À primeira vista pode parecer curioso que a quase totalidade da energia elétrica produzida no Brasil tenha origem em fontes hidráulicas, além de estarem sendo desenvolvidos grandes projetos, como é o caso de Itaipu, hidroelétrica da ordem de 10000 MW, situada na divisa Brasil-Paraguai. Esta situação decorre naturalmente do pujante potencial hidráulico espalhado pelo país. Existem também algumas unidades térmicas, estando em desenvolvimento a primeira usina nuclear brasileira, situada em Angra dos Reis, com potência inicial prevista para 500 MW.

Um dos pontos de partida para o estudo da expansão da geração é a previsão do crescimento da demanda, que pode ser realizada de vários modos. Entre eles está a utilização do filtro de Kalman^{22,26}, que foi simulado em computador digital. O presente trabalho, no entanto, presume que a companhia já tenha o seu modelo de previsão estabelecido.

A partir deste ponto, o primeiro fator a ser considerado diz respeito a disponibilidade de matéria prima. O termo *matéria prima* é empregado neste trabalho com sentido bastante amplo, significando condições primárias para possibilitar o funcionamento de uma usina. Neste sentido pode significar inclusive a existência de uma queda d'água em condições de ser explorada.

Embora a continuidade do suprimento possa ser mais importante do que a operação econômica⁹, geralmente a decisão final é baseada no paralelo técnico-econômico do problema. O confronto dos fatores técnicos e econômicos tem por finalidade a determinação do tipo, localização e potência da usina a ser instalada. Deve-se tomar especial cuidado para que o estudo não seja encarado de maneira estanque para várias alternativas isoladas, sendo necessária ainda uma cuidadosa avaliação a longo prazo. Uma escolha baseada apenas no custo atual poderá conduzir futuramente a enormes prejuízos devido aos custos da operação e transmissão.

O problema da expansão da geração envolve ainda fatores sócio-econômicos¹⁹ de importância. A construção de uma hidroelétrica, por exemplo, que normalmente se localiza longe dos centros desenvolvidos, costuma exigir a construção de estradas para transporte do seu pesado maquinário. Além disto, o elevado número de

peessoas que fixam residência temporária no local da obra determina a formação de uma vila, que pode se transformar em uma pequena cidade. Quando a usina entra em operação, há um esvaziamento na oferta de empregos. Isto pode provocar a retirada maciça de habitantes da vila, especialmente no caso de usinas de porte médio, cuja construção não demanda muito tempo, dinheiro e grande número de empregados. Se, ao contrário, tratar-se de uma grande usina, a existência da cidade poderá ser consolidada antes do término da obra. Neste caso a cidade pode se tornar independente da usina e sobreviver ao seu término.

5.3 - Simulação

Tratando-se de um sistema relativamente pequeno, é bastante fácil estabelecer a priori as localizações possíveis para instalar a ampliação da geração. Também a escolha do tipo de usina é problema de solução bastante simples. Assim, o principal aspecto do estudo reside na escolha da localização e no dimensionamento das usinas.

O resultado mais importante que se espera da simulação do sistema é o conhecimento do efeito global do aumento de geração para cada hipótese considerada. Este conhecimento é indispensável para que se atinja o desfecho do trabalho. O diagrama de blocos (figura 4) mostra os diversos estágios do trabalho de seleção, que pode ser dividido basicamente em dois pontos: estudos preliminares e decisões sobre a expansão.

5.3.1 - Estudos Preliminares

Conforme já foi citado, o ponto de partida para o estudo reside no modelo de previsão da demanda, que este trabalho pressupõe realizado. A partir deste dado, é realizada a previsão de carga para cada área, bem como o levantamento dos dados e geração disponíveis. Deste modo, são determinadas as necessidades do sistema a médio e longo prazos, que por sua vez conduzem ao cálculo da geração necessária em cada local.

A localização da geração é analisada em função da disponibilidade de matéria prima e das considerações técnicas, econômicas e sócio-econômicas anteriormente citadas. Estas considerações le-

DIAGRAMA DE BLOCOS DA SIMULAÇÃO
PARA EXPANSÃO DA GERAÇÃO

I

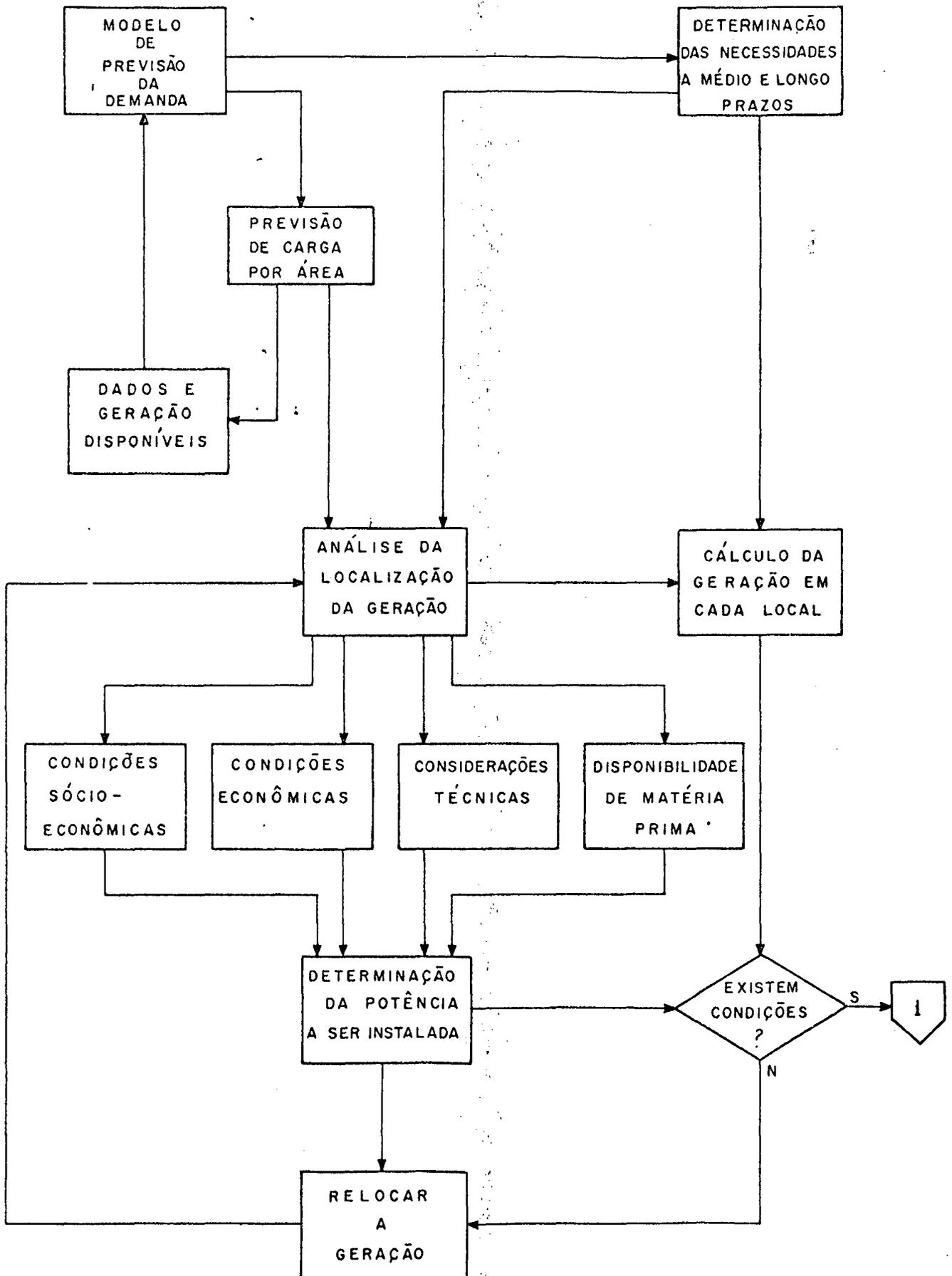


FIG. 4

DIAGRAMA DE BLOCOS DA SIMULAÇÃO
PARA EXPANSÃO DA GERAÇÃO

II

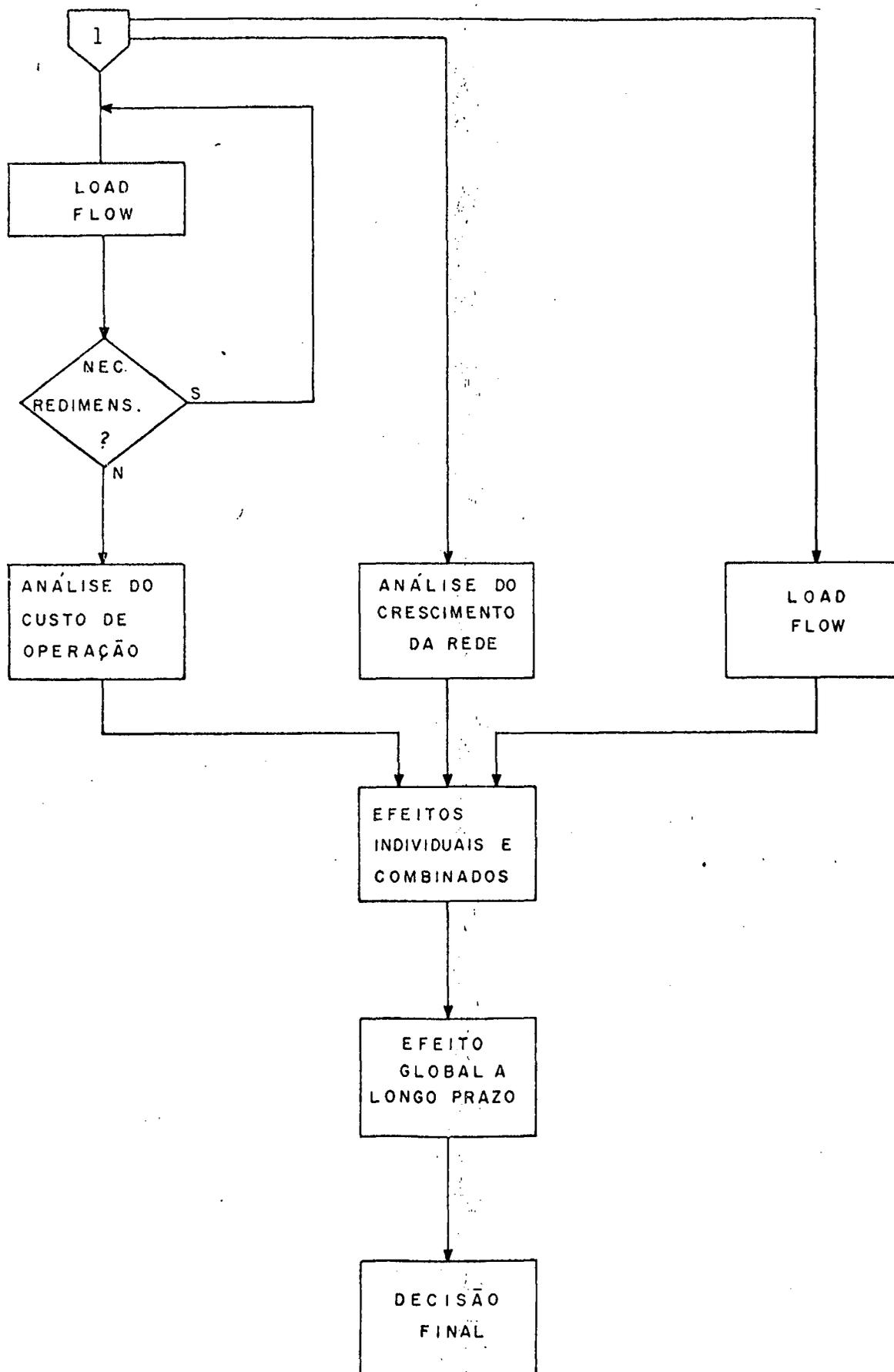


FIG. 4 (CONT.)

vam à determinação da potência a ser instalada em cada local.

Nesta altura, há necessidade de verificar a existência de todas as condições no local da instalação. Em caso positivo, passa-se às decisões sobre a expansão. Em caso negativo é necessário relocar a geração e reiniciar o estudo a partir da análise da localização. Se houver condições para instalar apenas uma parte da potência, a hipótese poderá ser desdobrada em duas, com relocação parcial da potência a ser instalada.

Nesta primeira parte do trabalho o uso de computador é bastante restrito, uma vez que ela envolve muitas considerações de caráter subjetivo, de difícil codificação e representação matemática.

5.3.2 - Decisões Sobre a Expansão

Tendo verificado a existência de condições em cada local para instalar ou ampliar usinas, há necessidade de verificar o desempenho do sistema para cada hipótese, através de sua simulação pelo *Load Flow*.

Um dos pontos de maior importância dentro dos resultados da simulação é a análise de reativos e de perdas. Se as perdas forem muito acentuadas, o sistema vai ter o rendimento diminuído, causando principalmente graves prejuízos financeiros. Se, por outro lado, os fluxos reativos tiverem valores muito grandes, resultará uma regulação falha, com grandes quedas de tensão em várias linhas. Desta maneira, as condições de operação do sistema serão seriamente prejudicadas. Além disto, haverá aumento das perdas, pela exigência de maiores correntes para o transporte da mesma quantidade de potência.

De acordo com o resultado desta análise, pode surgir a necessidade de redimensionamento da usina. Isto pode ser devido, por exemplo, à incapacidade do sistema para transportar toda a energia gerada. Neste caso verifica-se qual a melhor solução: redimensionar a usina, diminuindo a sua potência, ou reforçar o sistema de transmissão, provendo-lhe condições para aquele transporte.

O passo seguinte consiste em analisar o custo de operação da usina, tanto o atual como o custo esperado para os próximos anos. O resultado desta análise terá relevante importância no mo-

mento da decisão final.

A análise descrita desde o início deste item deve ser realizada para cada hipótese de instalação de usina, constituindo-se num estudo individual para cada uma delas. A partir deste ponto, deve-se proceder à análise dos efeitos individuais e combinados de cada usina ou combinação delas. Mais uma vez o *Load Flow* é empregado para simulação do sistema.

Obviamente, a ampliação da geração exige uma correspondente ampliação da rede, de modo a permitir o transporte do acréscimo de energia produzida. A análise deste crescimento é ponto de fundamental importância para se chegar ao conhecimento dos efeitos individuais e combinados, referidos no parágrafo anterior. Deste modo chega-se ao efeito global a longo prazo.

Tendo estudado os efeitos individuais e combinados, bem como o efeito global a longo prazo, e com a realização de todos os passos anteriormente citados, chega-se à decisão final. Além de todas as variáveis descritas, ela envolve decisões administrativas, financeiras e outras, dependendo ainda da política da companhia.

Um ponto final a ser considerado é o comportamento do sistema em situações de emergência, como ocorreu recentemente em Tubarão, na Área Sul do Sistema. A inundação aí ocorrida decretou a paralização total da Usina Jorge Lacerda, justamente a maior do Estado, além de tirar de operação por alguns dias a linha que demanda para a Área Oeste.

5.4 - Estudos Práticos

O suprimento da demanda de um sistema elétrico pode ser realizado por aumento da geração própria ou por aquisição de energia de outros sistemas. Sob o ponto de vista do consumidor não existe diferença entre as duas alternativas. Inclusive na utilização do programa de fluxo de carga, a injeção de potência em um sistema é representada por um gerador próprio.

Sob o ponto de vista da companhia, no entanto, as duas possibilidades são bastante diferentes, por se constituírem em alternativas completamente diversas para o planejamento do sistema. Assim, os estudos práticos são apresentados separadamente, inician-

do-se pelas hipóteses que se referem ao aumento da geração própria, para apresentação posterior das hipóteses referentes ao aumento da aquisição de energia.

5.4.1 - Aumento da Geração Própria

Para o estabelecimento das hipóteses de aumento da geração própria do sistema foram considerados todos os locais do Estado que possuem uma fonte de energia em condições de ser aproveitada. Foi estudada ainda a hipótese de instalação de unidades de ponta no centro de carga de cada área. Esta hipótese visou apenas a deduções teóricas, uma vez que a priori já era conhecida a sua impraticabilidade. Foram as seguintes as hipóteses básicas:

- a) ampliação da Usina Bracinho;
- b) ampliação da Usina Cedros;
- c) instalação de uma usina em Salto dos Pilões, nas proximidades de Ibirama;
- d) instalação de unidades térmicas de ponta nas cidades de Joinville, Blumenau, Florianópolis e Joaçaba.

A ampliação da Usina Jorge Lacerda não figura entre as hipóteses básicas devido à sua proximidade com Siderópolis, onde se localiza a barra de compensação do sistema. Devido a esta pequena distância, as perdas na linha Siderópolis-Tubarão são bastante reduzidas. Desta maneira, para efeitos do programa de fluxo de carga, a ampliação da Usina Jorge Lacerda só teria como consequência a diminuição da potência exigida em Siderópolis. Para o sistema isto significaria substituir uma parte da aquisição por ampliação da geração própria. A instalação de uma hidroelétrica de 30 MW em Xanxerê também não consta entre as hipóteses acima, uma vez que nesta cidade se localiza um ponto de injeção de potência.

As hipóteses acima foram estudadas individualmente e em forma de combinação. O trabalho de simulação conduziu aos seguintes resultados:

- a) A ampliação da Usina Bracinho é viável até a sua duplicação, passando de 15 MW para 30 MW a potência instalada. Exige mudança da tensão de operação da linha Bracinho-Jaraguá para 69 KV. Acarreta diminuição da ordem de 2% nas perdas totais do sistema. Praticamente não altera os fluxos de potência nem a quantidade de

reativos necessária para manter as tensões nos pontos em que foram simulados compensadores síncronos. Esta hipótese tem efeitos pouco sensíveis porque o incremento de potência é muito pequeno perante o sistema global.

b) É possível incrementar a potência da Usina Cedros (conjunto Cedros-Palmeiras) em aproximadamente 20 MW. Este incremento também é muito pequeno em confronto com o sistema. A diminuição das perdas totais continua sendo da ordem de 2%. Os efeitos sobre regulação, fluxos de potência e necessidade de reativos são muito pouco acentuados. Esta também é u'a modificação pouco sensível.

c) A construção de uma usina em Salto dos Pilões seria viável até um limite aproximado de 500 MW. Para a expansão atual, no entanto, foi considerada suficiente a instalação de 130 MW. Implicaria na montagem de uma subestação elevadora no local, bem como de uma linha de transmissão em 69 KV, circuito simples, até Ibirama, e de uma em 138 KV, circuito duplo, até Garcia (em Blumenau).

Teria como conseqüências a redução da ordem de 25% nas perdas totais; redução acentuada nos fluxos de potência em diversas linhas importantes que levam energia para a Área do Vale; aumento dos fluxos nas linhas que partem desta Área; melhora geral das tensões e demais condições de operação dentro da região. Com a diminuição do transporte de energia e aumento da geração local, a solicitação dos compensadores síncronos seria grandemente reduzida, sendo supérflua a compensação em Rio do Sul e sofrendo redução de aproximadamente 70% em Garcia.

Quanto aos fluxos de potência, haveria sensível redução nas linhas que partem de Tubarão para Garcia, Roçado e Ilhota. A linha que vai de Garcia para Ilhota, e daí para Joinville, por sua vez, sofreria grande aumento no fluxo de potência. Os principais resultados do programa para esta hipótese são mostrados no diagrama unifilar da figura 5.

A hipótese do aproveitamento do potencial hidráulico existente em Salto dos Pilões parece ser a melhor maneira de expandir a geração própria, tendo como vantagem adicional o grande incremento de potência em uma única unidade.

d) Na hipótese da instalação de unidades térmicas de ponta, foi considerada uma usina de 40 MW em Blumenau e usinas de 20 MW

em Joinville, Florianópolis e Joaçaba.

A localização de usinas próximo aos centros de carga tem como consequência óbvia a diminuição do transporte de energia dentro do sistema. Por isto a presente hipótese provoca uma redução acentuada nos fluxos de potência e nas perdas totais, a par de u'a melhora geral nos níveis de tensão.

Esta hipótese é muito boa teoricamente, pelas melhoras acima citadas, além da não exigência de novas linhas de transmissão. Sob os pontos de vista técnico e econômico, porém, ela tem sérios inconvenientes, já conhecidos a priori, e que fizeram desta apenas uma hipótese teórica.

Quanto à hipótese de serem combinadas usinas, o resultado da adoção conjunta de quaisquer das duas primeiras hipóteses com quaisquer das duas últimas, não iria alterar em muito a descrição feita para estas, uma vez que estariam sendo combinadas uma grande e uma pequena usinas.

A combinação das duas primeiras hipóteses também se constituiria em hipótese de pequeno peso em relação ao sistema global.

A combinação das duas últimas, ou seja, a construção da usina em Salto dos Pilões e das unidades térmicas de ponta (com excessão de Blumenau, por sua proximidade com aquela), seria uma hipótese por demais sofisticada. Matematicamente, apresentaria todas as vantagens citadas para as duas hipóteses isoladas, porém técnica e economicamente conservaria as desvantagens citadas para as unidades térmicas de ponta. Além disto, seria uma solução para um prazo mais longo, fora dos objetivos do presente trabalho.

5.4.2 - Aumento da Aquisição de Energia

Outra solução viável para suprir a expansão da demanda do sistema consiste em reforçar a injeção de potência a partir de outros sistemas. As hipóteses aqui estabelecidas também poderiam ser encaradas como hipóteses de construção de usinas térmicas nos respectivos locais. Na realidade, porém, pode não haver condições locais para instalação e funcionamento destas usinas.

As hipóteses básicas estudadas consistiram de pontos de injeção em Joinville, Blumenau, Roçado e Ilhota, bem como da ampliação da potência injetada em Xanxerê.

Aqui também as hipóteses foram estudadas individualmente e de forma combinada, para avaliação dos respectivos efeitos. O trabalho de simulação conduziu aos seguintes resultados:

a) Para injeção de 200 MW em Joinville, com vistas ao atendimento local da demanda da Área Norte, é necessário ampliar a subestação local. Tal injeção iria acarretar considerável diminuição em todos os fluxos de potência de sentido sul-norte; redução da ordem de 55% nas perdas totais; diminuição da necessidade de reativos no local, bem como na Área do Vale, o que revela maior facilidade em manter as tensões, devido às melhores condições de operação. A compensação reativa em Tupi seria totalmente dispensável. Na prática, esta hipótese corresponde a um desdobramento da injeção de potência realizada em Siderópolis, com a vantagem de reduzir as perdas da transmissão. Outra vantagem seria a divisão da potência injetada entre dois pontos diametralmente opostos.

b) Uma aquisição da ordem de 80 MW em Blumenau, para suprimento de uma parte da Área do Vale, traria vantagens análogas às descritas para o caso de Joinville. Só que estas vantagens apresentar-se-iam em menor escala, uma vez que esta área não é centro de carga tão importante quanto a Área Norte, e está situada a distância bem menor dos outros pontos de injeção, especialmente da Área Sul.

c) Uma injeção de potência da ordem de 50 MW em Roçado constituir-se-ia em solução apenas para a Área da Capital, que teria então energia suficiente para o seu suprimento. Além de ser uma hipótese de pouca importância no conjunto, está é a área que mais se aproxima do Sul do Estado. Assim, a hipótese não se constitui em solução para o sistema, e sim para a área.

d) Uma aquisição da ordem de 300 MW em Ilhota, em substituição às três hipóteses anteriores, permitiria uma redução de quase 50% nas perdas totais, a par de diminuir bastante a necessidade de reativos e possibilitar uma operação bastante satisfatória do sistema em geral. Isto seria devido à existência de forte injeção de potência no centro do sistema, reduzindo bastante o transporte interno de energia. Esta hipótese seria equivalente à mudança de local do principal ponto de injeção de Siderópolis para Ilhota. Na prática, porém, esta solução não é tão eficiente quanto pode parecer. Para o programa de fluxo de carga aplicado a um sistema

isolado, um ponto de injeção é equivalente a um gerador. Na realidade, um sistema de transmissão continua sendo necessário para o transporte da energia até aquele ponto. O ônus da transmissão continuaria recaindo sobre a companhia compradora. Em última análise, seria substituir o uso do próprio sistema de transmissão pelo sistema de outra companhia. Isto só serviria para tornar o sistema ainda mais dependente.

e) A ampliação da potência adquirida em Xanxerê se constitui em solução para a Área Oeste. Neste caso, porém, a injeção de potência já existe no local, tratando-se apenas de aumentá-la, a fim de que se torne suficiente para o suprimento de Extremo-Oeste do Estado. Deste modo pode ser reduzido o fluxo de potência proveniente da Área Sul. Esta solução requer o aumento da subestação local e a duplicação da linha até Joaçaba e torna desnecessário um circuito da linha Joaçaba-Lages. A aquisição local foi ampliada de 60 MW para 80 MW.

5.4.3 - Resumo das Deduções

A partir dos resultados obtidos pela simulação do sistema para as mais diversas hipóteses e combinações delas, chega-se ao presente resumo de conclusões. Para a hipótese de ampliação da geração própria, a solução que parece mais conveniente, de acordo com os estudos aqui desenvolvidos, é a da instalação de uma hidroelétrica de aproximadamente 130 MW em Salto dos Pilões, na Área do Vale. Para a hipótese de o aumento da demanda ser suprido por aquisição de energia, o local que parece proporcionar melhor resultado é Joinville.

Para qualquer dos casos acima, ainda se mostra recomendável ampliar a aquisição de energia em Xanxerê, para tornar o Extremo-Oeste do Estado independente de energia proveniente da Área Sul.

C A P Í T U L O 6

ESTUDOS PARA EXPANSÃO DA REDE

6.1 - Introdução²¹

No planejamento de um sistema de potência, uma vez realizada a previsão de carga e avaliada a capacidade de geração, o principal aspecto a considerar diz respeito ao projeto da configuração da rede, de modo a garantir o suprimento da demanda aliado a condições satisfatórias de operação.

No capítulo 4 foram desenvolvidas configurações do sistema levando em conta apenas a necessidade de suprimento das cargas para os valores atuais de cada caso. Neste capítulo é apresentada uma teoria para desenvolvimento do projeto de configurações com emprego da simulação, de acordo com as considerações tecidas ao longo do capítulo 2.

6.2 - Considerações Gerais

Levando em consideração que a finalidade básica de um sistema elétrico é o atendimento dos consumidores, pode-se afirmar que este objetivo é tão importante quanto a existência do sistema²². Desta maneira, há necessidade de serem desenvolvidas configurações capazes de acompanhar o crescimento da demanda, mantendo as condições em que ela deve ser satisfeita.

Ao falar em satisfazer a demanda, este trabalho pretende enfocar três aspectos distintos: segurança, importância e emergência. Para que os consumidores sejam plenamente satisfeitos é necessário que os três requisitos sejam preenchidos simultaneamente.

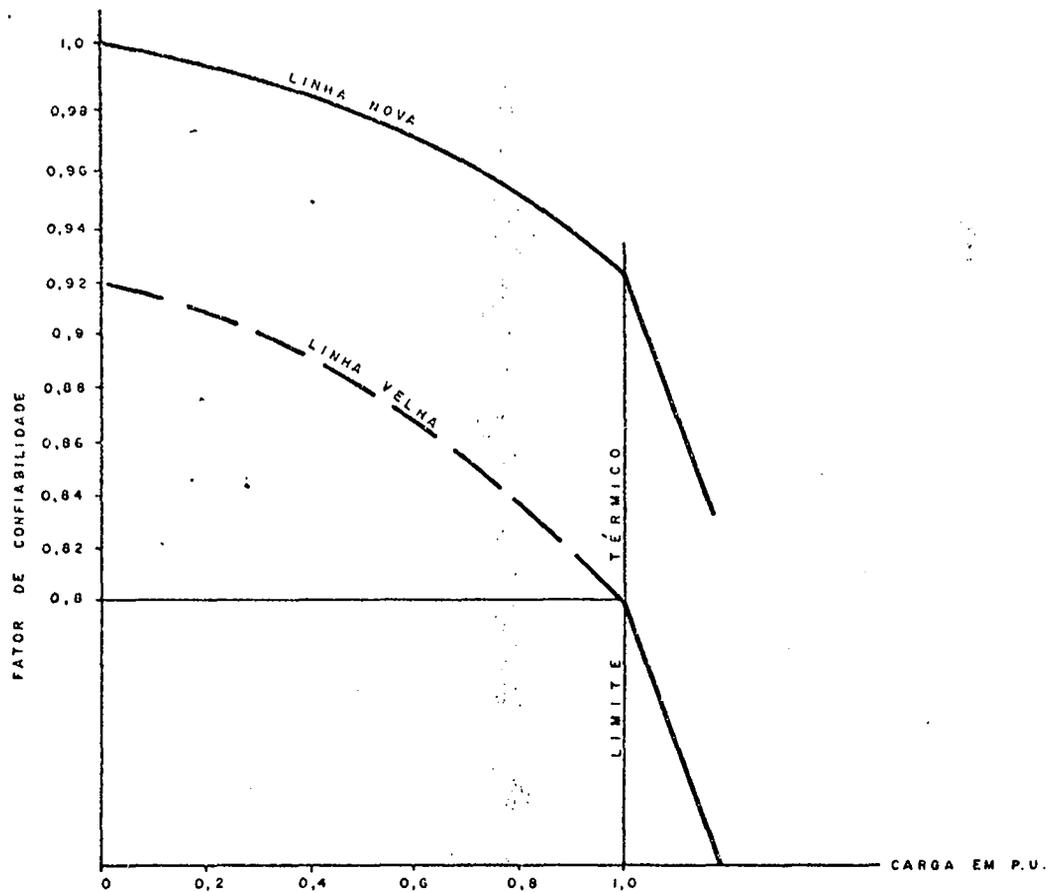
Muitos autores definem *segurança* em termos de teoria de probabilidade. Nesse caso, o estudo da segurança do sistema é baseado na probabilidade de ocorrência dos diversos tipos de defeito que podem acontecer. Conforme explanação dada no capítulo 2, este trabalho não visa ao emprego de métodos matemáticos para os estudos de planejamento do sistema. Assim, não faz sentido pensar no emprego de métodos probabilísticos para estudos sobre segurança, que então é encarada como um problema determinístico.

Sob muitos aspectos, a segurança depende dos componentes e características do sistema, tais como linhas de transmissão, transformadores e regulação. No caso particular de uma linha, a segurança é função do carregamento e da regulação^{9,23,27}, conforme é mostrado graficamente na figura 6. Desta maneira, observa-se com facilidade porque o crescimento da demanda acarreta problemas de segurança para o sistema. O mesmo pode ocorrer instantaneamente nos casos de emergência, em que uma linha é subitamente carregada, podendo ocasionar uma pane no sistema ou em parte dele.

Atualmente já é possível garantir ótimas condições⁷ de segurança para um sistema elétrico, o que pode ser constatado pela escassez de ocorrência de panes violentas. Ainda assim é necessário aperfeiçoar os recursos que garantem tais condições, devido à utilização cada vez maior de grandes sistemas interligados.

Importância é enfocada sob o ponto de vista da maior ou menor confiabilidade que deve ser exigida no suprimento de cada consumidor. *Emergência* se refere à possibilidade de uma parte do sistema estar sujeita à condição de sobrecarga, ou de o suprimento ser realizado temporariamente por meio de um desvio²⁴. Para ambos os aspectos, é necessário respeitar uma determinada prioridade, um tipo de hierarquia para o atendimento. Existem consumidores que não podem sofrer um corte mais prolongado no fornecimento, a exemplo de uma fundição, enquanto outros não podem sofrer interrupção de espécie alguma, como é o caso de um hospital. Neste último exemplo é comum a utilização de geradores de emergência, a fim de reduzir ao mínimo os efeitos de uma pane ou da necessidade do desligamento da rede para reparos. Existe ainda a possibilidade da ocorrência de um *black-out*, que é a paralização total de um sistema ou de parte dele. Um exemplo típico é o famoso *black-out* de Nova Iorque, de duração superior a nove horas, causando situa-

a) função da carga



b) função da tensão

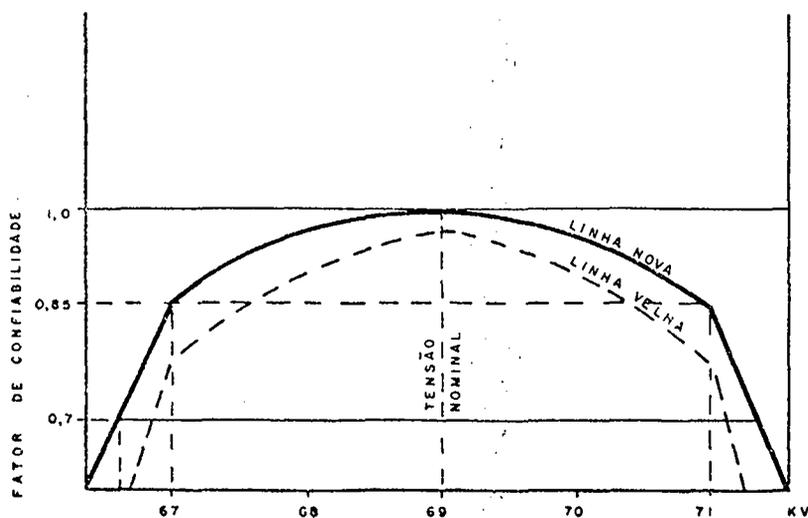


FIG. 6

ções de emergência que não poderiam ter sido previstas nem evitadas.

6.3 - Configurações de Redes

Um sistema de potência pode ser dividido basicamente em duas partes: rede de transmissão e rede de distribuição. Muitos autores preferem uma variante desta classificação, incluindo uma terceira parte, que é a rede de sub-transmissão. Para as finalidades deste trabalho, no entanto, a classificação em dois grupos é plenamente satisfatória.

A rede de transmissão tem várias funções¹⁹, sendo as principais o transporte da energia desde a geração e sua distribuição entre as diversas subestações alimentadoras, além da formação de um consórcio de geração e demanda, de modo a permitir a operação econômica do sistema. Sua configuração é determinada basicamente pela necessidade de satisfazer a demanda, sob os aspectos de segurança, importância e emergência. Costuma operar com tensões superiores a 23 KV.

A rede de distribuição tem duas funções¹⁹: transporte da energia ao centro consumidor e formação do consórcio de geração e demanda, de modo a permitir o planejamento e a operação do sistema da forma mais econômica possível. Sua configuração é determinada principalmente pela função da rede, necessidade de garantir a continuidade do suprimento (importância) e disponibilidade de recursos. Observe-se que, de qualquer modo, é preciso que a continuidade de suprimento fique assegurada quando da ocorrência de uma pane. Esta condição é provida especialmente pela duplicação de circuitos, formação de anéis de distribuição ou de ramificações em radiais, de modo a garantir diferentes alternativas de suprimento de potência. As subestações alimentadoras são determinadas pela localização, capacidade de transformação e condições de manter a tensão dentro de limites previamente estabelecidos. Esta parte do sistema costuma operar com tensões na faixa de 220 V a 23 KV.

A rede de sub-transmissão pode ser encarada como um limite entre as outras duas. Geralmente ela é constituída por um desvio, na qual faz o papel de transmissão. Por isto, muitas vezes ela é simplesmente enquadrada nesta parte do sistema; costuma operar

com tensões na faixa de 23 KV a 138 KV.

A demanda de um sistema elétrico não é constante, estando em contínua evolução. Deste modo, é necessário que as condições que garantem a satisfação dos consumidores evoluam paralelamente àquele crescimento, o que é assegurado em parte pela expansão da rede. Esta expansão deve ser realizada de modo a garantir as necessárias condições de operação, tais como manutenção dos níveis de tensão e eficiente despacho de carga. Ela resulta principalmente das seguintes providências: construção, adição ou religamento de linhas; mudança na tensão de operação de uma linha; aumento da potência de transformadores e muito especialmente fechamento de laços.

Dentre as modificações citadas, a formação de laços é a que causa maiores reflexos sobre o desempenho global do sistema. Este é o aspecto do planejamento da rede que merece a maior atenção. Tal modificação, quando bem empregada, introduz sensível melhora no desempenho do sistema, devido especialmente a:

- a) interligação de grande número de pontos, cobrindo ampla área geográfica;
- b) aumento da capacidade de transporte de energia, pela formação de circuitos paralelos;
- c) maior confiabilidade de suprimento em caso de panes ou de outras situações de emergência.

Observe-se, no entanto, que nem sempre o fechamento de um laço melhora as condições de operação do sistema. Em geral a formação de laços de tamanho médio é muito vantajosa; por melhorar a operação e a segurança. Já o caso de laços muito grandes tem o inconveniente de exigir tensões muito altas, com os problemas de isolamento, proteção e outros, inerentes à utilização de altas tensões. Laços muito pequenos, por sua vez, podem piorar as condições do sistema, além de onerar financeiramente, pelas proteções direcionais que passam a ser necessárias. Assim, em geral, eles trazem mais problemas do que benefícios.

6.4 - Simulação

Pretende-se apresentar aqui o roteiro para se executar o trabalho de simulação necessário ao desenvolvimento do projeto de

configurações futuras para a rede. Na figura 7 é apresentado o diagrama de blocos do procedimento adotado.

Mais uma vez, um dos pontos de partida está no modelo de previsão da demanda, cujo conhecimento é indispensável para definição das necessidades de expansão da rede.

Outro ponto fundamental é a política da companhia de atender à demanda por geração própria ou por aquisição de energia. Esta hipótese se constitui em solução mais simples, porém exige subestações maiores e linhas de transmissão de maior capacidade e melhores condições de segurança. Além disto, a aquisição torna o sistema mais dependente, o que equivale a dizer que a companhia fica sujeita a maiores restrições.

Também a rede atual se constitui em ponto de partida para o desenvolvimento do projeto. A análise desta rede, em conjunto com um estudo de custos, para cada área de crescimento do sistema, conduz às possíveis subestações a serem construídas ou ampliadas. Após a definição da potência e localização das subestações, e em conjunto com a análise da rede atual, é estudada a configuração da rede principal do sistema.

Na rede principal deve ser observado o preenchimento das condições que garantem o seu funcionamento. Para tanto é necessário simular o sistema, para verificação do seu desempenho. Nesta altura merece especial atenção a estabilidade nos pontos críticos para situações de emergência.

Para a rede secundária basta analisar os tópicos de segurança e especialmente o de importância, já que para determinados consumidores a confiabilidade do sistema é de vital importância. As situações de emergência, por sua vez, não apresentam problemas específicos para a rede secundária. Em uma emergência grave, que afete a transmissão, de nada resolve cuidar da distribuição, pois normalmente não existem condições para supri-la. Se a condição extraordinária se localizar especificamente em um ponto da distribuição (numa rua, por exemplo), em geral a presença de um anel aberto resolve o problema. Além disto, tal situação não é importante do ponto de vista do sistema global.

O não preenchimento de uma ou mais condições analisadas determina a alteração do projeto da configuração, para sua adaptação ao desempenho desejado. A existência de todas as condições

DIAGRAMA DE BLOCOS DA SIMULAÇÃO
PARA EXPANSÃO DA REDE

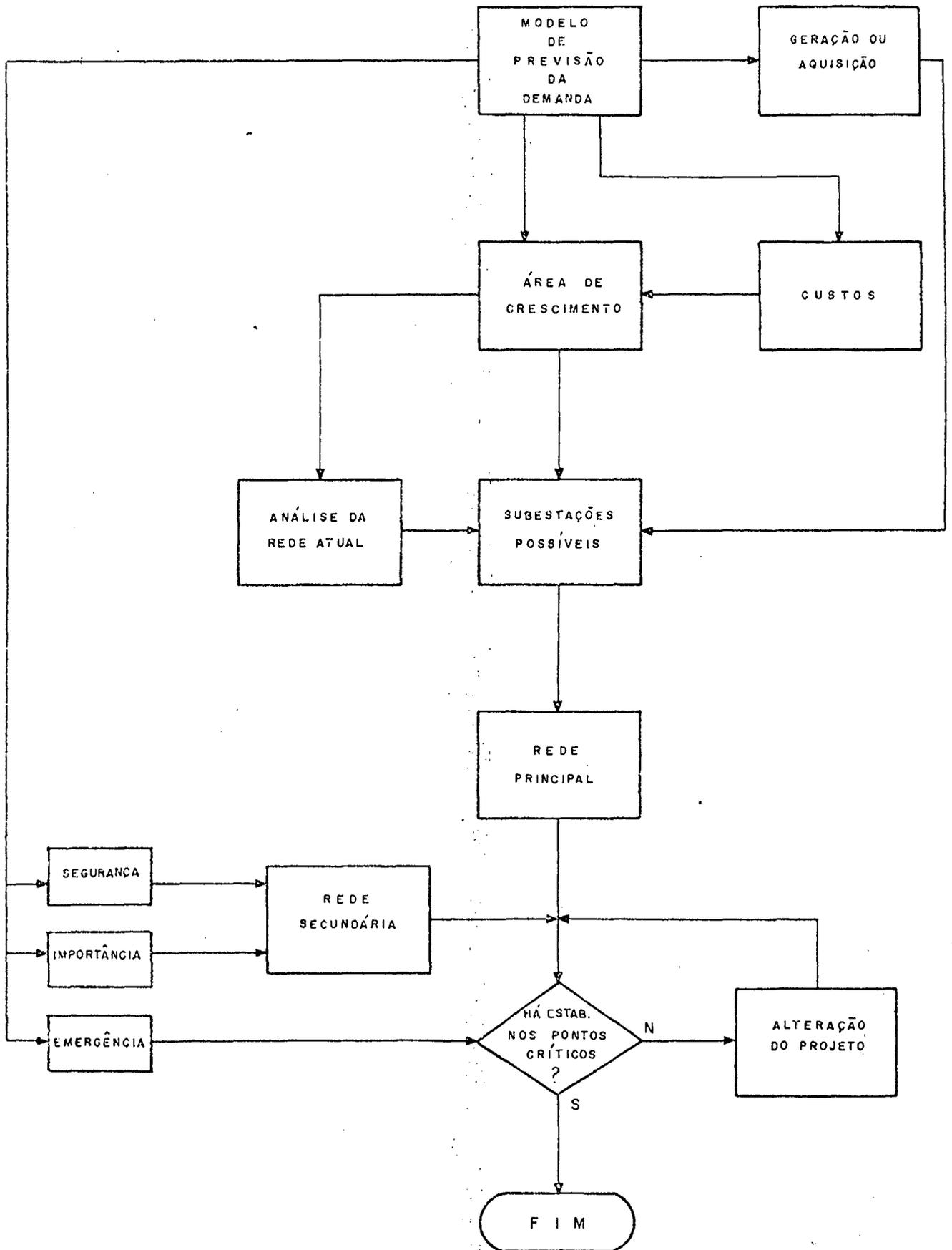


FIG. 7

permite o encerramento do trabalho de simulação.

6.5 - Estudos Práticos

A teoria apresentada neste capítulo visa ao estabelecimento de configurações para a rede de modo a permitir o atendimento satisfatório da demanda. Foi visto que esta configuração é determinada através de modificações em uma rede inicial existente ou estabelecida como tal.

As modificações a serem introduzidas podem ser divididas em dois grandes grupos: de efeito local e de efeito global. No primeiro grupo estão aquelas que alteram sensivelmente apenas o desempenho em uma área do sistema ou parte dela. Como exemplo podem ser citadas a instalação de compensação reativa e a duplicação de linhas de radiais. No segundo grupo estão aquelas cujos efeitos se fazem sentir em várias regiões do sistema. Neste grupo se enquadram o fechamento de laços de tamanhos médio e grande.

No tocante à parte prática, o estudo das modificações de efeito local foi desenvolvido no capítulo 4, sob o título de *Estudos Básicos*. Deste modo, os estudos práticos do presente capítulo são voltados mais para as alterações de efeito global, basicamente o fechamento de laços. Eles foram determinados com base nas considerações tecidas abaixo.

O Alto Vale do Itajaí, especificamente na região de Rio do Sul e Ibirama, apresenta problemas típicos de radiais, agravados pela ausência de um gerador capaz do atendimento local da demanda. Este radial pode ser eliminado através da ligação entre Rio do Sul e Ponte Alta do Sul. Deste modo estaria formado um laço envolvendo as Áreas do Vale, da Capital, Sul e parte da Área Oeste. Este laço possibilitaria grande melhora no desempenho da Área do Vale, especialmente na parte daquele radial.

A construção de uma hidroelétrica em Salto dos Pilões, recomendada no capítulo anterior, teria como consequência adicional a solução dos problemas citados. Mesmo em tal hipótese o fechamento deste laço seria conveniente, por permitir que uma parte do suprimento da Área Oeste seja efetuada por aquela usina, melhorando as condições de atendimento.

Outro laço a ser fechado diz respeito ao radial que existe

na Área Norte, de Joinville até Canoinhas, em 138 KV. Esta parte do sistema não apresenta muitos problemas devido à sua alta tensão de operação e à duplicidade de circuitos, fatores que lhe proporcionam grande capacidade de transporte de energia. No entanto, a construção de uma linha entre Caçador e Canoinhas e a mudança da tensão nominal da linha Caçador-Videira para 138 KV possibilitariam a formação de um laço envolvendo praticamente todo o sistema de Santa Catarina. Apenas uma parte da Área Oeste deixaria de pertencer a este laço. Deste modo, o sistema ficaria constituído de um grande anel, contendo quase todas as suas principais linhas, geradores e pontos de injeção. Em cada área haveria uma ou várias derivações deste anel. O sistema ficaria bastante integrado, devido à sensível redução das distâncias elétricas entre os diversos pontos. Assim, existiriam muito melhores condições de segurança e confiabilidade em todo o sistema, além de grandes melhoras nas condições de operação. Já em uma primeira análise observa-se a possibilidade de uma parte do suprimento da Área Norte ser realizada pela Área Oeste, melhorando bastante o desempenho naquela. Sem o fechamento do laço, estas são as duas áreas eletricamente mais distantes.

Os principais resultados da simulação do sistema com o fechamento dos dois laços acima citados estão apresentados no diagrama unifilar do sistema, na figura 8.

Existe ainda a possibilidade de se obter um laço na tensão de 69 KV, através da ligação da Usina Palmeiras com Jaraguá do Sul e ainda de São Francisco do Sul com Piçarras. Este laço tornaria possível a integração de uma parte da Área do Vale com uma parte da Área Norte. Sua presença não produz alterações sensíveis no desempenho do sistema, não se justificando sob este aspecto. Serviria, no entanto, para melhorar a confiabilidade do sistema nas áreas que envolve. Das duas ligações que completam este laço, a mais importante é a da Usina Palmeiras com Jaraguá do Sul, que inclusive possibilita efetuar uma parte do suprimento da Área Norte por intermédio daquela usina.

As demais hipóteses simuladas não foram descritas por não apresentarem importância para o presente estudo, uma vez que os seus efeitos sobre o desempenho do sistema são de pequeno porte, ou pioram as condições de operação.

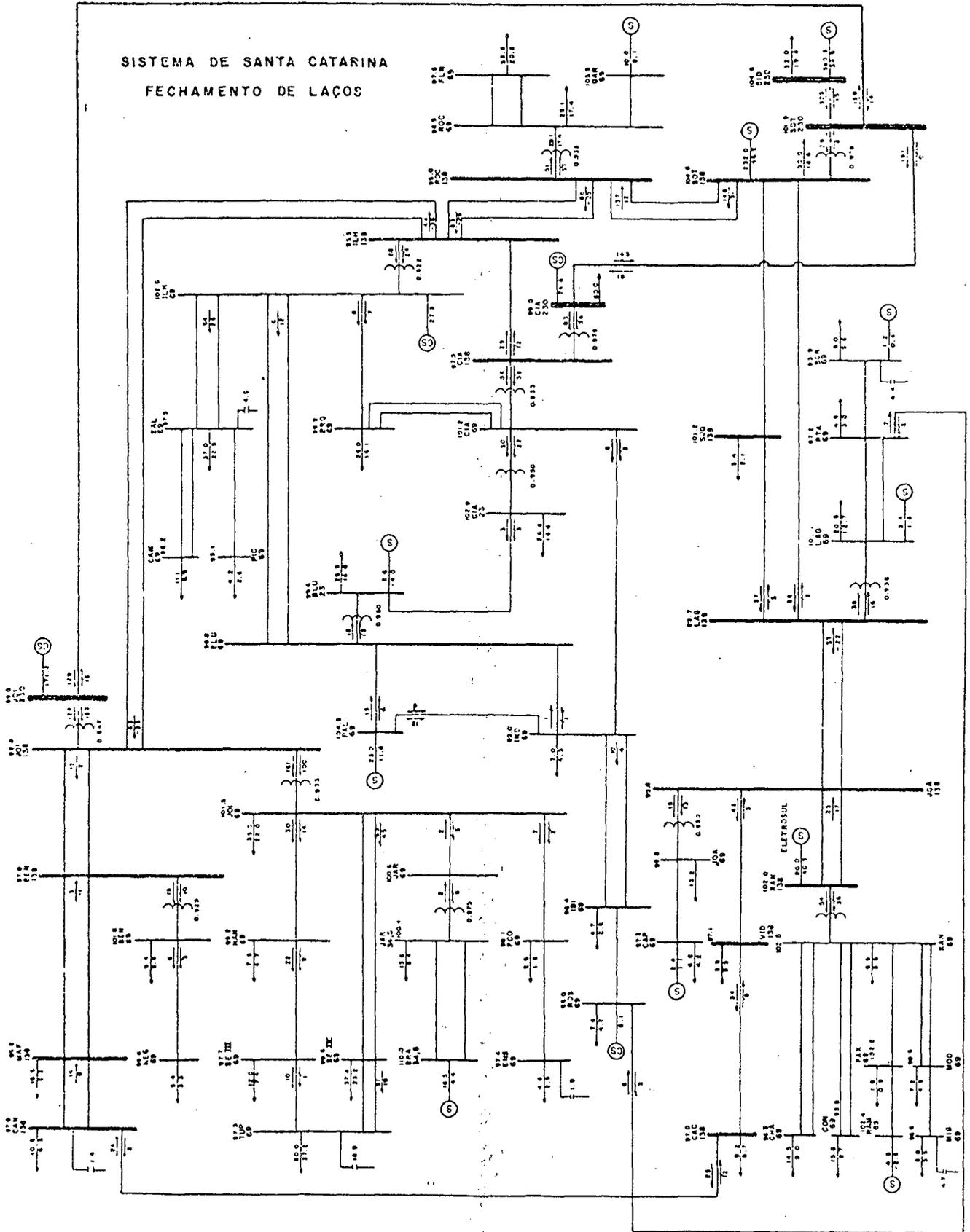


Fig. 8

Foi realizado também um estudo combinado das diversas hipóteses, para avaliação dos seus efeitos sob forma conjunta.

Resumindo as deduções apresentadas, tem-se que o fechamento de um grande anel na tensão de 138 KV, envolvendo as cinco áreas, é a modificação mais importante a ser introduzida no sistema. Este anel é completado pela construção de uma linha entre Caçador e Canoinhas e pela mudança da tensão de operação da linha Videira-Caçador para aquele valor. O segundo anel em importância é aquele obtido pela ligação Rio do Sul-Ponte Alta do Sul. Este laço tem especial importância para a Área do Vale, sendo ainda muito importante para o Oeste no caso da instalação de uma usina no Vale do Itajaí. Outra modificação importante é a construção de uma linha entre a Usina Palmeiras e Jaraguá do Sul e possivelmente outra entre São Francisco do Sul e Piçarrás. A finalidade principal das duas últimas modificações seria permitir a integração entre as Áreas do Vale e Norte, bem como aumentar a confiabilidade destas partes do sistema.

Foi observado ainda o relacionamento entre tensão de operação e tamanho, para os laços que apresentaram resultados realmente vantajosos. Para 69 KV um laço em tais condições cobre uma distância em torno de 400 Km, enquanto para 138 KV este valor é de aproximadamente 800 Km. Laços de comprimento muito acima ou muito abaixo destes valores devem servir apenas como solução de emergência.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido o projeto de configurações futuras para um sistema elétrico de potência, com a finalidade de dar ao sistema condições de acompanhar o crescimento da demanda. O projeto se desenvolve a partir de uma configuração inicial (ou básica), que pode ser existente ou suposta como tal. Durante o desenvolvimento do trabalho, o comportamento do sistema para cada situação é determinado pelo *Load Flow*.

A ampliação do sistema consiste, basicamente de dois tópicos: expansão da geração e expansão da rede.

7.1 - Expansão da Geração

No tocante à geração existem três hipóteses básicas a serem consideradas: construção de usina, ampliação de usina e aumento da aquisição de energia a partir de outros sistemas. Através da simulação do sistema para um grande número de hipóteses individuais e combinadas, chega-se às soluções mais viáveis para o problema. O procedimento completo é mostrado no diagrama de blocos correspondente.

No caso do Sistema de Santa Catarina, as hipóteses que mostraram os melhores resultados foram a construção de uma hidroelétrica em Salto dos Pilões (próximo a Ibirama), a ampliação da potência adquirida em Xanxerê e a injeção maciça de potência em Joinville. A primeira e a segunda são especificamente recomendadas neste trabalho. Levando em consideração os fluxos de carga nas principais linhas, a hipótese da aquisição de energia em larga escala em Joinville apresenta ótimos resultados. Tendo, porém,

o inconveniente de agravar muito a dependência do sistema, ela deixa de ser recomendada.

Se, no entanto, não for possível expandir a geração próximo ao centro de carga, pode ser preferível comprar energia de outros sistemas. De maneira análoga ao centro de massa de um corpo, o centro de carga elétrica não é obrigatoriamente um barramento muito carregado. Exemplo típico é a cidade de Xanxerê, centro de carga do Extremo-Oeste de Santa Catarina.

Observe-se que entre as hipóteses mais viáveis de expansão da geração não constam usinas térmicas, uma vez que no Estado não existem condições para este tipo de aproveitamento, com exceção da Área Sul. Também não se pode pensar em termos de geração nuclear para um sistema deste porte. As demais hipóteses atualmente viáveis, e outras que forem surgindo, deverão servir de subsídio para os estudos de nova ampliação da potência instalada, quando a expansão que aqui se estuda se mostrar insuficiente para atender à demanda. Santa Catarina ainda não explorou completamente suas fontes hidráulicas, dispondo de oportunidades para tal, entre as quais a expansão de Salto dos Pilões, local extremamente privilegiado para centro de geração.

7.2 - Expansão da Rede

O outro tópico do planejamento diz respeito à expansão da rede. A rede deve acompanhar o crescimento do sistema, já que existem critérios a serem satisfeitos no atendimento da demanda. Foi mostrado que além de atender a todos os consumidores²² dentro destas condições de funcionamento, o sistema deve satisfazer três requisitos básicos: segurança, importância e emergência. Foram mostrados vários métodos que podem ser usados no desenvolvimento do projeto de configurações da rede. Na parte prática do estudo foi utilizada uma miscelânea de intuição, heurística e otimização. Não foram utilizados métodos matemáticos, já que não é prática a sua aplicação para sistemas relativamente pequenos.

No caso do Sistema de Santa Catarina foram simuladas várias hipóteses de construção e duplicação de linhas, aumento da capacidade de transformadores, instalação de compensação reativa e muito especialmente fechamento de laços. De acordo com a teoria de-

envolvida no presente trabalho, os laços que mostraram maior eficiência foram os obtidos pelas ligações Videira-Caçador-Canoinhas e Ponte Alta do Sul-Rio do Sul, pelo que eles são especificamente recomendados neste estudo.

Na prática observa-se que a formação de laços de tamanho médio costuma trazer grandes benefícios ao sistema, proporcionando maior segurança e melhores condições de operação. Laços muito grandes ou muito pequenos, por outro lado, costumam acarretar mais problemas do que benefícios. Em geral, um bom laço na tensão de 69 KV abrange uma circunferência da ordem de 400 Km, enquanto para a tensão de 138 KV tal comprimento é da ordem de 800 Km.

Outra modificação de grande importância é a ligação Blumenau-Tubarão em 230 KV. Foi observada ainda a necessidade da duplicação de algumas linhas e da instalação de compensação reativa em alguns pontos do sistema, especialmente nas Áreas Oeste, Norte e do Vale. Além disto, no futuro será necessário alterar a tensão da linha Xanxerê-São Miguel d'Oeste, pois o radial que aí se apresenta deverá causar sérios problemas se houver acentuado incremento da carga nele instalada.

7.3 - Observações Finais

Ressalte-se que um estudo de planejamento consiste da execução simultânea dos projetos de expansão da geração e expansão da rede. Desde que existe íntima ligação entre geração e transmissão, é impossível separar os dois tópicos, sendo necessário que eles evoluam paralelamente para a solução do problema. Os dois aspectos são apresentados separadamente apenas para facilitar a sua descrição e compreensão. Pode ocorrer, no entanto, que não se de-seje ampliar a geração própria do sistema, optando-se pela compra de energia. Mesmo neste caso será necessário expandir a rede de modo a possibilitar o atendimento da demanda. Nesta hipótese, apenas a segunda parte do planejamento será levada a efeito.

Observe-se que a parte prática do planejamento aqui desenvolvido se refere apenas ao Sistema de Santa Catarina. Para aplicação prática dos resultados obtidos, entretanto, será necessário levar em conta a expansão de todo o Sistema Federal, tanto na parte de expansão da geração como na de expansão da rede. Assim, quando a Usina de Itaipu entrar em operação, poderá haver u'a mu-

dança radical no problema da geração. Inclusive, sob o ponto de vista do Sistema Federal, o conceito de dependência aqui utilizado pode não ser importante. Sob este aspecto, a solução adotada poderá ser a da injeção de potência, utilizando-se a energia produzida por aquela usina. Neste caso, a decisão final será função de um estudo econômico global, para que se estabeleça a melhor solução para o sistema total. Observação análoga vale com respeito à rede. Por exemplo, uma linha radial do Sistema de Santa Catarina poderá pertencer a um laço no Sistema Federal, tomando parte, portanto, em uma configuração de rede completamente diferente.

Deste modo, no presente trabalho foi desenvolvido o estudo de planejamento da expansão de um sistema elétrico a médio prazo, objetivo fundamental desta tese. Este tipo de estudo pode servir perfeitamente para corrigir as distorções que todo planejamento a longo prazo apresenta em relação à realidade das exigências do consumo. Mostrou-se ainda que no caso de um sistema dependente nem sempre se pode alcançar otimização, devido às restrições a que o sistema está sujeito, especialmente nos pontos de interligação. É possível, no entanto, obter a melhor ou as melhores soluções condicionadas àquelas restrições, o que, para efeitos práticos, é o ponto ótimo de trabalho do sistema elétrico. Como extensão final do trabalho, um estudo econômico e um de estabilidade podem ser incluídos para cada aspecto enfocado nesta tese.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) MC LEOD, John. *Simulation Today From Fuzz to Fact*. Artigo central da revista *Simulation*, intitulado *Simulation Today*, v. 20, nº 3, Mar. 1973.
- 2) MC LEOD, John. *Simulation Today - and Yesterday*. Artigo central da revista *Simulation*, intitulado *Simulation Today*, v. 19, nº 5, Maio 1972.
- 3) RAHE, George A. *Simulation and Computer Graphics*. Artigo central da revista *Simulation*, intitulado *Simulation Today*, v. 19, nº 8, Ago. 1972.
- 4) JONISH, J. E. & PETERSON, R. E. *The Impact of a Dock Strike on the State of Hawaii: a Simulation*. Artigo central da revista *Simulation*, intitulado *Simulation Today*, v. 20, nº 4, abr. 1973.
- 5) ABKIN, Micahel H. *System Simulation and Policy-Making for Economic Development*. Artigo central da revista *Simulation*, intitulado *Simulation Today*, v. 19, nº 11, Nov. 1972.
- 6) SMITH, John R. *Load Flow? What Can It Tell You?* IEEE Trans., v. IA-8, nº 6, 1972.
- 7) ELGERD, Olle I. *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*. Mc Graw-Hill, 1971.
- 8) GLIMN, A. F. & WILLIS, L. D. *General Description of The Load Flow Program*. In: IBM 1130 Electric Power System Load Flow Program Manual. New York, IBM Corporation Program Department, 1968.

- 9) THANIKACHALAM, A. & TUDOR, J. R. *Optimal Rescheduling of Power For System Reliability*. IEEE Trans., v. PAS-90, nº 5, 1971, p. 2186.
- 10) STAGG, Glenn W. & EL-ABIAD, Ahmed H. *Computer Methods in Power System Analysis*. Mc Graw-Hill Book Company, cap. 8., 1968.
- 11) GALLOWAY, R. H. et alii. *New Approach to Power System Load Flow Analysis in a Digital Computer*. Proc. IEE, v. 117, nº 1, Jan. 1970, p. 165-167.
- 12) LAUGHTON, M. A. *Discussion on Investigation of the Load Flow Problem and Bootstrap Gauss-Seidel Load Flow*. Proc. IEE, v. 117, nº 1, Jan. 1970, p. 397.
- 13) ENNS, Mark et alii. *Load Flows by Hybrid Computation for Power System Operations*. Artigo apresentado no IEEE Power Industry Computer Applications (P.I.C.A.), 1971, p. 401-406.
- 14) LAHA, A. K. et alii. *Modified Form of Newton's Method for Faster Load Flow Solution*. Proc. IEE, v. 121, nº 8, Ago. 1974.
- 15) MUKHERJEE, P. K. & DHAR, R. N. *Optimal Load Flow Solution by Reduced-Gradient Method*. Proc. IEE, v. 121, nº 6, June 1974.
- 16) SASSON, A. M. et alii. *Optimal Load Flow Solution Using the Hessian Matrix*. Artigo apresentado no IEEE Power Industry Computer Applications (P.I.C.A.), 1971, p. 203-207.
- 17) STEVENSON Jr., William D. *Elements of Power System Analysis*. Mc Graw-Hill Book Company, INC. 1962, 2ª edição.

- 18) SIQUEIRA, Hugo. *Fluxo de Potência Pelo Método Aproximado*. Revista Mundo Elétrico, Jan. 1973, p. 22-24.
- 19) KNIGHT, U.G. *Power Systems Engineering and Mathematics*. Pergamon Press, 1972.
- 20) FLESCH, Rogerio & BALIGA, Bantval Vittaldas. *Simulação Digital da Localização de Geração*. Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Simulação, na XXVI Reunião Anual da SBPC, Recife, 1974.
- 21) BALIGA, Bantval Vittaldas & FLESCH, Rogerio. *Estudo Digital do Planejamento de Redes em Sistemas de Potência*. Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Simulação, na XXVI Reunião Anual da SBPC, Recife, 1974.
- 22) BALIGA, Bantval Vittaldas. *Intermediate-Range Peak-Load Demand Forecasting*. Tese de Doutorado submetida a VPI&SU, Blacksburg, Virginia, 1971, cap. 1.
- 23) BALIGA, Bantval Vittaldas. *Estudo do Planejamento do Sistema Florianópolis*. DVPE, CELESC, 1974.
- 24) BALIGA, Bantval Vittaldas. *Medida de Confiabilidade de Redes de Sistemas de Potência Utilizando Grafos*. Pesquisa relativa ao convênio BNDE-UFSC, 1972.
- 25) PESCHON, J. et alii. *Optimum Power Flow For System With Area Interchange Controls*. 71 TP 584-PWR, submetido ao IEEE Summer Power Meeting, 1971.
- 26) SHARMA, K. L. S. et alii. *Recursive Short-Term Load-Forecasting Algorithm*. Proc. IEE, v. 121, nº 1, Jan. 1974, p. 59-62.

- 27) DEWEY, A. G. & TUEL, W. G. *Power System Security Indices*. Artigo apresentado no IEEE Power Industry Computer Applications (P.I.C.A.), 1971, p. 365-373.
- 28) Ponderações com engenheiros do Departamento de Planejamento da CELESC a respeito da expansão do sistema de geração.
- 29) Ponderações com engenheiros do Departamento de Planejamento da CELESC a respeito de aspectos gerais do sistema.