

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

Um Sistema de Suporte ao Controle de Tensão/ Potência Reativa com Processamento de Conhecimento

por: Eng. João Carlos Fonseca/Teixeira n 235

orientador: Prof. Dr. Anésio dos Santos Júnior t

Este exemplar corresponde à redação final da tese,
defendida por JOÃO CARLOS FONSECA TEIXEIRA
e aprovada pela Comissão
Julgadora em 13/09/93.

Orientador

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

setembro 1993

DEDICADO:
Aos meus pais e irmãos

Este trabalho foi suportado pela **FAPESP** através do projeto temático de equipe sobre o Planejamento e Operação de Energia Elétrica com Predominância de Geração Hidroelétrica.

Agradecimentos

•

“As dívidas intelectuais são as mais difíceis de saldar.”

(Goldstein)

Agradecimento especial ao Anésio dos Santos Jr. pelas sugestões, críticas e paciência, cuja orientação possibilitou o presente trabalho.

À FAPESP e CNPq pela ajuda financeira que custearam meus estudos.

Aos colegas que deram uma contribuição significativa pelas valiosas opiniões; a Maurício e Ana Cláudia sou-lhes muito grato.

Por fim, declaro-me particularmente agradecido à minha família e a Sylvia pelo apoio e incentivo, onde poucas palavras nunca poderão traduzir o muito adquirido.

Resumo

Na operação dos Sistemas de Transmissão de Potência, os problemas de tensão/potência reativa podem ocorrer, a qualquer momento, devido a contingências e/ou alterações na demanda. Portanto, são necessárias decisões de controle adequadas, em um período de tempo relativamente pequeno, para melhorar o estado de operação de modo a não comprometer a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico.

Algumas destas situações podem exigir soluções baseadas em conhecimento específico dos operadores com o sistema elétrico. Esse tipo de conhecimento tem origem na experiência prática operacional adquirida ao longo dos anos. Portanto, as decisões de controle devem ser tomadas combinando a experiência dos operadores com as soluções propostas por algoritmos computacionais baseados em métodos matemáticos.

Atualmente, uma possibilidade de “armazenamento e utilização” de conhecimento humano específico adquirido experimentalmente é através de Sistemas Especialistas. Diversos são os sistemas propostos na literatura para suporte ao controle de tensão/potência reativa. Este trabalho tem por objetivo analisar algumas aplicações de Sistemas Especialistas apresentados na literatura e propor uma solução híbrida que incorpora uma heurística baseada em análise de sensibilidade com o conhecimento específico sobre a operação da rede elétrica. Este sistema tem a finalidade de auxiliar os operadores nas decisões de controle dos problemas e oferece a possibilidade de se desenvolver uma base de consulta a conhecimento específico independente da lógica da parte procedural do programa.

A metodologia proposta é descrita e resultados de simulações computacionais são apresentados para avaliar o protótipo desenvolvido.

Abstract

In the Power Transmission Systems operation, voltage/ reactive power problems can occur, any time due to contingencies and/or changes in demand. However, appropriate control decisions are necessary in a short time, in order to improve the operating state and not to put the security and reliability of electric system at risk.

Some of these situations can require solutions based on specific knowledge of the operators of the electric system. This kind of knowledge begins with practical operational experience acquired along the years. Therefore, control decisions must be taken matching the operator's experience with proposed solutions by computational algorithms based on mathematical methods.

At present, there is a possibility for "storing and using" the specific human knowledge acquired experimentally through Expert Systems. Several systems are proposed in the literature to support voltage/ reactive power control. The purpose of this work is analysing some applications of Expert Systems presented in the literature and suggesting a hybrid solution composed of heuristics based on sensitivity analysis with specific knowledge about operating electric networks. This system intends to help the operators with their control decisions of the problems, and it offers the possibility to develop a specific knowledge base, which is independent of the logic of the procedural part of the program, to be consulted by the system.

The suggested methodology is described and the results of the computational simulations are presented to evaluate the developed prototype.

Conteúdo

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
CONTEÚDO	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 SUPORTE AO CONTROLE DE TENSÃO/POTÊNCIA REATIVA	3
2.1 Gerenciamento da Operação de Redes de Transmissão	3
2.2 Controle de Tensão/Potência Reativa	9
2.3 Ferramentas Aplicadas no Controle de Tensão/Potência Reativa	11
2.4 Modelo Matemático para o Controle de Tensão/Potência Reativa	12
2.4.1 Modelo do Sistema Elétrico	12
2.4.2 Análise de Sensibilidade	17

3	SISTEMAS ESPECIALISTAS	21
3.1	Inteligência Artificial - IA	21
3.2	Sistemas Especialistas	22
3.3	Arquitetura Básica de Sistemas Especialistas	25
3.4	Características dos Sistemas Especialistas	28
3.5	Ferramentas Utilizadas no Desenvolvimento de Sistemas Especialistas	29
3.6	Processo de Desenvolvimento de Sistemas Especialistas	30
4	APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	33
4.1	Introdução	33
4.2	Aplicações no Controle Tensão/Potência Reativa	35
4.2.1	Sistema proposto por Liu e Tomsovic	35
4.2.2	Sistema descrito por Cheng, Malik e Hope	40
4.2.3	Sistema descrito por Godart e Puttgen	43
5	SISTEMA COM PROCESSAMENTO DE CONHECIMENTO PARA APOIO AO CONTROLE DE TENSÃO/POTÊNCIA REATIVA	47
5.1	Introdução	47
5.2	Descrição do Sistema	50
5.2.1	Rotina de Controle (regras implícitas - R1)	51
5.2.2	Análise de Sensibilidade (regras implícitas R1)	54
5.2.3	Base de Conhecimento (regras implícitas R1 e explícitas R2)	55
6	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS	59
6.1	Sistema IEEE-30 Barras	60
6.1.1	Cenário 1	63
6.1.2	Cenário 2	65
6.1.3	Cenário 3	68

6.2	Sistema IEEE-57 Barras	69
6.2.1	Cenário 4	73
6.2.2	Cenário 5	75
7	Conclusões	78
	BIBLIOGRAFIA	80
a	Relação entre Tensão e Potência Reativa	84
b	Processo de Correção na Variável de Controle	86

Lista de Figuras

2.1	Estados de operação	5
2.2	Ambiente de gerenciamento de um sistema de transmissão	8
2.3	Sistema híbrido	13
2.4	Representação do sistema	15
3.1	Tarefas de aplicação de Sistemas Especialistas	24
3.2	Arquitetura básica de Sistemas Especialistas	26
3.3	Ambiente em torno de um Sistema Especialista	31
4.1	Árvore de Sensibilidade	41
5.1	Arquitetura do sistema	48
5.2	Sistema desenvolvido	50
5.3	Procedimentos da Rotina de Controle	52
5.4	Controladores candidatos	54
5.5	Modelagem do Conhecimento Experimental	56
5.6	Representação da Árvore de Consulta	57
6.1	Diagrama unifilar - Sistema IEEE30 barras	61
6.2	Base de Consulta - IEEE30	63
6.3	Cenário 1: Perfil de tensão após a contingência	64

6.4	Cenário 1: Perfil de tensão depois da ação de controle	65
6.5	Cenário 2: Perfil de tensão após a contingência	66
6.6	Perfil de tensão - Análise de Sensibilidade	67
6.7	Perfil de tensão - Conhecimento Experimental	69
6.8	Diagrama unifilar - Sistema IEEE57 barras	70
6.9	Base de Consulta - IEEE57	73
6.10	Cenário 4: Perfil de tensão	74
6.11	Cenário 4: Perfil de tensão obtido pela base de consulta	74
6.12	Cenário 5: Perfil de tensão	75
6.13	Cenário 5: Perfil de tensão obtido pela análise de sensibilidade	76
6.14	Cenário 5: Perfil de tensão obtido pela base de consulta	77
a.1	Queda de tensão nas linhas	85

Lista de Tabelas

3.1	Características do conhecimento	23
3.2	Características de Sistemas	24
4.1	Resultados obtidos do VCES e do PL	39
6.1	Estado inicial do sistema IEEE30	62
6.2	Cenário 2: Geração de potência reativa	67
6.3	Estado inicial do sistema IEEE57	72

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A operação de um sistema de transmissão de energia elétrica é gerenciada através dos Centros de Supervisão e Controle. Estes centros são operados por pessoas treinadas que se utilizam de ferramentas computacionais, dentre as quais estão as funções avançadas de controle, que os auxiliem em suas decisões. No entanto, com o aumento da complexidade de operação, os operadores devem interpretar alguns fatos relevantes e determinar estratégias específicas de solução a fim de atender os requisitos operacionais e econômicos. Estas estratégias são, normalmente, baseadas no conhecimento específico dos operadores com a rede elétrica, o qual está relacionado com a experiência adquirida ao longo dos anos.

O objetivo inicial deste trabalho é analisar algumas das aplicações de Sistemas Especialistas no controle de tensão/potência reativa que estão relatadas na literatura. Dentre estas, Liu e Tomsovic [19] em 1986 deram início ao desenvolvimento de um Sistema Especialista que se utiliza de conhecimento operacional combinado com um modelo de sensibilidade da rede elétrica.

É ainda objetivo do trabalho propor um sistema de auxílio aos operadores nas decisões de controle no problema de tensão/potência reativa. A idéia deste sistema é combinar uma heurística baseada na análise de sensibilidade com consultas a uma base de conhecimento experimental. Esta heurística é baseada na análise dos cenários operacionais apresentados e está incorporada à lógica do sistema em um algoritmo que usa análise de sensibilidade. A base de consulta deve representar a experiência prática de especialistas com a operação da rede e está separada da lógica da parte procedural do programa.

Este trabalho está dividido em sete capítulos, sendo que este descreve as finalidades do trabalho e faz uma breve apresentação dos demais capítulos.

No capítulo 2 descreve-se de maneira simplificada o ambiente de gerenciamento

de um sistema de transmissão, dando ênfase na aplicabilidade de Sistemas com Inteligência Artificial. Analisa-se o problema do controle de tensão/potência reativa e descreve-se ainda o modelo matemático do sistema de transmissão que será utilizado na metodologia proposta.

O capítulo 3 é dedicado a Sistemas Especialistas, já que existe a possibilidade de aplicação da metodologia proposta nesse tipo de sistema. É feita uma breve introdução sobre Inteligência Artificial e apresentação da arquitetura básica de Sistemas Especialistas. Discute-se ainda, de forma geral, as características, linguagens aplicadas e o processo de desenvolvimento destes sistemas.

O assunto do capítulo 4 refere-se à aplicação de sistemas especialistas em sistemas de potência, com ênfase no problema de tensão/potência reativa. São descritos três sistemas citados na literatura aplicado ao controle de tensão/potência reativa.

No capítulo 5 apresenta-se a metodologia proposta e descreve-se arquitetura híbrida de um sistema de apoio à decisão no controle de tensão/potência reativa.

O capítulo 6 apresenta os resultados das simulações computacionais, onde avalia-se a metodologia proposta. As simulações foram realizadas com os sistemas 30 e 57 barras do IEEE.

E para finalizar, o capítulo 7 conclui o trabalho.

Capítulo 2

SUPORTE AO CONTROLE DE TENSÃO/POTÊNCIA REATIVA

Neste capítulo é descrito de maneira simplificada o ambiente de gerenciamento de um sistema de transmissão de energia elétrica. São discutidas as ferramentas computacionais de apoio aos processos de supervisão e controle da operação do sistema de transmissão. Em seguida é analisado o problema do controle de tensão/potência reativa e são discutidas algumas técnicas de aplicação disponíveis. É descrito ainda o modelo matemático do sistema de transmissão que será utilizado pela metodologia proposta neste trabalho.

2.1 Gerenciamento da Operação de Redes de Transmissão

O papel do Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS- Energy Management Systems) em um Centro de Supervisão e Controle é fornecer suporte aos operadores em suas decisões, as quais devem ser orientadas para a manutenção de uma operação segura e econômica.

São muitas as funções que devem estar disponíveis em um EMS [1] [2] [3]. Algumas são aqui descritas com o objetivo de ilustrar o problema de tomada de decisões no processo de supervisão e controle.

Supervisão (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition)

Este sistema visa coletar e processar, em tempo real, as informações da rede elétrica (estado das chaves e disjuntores, medidas analógicas).

Funções Avançadas

Destas funções, algumas são executadas sem a interferência dos operadores, como, por exemplo, as que reproduzem as condições de operação elétrica no momento:

- Configurador de Redes,
- Eliminador de Erros,
- Analisador de Observabilidade,
- Estimador de Estado.

Outras funções, orientadas para objetivos específicos, têm sua execução comandadas pelos operadores. Estes têm a sua disposição várias ferramentas que podem ou não serem acionadas, dependendo da situação operacional. As decisões sobre as ações de controle são tomadas combinando a experiência dos operadores com os resultados fornecidos por essas ferramentas. Algumas dessas funções são citadas aqui:

- Despacho Econômico,
- Análise de Segurança,
- Análise Dinâmica,
- Fluxo de Carga,
- Fluxo de Carga Ótimo.

A operação da rede elétrica pode ser caracterizada em quatro diferentes estados, os quais ainda são subdivididos [4] com o intuito de discutir novas aplicações e novos desenvolvimentos no processo de supervisão e controle. Estes estados, com suas respectivas características, são apresentados a seguir e representadas na figura (2.1).

Normal

É caracterizado pelo pleno atendimento das cargas e das restrições operacionais. Aqui as ações de controle têm caráter preventivo [5]. Seus objetivos, entre outros, é atender os consumidores (frequência, tensão) e satisfazer as restrições do sistema. Neste estado de operação, podem ser tomadas decisões no sentido de melhorar a segurança do sistema visando um estado seguro (ES) ou diminuir o custo de geração buscando um estado otimizado (EO). Na ocorrência de perturbações, tais como, mudanças na carga e contingências,

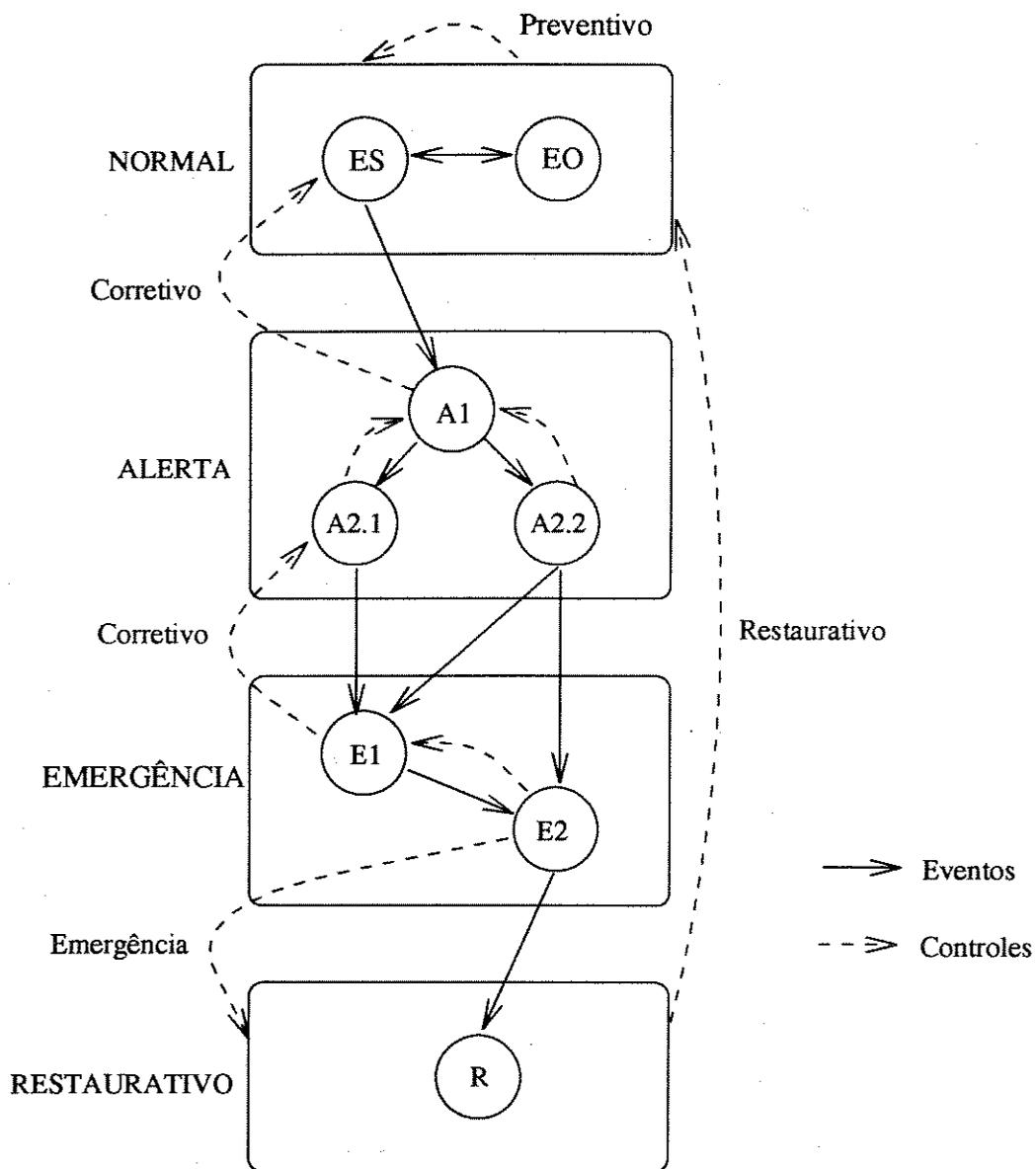


Figura 2.1: Estados de operação

o sistema pode ir para um novo estado normal ou para um estado de alerta ou até mesmo para um estado de emergência.

Alerta

Este estado é caracterizado pela possibilidade do sistema deixar de atender restrições operacionais caso ocorra alguma contingência. Nesta hipótese, deve existir ao menos uma contingência que leva o sistema ao estado de emergência [6]. Neste estado, os operadores devem levar o sistema de volta para o estado normal através de ações de controle corretivas. Estas ações podem ser: chaveamento corretivo, redespacho de geração, alteração nas magnitudes de tensão e tap de transformadores. Este estado pode apresentar situações distintas classificadas como [6]:

A1- situação na qual, diante de alguma perturbação as violações observadas podem ser facilmente corrigidas e uma ação de controle pode levar o sistema de volta para o estado normal;

A2- situações nas quais a vulnerabilidade do sistema é maior, podendo passar facilmente para o estado de emergência, como, por exemplo, situações de baixa tensão e sobrecorrente (A2-1) ou contingências com colapso de tensão e saída de carga (A2-2).

Emergência

Este estado se caracteriza por restrições operacionais violadas como consequência de contingências críticas e/ou cargas desatendidas. Aqui as ações de controle tem por objetivo restabelecer o sistema para o estado alerta através de ações corretivas ou conduzir o sistema para o estado restaurativo utilizando-se das ações emergenciais. Este estado pode apresentar-se em duas situações [5]:

E1- com restrições operacionais violadas, mas atendendo todas as cargas. Aqui uma ação de controle pode levar o sistema a voltar para o estado de alerta;

E2- situações não corrigíveis. Aqui as ações de controle podem cortar cargas para manutenção da estabilidade ou tentar recuperar um estado estável sem necessidade de corte de cargas.

Restaurativo

Caracterizado pelo fato de que parte das cargas não estão atendidas e que todas restrições operacionais ou parte delas estão dentro dos limites (R). Este fato, habitualmente, é resultado de uma ação de controle de emergência. Neste estado de operação, as ações de controle tem por objetivo levar o sistema a um estado de operação normal o mais rápido possível [6].

As funções avançadas que suportam as ações de controle discutidas anteriormente se baseiam em algoritmos computacionais que operacionalizam os métodos matemáticos sobre os modelos de representação da rede elétrica. Entretanto, a experiência acumulada pelos operadores, com estratégias específicas de solução em situações anteriores, tem um papel importante no auxílio a decisões, mas não se encontram representadas nas funções avançadas disponíveis. Esse conhecimento experimental agregado aos operadores experientes, quando disponíveis, pode ser utilizado para uma operação mais eficiente do sistema. Atualmente, existe a possibilidade da incorporação desse tipo de conhecimento a programas computacionais denominados Sistemas Especialistas (Sistemas com Inteligência Artificial - IA) [7] [8] [9] [10]. Sistemas dessa natureza têm a vantagem de manter a disponibilidade desse tipo de conhecimento para operadores menos experientes constituindo, assim, uma importante ferramenta de suporte à decisão. Além disso, a portabilidade desse conhecimento em computadores digitais, através dos Sistemas Especialistas, torna possível o seu compartilhamento com diferentes áreas técnicas das empresas que planejam, programam e operam a rede de transmissão.

Na figura (2.2), está esquematizado de forma simplificada o ambiente EMS onde já se pressupõe a disponibilidade de Sistemas com IA.

Os Sistemas Especialistas apresentam flexibilidade que permite ao operador, quando defrontando-se com uma situação nova e resolvendo-a de modo empírico, agregar esse novo conhecimento específico ao sistema. Uma outra característica é a disponibilidade do conhecimento, que na ausência do operador experiente, possibilita a um outro operador adquirir um aprendizado rápido sobre a situação, consultando o conhecimento armazenado.

Para que estes sistemas alcancem sua eficácia plena, alguns problemas existem e ainda são um desafio [4] [10] para as áreas de pesquisa. Um desses problemas é a interação entre esses sistemas e os programas convencionais que executam as funções avançadas, como, por exemplo, a transferência de dados que são importantes para a execução de ambos. Com a tecnologia disponível no momento, essa interação é efetivada via operador. Esse fato está representado pelas setas tracejadas na figura (2.2). Outra dificuldade, são os métodos de aquisição do conhecimento dos especialistas e a manutenção desses sistemas [7] [8].

São muitas as situações que exigem a experiência de especialistas (ou consulta a sistemas especialistas) combinada com a execução de funções avançadas. Neste trabalho, pretende-se abordar o problema do controle tensão/potência reativa em situações não críticas onde as ações corretivas ou preventivas estão restritas a pequenas alterações nos controles. Assim, propõe-se a utilização de uma ferramenta de suporte a decisão que busca a solução em uma arquitetura que executa de maneira integrada um algoritmo convencional baseado em Análise de Sensibilidade e uma Base de Conhecimento Experimental. A nível de

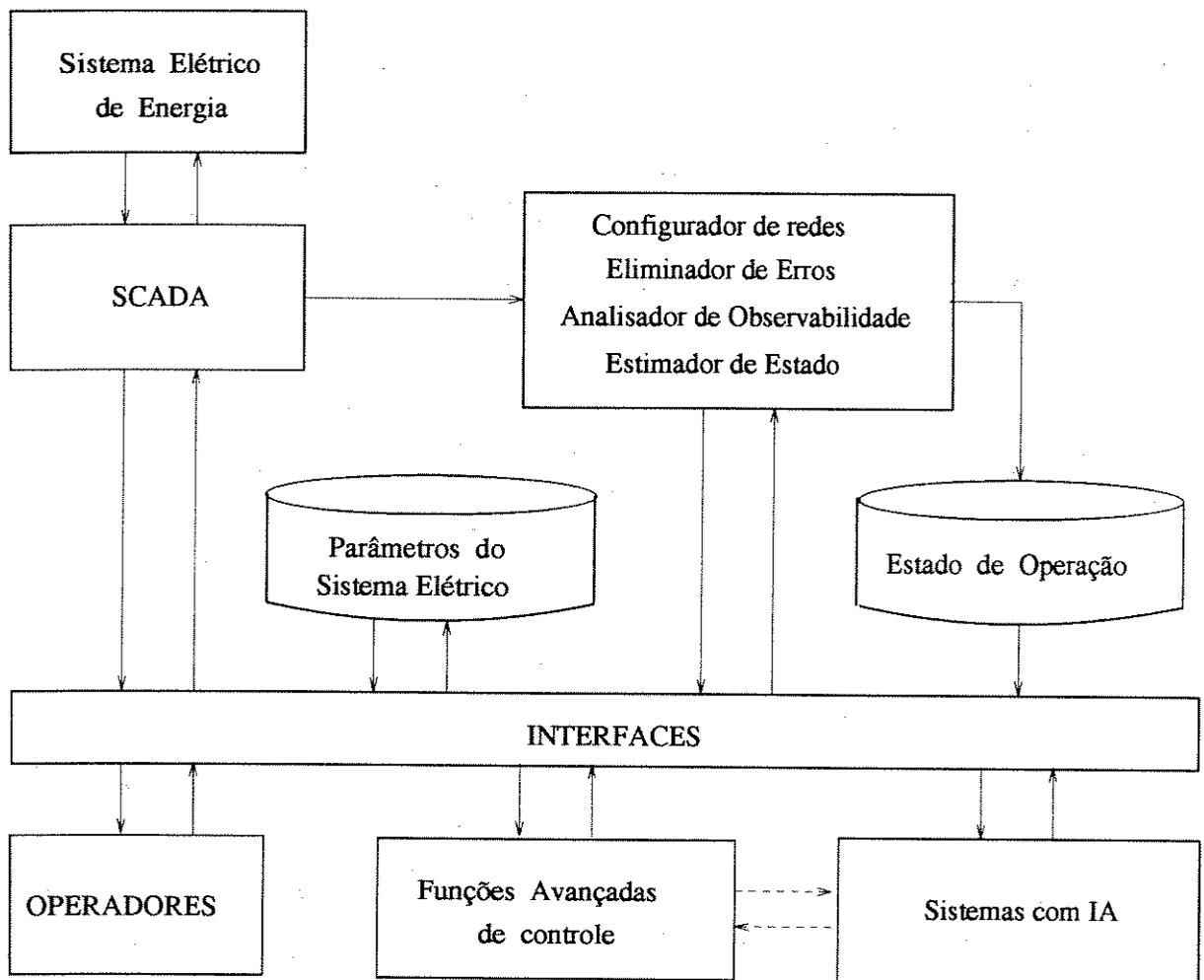


Figura 2.2: Ambiente de gerenciamento de um sistema de transmissão

produção, esse conhecimento deve ser extraído dos especialistas, formalizado e armazenado. Para isso, técnicas específicas de aquisição e representação do conhecimento são utilizadas em um processo denominado *Engenharia do Conhecimento* [8] [9].

A seguir o problema do controle tensão/potência reativa é apresentado, e algumas técnicas disponíveis para aplicação são discutidas.

2.2 Controle de Tensão/Potência Reativa

Um dos problemas em sistemas elétricos é o controle da magnitude de tensão nos barramentos do sistema para diversas condições de carga. Este controle tem por objetivo a melhoria do perfil de tensão em condições normais de operação a fim de atender a certos critérios operacionais. Também tem por finalidade, a manutenção do nível de tensão para eventuais perturbações na rede, evitando-se que tensões indesejáveis nos centros de cargas ocorram e danifiquem os equipamentos, resultando numa má operação elétrica.

No sistema elétrico de potência, o problema do controle da magnitude de tensão está geralmente ligado aos requisitos de potência reativa [11] [12] [13] [14].

O balanço de potência reativa na rede está relacionado com a potência ativa transmitida em condições de carga leve ou pesada. Em carga leve, com baixas correntes de carga, o efeito da linha é capacitivo, portanto, há um excesso de potência reativa. Isso resulta num elevado nível de tensão. Em carga pesada, com elevadas correntes de carga, o efeito da linha é indutivo. Portanto, há uma deficiência de potência reativa a qual resulta num baixo nível de tensão. No apêndice (A) está demonstrada a relação entre tensão e potência reativa, na qual verifica-se que as quedas de tensão nas linhas de transmissão são determinadas basicamente pelo fluxo de potência reativa.

Para corrigir o problema citado, os equipamentos de controle consistem em absorver (carga leve) ou fornecer (carga pesada) os reativos necessários aos requisitos da compensação das linhas e cargas. Por esta forma, os equipamentos atuam nas tensões de certos pontos da rede em função da carga. Estes equipamentos devem estar o mais próximo possível das cargas, pois deste modo minimiza-se a circulação de reativo na rede, consequentemente diminui-se a queda de tensão e perdas (sempre indesejáveis), ocasionando-se um aumento na capacidade de transmissão.

Com os equipamentos de controle sendo operados, manualmente ou automaticamente, de forma coordenada, atenua-se a alocação de compensadores de reativos, evitando custos operacionais. Este tipo de procedimento operativo está associado à redistribuição da geração de reativo.

Dentre os equipamentos de controle de tensão disponíveis nas redes de transmissão, os mais importantes são:

- geradores síncronos;
- compensadores síncronos;
- compensadores estáticos de barra: capacitores e indutores;
- compensadores estáticos controláveis;
- transformadores com taps variáveis.

Uma apresentação mais detalhada das características de cada um destes, pode ser encontrado em [11] [13] [14].

Situações indesejáveis quanto às perturbações existentes em sistemas elétricos, tais como, mudanças inesperadas na demanda da carga ou mudança na configuração do sistema, perturbam o equilíbrio entre geração e consumo. Estas perturbações podem causar variação na magnitude de tensão, onde será necessário estabelecer ações de controle que são tomadas em função de objetivos pré-definidos. A maneira usual de corrigir esta variação de tensão é chaveando junto aos centros de carga os compensadores estáticos de barra, ajustando a posição de taps em transformadores ou variando a corrente de excitação (tensão de barra) dos geradores e compensadores síncronos. Caso estas medidas não sejam suficientes para o controle de tensão, pode-se utilizar outros métodos como, por exemplo, desligamento de linhas de transmissão (corte de carga).

Estas ações de controle são executadas pelos operadores, os quais necessitam de um certa familiaridade com a operação do sistema, para manter um perfil de tensão adequado dentro de limites operacionais pré-estabelecidos, seja em condições de carga leve ou pesada.

Resumindo, as ações de controle tensão/potência reativa têm como objetivos:

- melhorar a operação e segurança do sistema;
- melhorar o perfil de tensão;
- melhorar a capacidade de transmissão de energia;
- reduzir as perdas de potência ativa; etc.

2.3 Ferramentas Aplicadas no Controle de Tensão/Potência Reativa

São várias as ferramentas computacionais de suporte ao controle de tensão/potência reativa. Inúmeras delas utilizam técnicas baseadas em modelo matemático, tais como:

- Análise de Sensibilidade [15],
- Técnicas de Otimização
 - Programação Linear [16] [17],
 - Programação Não Linear [18].

As ferramentas computacionais baseadas em Análise de Sensibilidade podem fornecer informações rápidas ao operador. Através destas, o operador não só saberá quais os controladores que têm maior influência sobre uma determinada barra da rede, como também, poderá ser auxiliado na escolha dos controladores. Porém, às vezes, a utilização do controlador de maior sensibilidade, em redes de transmissão real, pode conduzir a um estado de operação deficiente, do ponto de vista da margem de reserva de potência reativa [15]. Além destas informações, o operador pode prever o estado operacional da rede, simulando alterações em determinados controladores. Deste modo, avalia-se quais as magnitudes de tensão da rede são mais afetadas por estes controladores. No entanto, esta informação é válida apenas para análise de pequenas alterações no controle. Verifica-se então, que o operador pode através destas ferramentas ganhar uma certa habilidade na operação da rede.

Já as ferramentas computacionais baseadas em técnicas de otimização são mais sofisticadas e têm a capacidade de considerar parte das restrições operacionais do sistema. Entretanto, as restrições operacionais complexas da rede, difíceis de serem tratadas, são eliminadas da formulação do problema. Dependendo dos objetivos específicos a serem atendidos e das restrições de operação a serem satisfeitas, a solução pode exigir considerável tempo computacional. Além disso, podem ocorrer dificuldades para a implementação das ações de controle calculadas, ou seja, estas nem sempre são, na prática, aceitáveis pelos operadores [10].

Uma grande parte dos problemas no controle de tensão/potência reativa ainda continua sendo resolvida pelo operador humano através da experiência acumulada de muitos anos. Esses problemas, normalmente, apresentam as seguintes características [10]:

- não podem ser representados através do modelo matemático;

- podem ser representados através do modelo matemático, mas a sua complexidade torna a solução computacional ineficiente.

As ferramentas com Inteligência Artificial que têm capacidade de armazenar o conhecimento acumulado pela experiência são denominadas *Sistemas Especialistas* [8] [9]. Entretanto, as aplicações no controle de tensão/potência reativa têm sido verificadas pelo uso de conhecimento específico sobre a operação do sistema combinados com algum tipo de representação matemática de parte do problema. Na referência [19], Liu e Tomsovic apresentam um sistema (VCES - Voltage Control Expert System) que combina conhecimento específico representado através de regras com a utilização de Análise de Sensibilidade feita no modelo matemático do sistema de transmissão. Outros sistemas análogos são apresentados em [20] [21] [22] [23].

De um modo geral, as ferramentas que usam técnicas de IA fazem também uso do modelo matemático do sistema de transmissão. Sistemas dessa natureza híbrida têm sido denominados de “Sistemas Especialistas” como pode ser observado em [19] [20] [21] [22]. Neste trabalho tem-se como objetivo propor uma arquitetura híbrida que combina uma heurística baseada em análise de sensibilidade combinada com consultas a uma base de conhecimento experimental que está representada na figura (2.3).

A seguir será descrito o modelo matemático do sistema de transmissão e sua linearização. Esse modelo será utilizado na descrição da arquitetura proposta no capítulo 5.

2.4 Modelo Matemático para o Controle de Tensão/Potência Reativa

2.4.1 Modelo do Sistema Elétrico

O modelo do sistema elétrico está representado nas equações matemáticas do Fluxo de Potência (ou Fluxo de Carga). Este consiste na determinação, em regime permanente senoidal, do estado da rede elétrica, sob determinadas condições estabelecidas de geração e carga.

Na literatura [14] [24], o modelo estático do sistema é representado a partir da formulação matricial baseada nas Leis de Kirchhoff. Tem-se, portanto,

$$[I] = [Y][V] \quad (2.1)$$

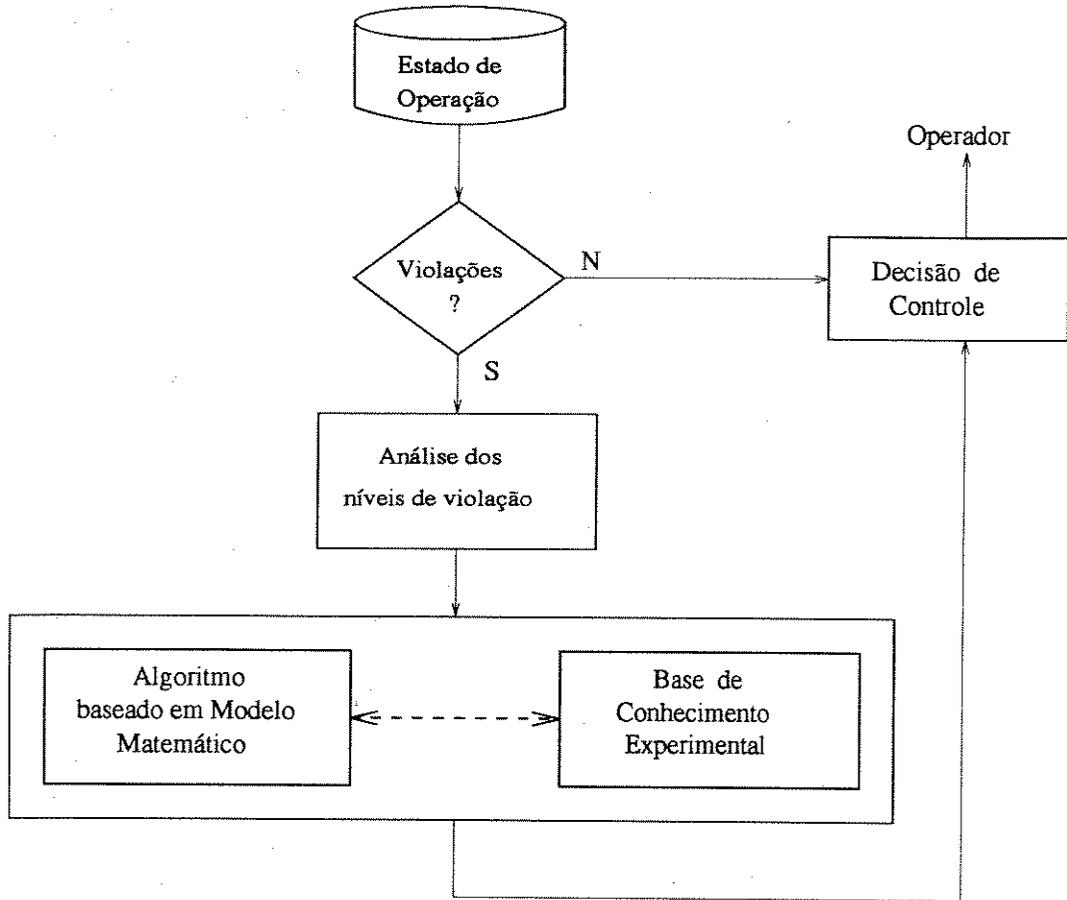


Figura 2.3: Sistema híbrido

\underline{I} - vetor das injeções de correntes fasoriais nos nós;
 \underline{V} - vetor das tensões fasoriais nos nós;
 $Y = G + jB$ matriz admitância nodal.

Considerando uma linha (i) da equação (2.1), a injeção líquida de corrente I_i pode ser escrita como:

$$\bar{I}_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n = \sum_{k=1}^n Y_{ik}\bar{V}_k \quad (2.2)$$

onde:

$$Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$$

G_{ik} - condutância de linha da barra i para k,

B_{ik} - susceptância de linha da barra i para k,

$$\bar{V}_k = V_k \exp(j\Theta)$$

$V_k \exp(j\Theta)$ - tensão complexa da barra k,

V_k - magnitude de tensão da barra k.

A potência complexa conjugada na barra (i) é dada por:

$$S_i^* = P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \bar{I}_i \quad (2.3)$$

onde:

P_i - injeção líquida de potência ativa na barra i ($P_{(i)} = P_{\text{Geração}(i)} - P_{\text{Demanda}(i)}$),

Q_i - injeção líquida de potência reativa na barra i ($Q_{(i)} = Q_{\text{Geração}(i)} - Q_{\text{Demanda}(i)}$).

Substituindo (2.2) em (2.3), resulta em:

$$P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} \bar{V}_k \quad (2.4)$$

ou em forma exponencial:

$$P_i - jQ_i = V_i \exp^{-j\Theta_i} \sum_{k=1}^n (G_{ik} + jB_{ik})(V_k \exp^{j\Theta_k}) \quad (2.5)$$

Separando as partes reais e imaginárias, as injeções de potência ativa e reativa em cada barra são:

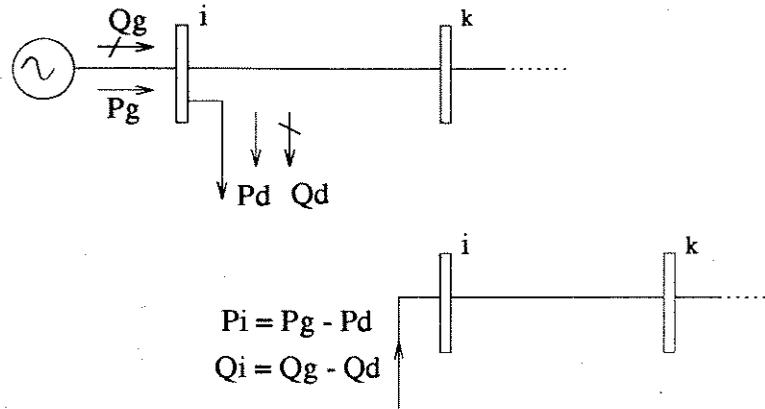


Figura 2.4: Representação do sistema

$$P_i = V_i \sum_{k \in \Omega_i} V_k [G_{ik} \cos \Theta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \Theta_{ik}] \quad (2.6)$$

$$Q_i = V_i \sum_{k \in \Omega_i} V_k [G_{ik} \text{sen} \Theta_{ik} - B_{ik} \cos \Theta_{ik}] \quad (2.7)$$

Onde:

$\Theta_{ik} = \Theta_i - \Theta_k$ abertura angular entre as barras i e k,

Ω_i - conjunto de todas barras adjacentes a barra i, incluindo a própria barra i.

As equações (2.6) e (2.7) podem ser descritas como:

$$P_i - P_i(V, \Theta) = \Delta P_i = 0$$

$$Q_i - Q_i(V, \Theta) = \Delta Q_i = 0 \quad (2.8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

A figura (2.4) ilustra o sistema (2.8). Cada barra do sistema está associada com quatro variáveis: V_i, Θ_i, P_i, Q_i .

O sistema (2.8), pode ser descrito na forma vetorial em função das variáveis e parâmetros envolvidos no modelo. Assim,

$$g(\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}) = \underline{0}$$

x - variáveis de estado (dependentes): são aquelas cujo valor é dependente do valor das variáveis de controle.

- Θ ângulo em todas as barras com exceção da barra de balanço,
- V_c magnitude de tensão nas barras de carga,
- Q_g potência reativa nas barras de controle.

u - variáveis de controle (operacionais): são aquelas sobre as quais o operador da rede tem controle.

- V_g magnitude da tensão nas barras com controle,
- P_g potência ativa dos geradores,
- t tap de transformadores.

p - variáveis de perturbação (especificados): são os parâmetros do sistema.

- P_c potência ativa de carga,
- Q_c potência reativa de carga.

Devido à propriedade de não linearidade do sistema, a solução algorítmica das equações algébricas está baseada em processos iterativos. O método de Newton-Rapson, que está documentado na literatura [25], como diversos outros métodos existentes, é usado para obter a solução x do fluxo de potência, de forma a encontrar um ponto de operação que seja factível com relação às restrições de carga (restrições de igualdade). Assim, temos que:

$$g(\underline{x}_o, \underline{u}_o, \underline{p}_o) = \underline{0} \quad (2.9)$$

A partir deste ponto de operação, verifica-se há necessidade de algum procedimento operativo de controle. Isto se deve ao fato que, este ponto de operação é sujeito a restrições operacionais (restrições de desigualdade). Estas incluem limites em:

- magnitude de tensão nas barras de carga,

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i \in (PQ)$$

- injeção de potência reativa nas barras de controle e folga,

$$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max} \quad i \in (PV + V\theta)$$

- posição de tap dos transformadores,

$$t_i^{min} \leq t_i \leq t_i^{max} \quad i \in (transformadores)$$

- carregamento permitido para a transmissão nas linhas e transformadores.

$$|P_{ik}| \leq P_{ik}^{lim}$$

Técnicas computacionais como, por exemplo, Eliminação de Gauss e Fatoração LDU são utilizadas na resolução de \mathbf{x} . Uma apresentação mais detalhada destas técnicas podem ser encontradas em [26].

Portanto, a solução do Fluxo de Potência consiste em determinar o perfil de tensão, potências reativas geradas/absorvidas e os fluxos de potência ativa e reativa em todo o sistema, de modo que satisfaça tanto as restrições de carga quanto as restrições operacionais.

2.4.2 Análise de Sensibilidade

A sensibilidade de um sistema é definida pela taxa de variação das variáveis dependentes \mathbf{x} em relação às variações das variáveis independentes \mathbf{y} (variáveis de controle \mathbf{u} + variáveis de perturbação \mathbf{p}), para uma certa condição de operação do sistema elétrico em regime estacionário [12].

$$S_{xy} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{y}} \bigg|_{(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p})}$$

Supondo-se que o ponto de operação inicial $(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o, \mathbf{p}_o)$ que satisfaça a equação (2.9), sofra pequenas perturbações ΔP produzidas por flutuações nas cargas. Assim, para compensar os efeitos de ΔP , será necessário alterar determinadas variáveis de controle de um certo Δu . Verificar-se-á um novo estado permanente:

$$g(\mathbf{x}_o + \Delta \mathbf{x}, \mathbf{u}_o + \Delta \mathbf{u}, \mathbf{p}_o + \Delta \mathbf{p}) = \mathbf{0}$$

Se considerarmos que as perturbações sejam pequenas, o modelo linearizado do sistema é obtido da aproximação de primeira ordem na expansão de Taylor, em volta do ponto de operação nominal. Logo,

$$g(\underline{x}_o, \underline{u}_o, \underline{p}_o) + g_x \Delta \underline{x} + g_u \Delta \underline{u} + g_p \Delta \underline{p} = \underline{0} \quad (2.10)$$

onde:

g_x, g_u, g_p - matrizes jacobianas relacionadas com os vetores $\underline{x}, \underline{u}, \underline{p}$ respectivamente.

Substituindo (2.9) em (2.10), temos:

$$g_x \Delta \underline{x} + g_u \Delta \underline{u} + g_p \Delta \underline{p} = \underline{0} \quad (2.11)$$

Pré-multiplicando a equação (2.11) por g_x^{-1} e reorganizando-a, temos:

$$\Delta \underline{x} = -g_x^{-1} g_u \Delta \underline{u} - g_x^{-1} g_p \Delta \underline{p}$$

Fazendo

$$S_{xu} = -g_x^{-1} g_u \quad e \quad S_{xp} = -g_x^{-1} g_p$$

Obtemos:

$$\Delta \underline{x} = S_{xu} \Delta \underline{u} + S_{xp} \Delta \underline{p} \quad (2.12)$$

Portanto, se não ocorrem variações em \underline{p} ($\Delta \underline{p} = 0$), o estado das variáveis dependentes é afetado apenas pela modificação das variáveis de controle, logo:

$$\Delta \underline{x} = -(g_x)^{-1} (g_u) \Delta \underline{u} \quad (2.13)$$

Descrevendo-se a equação (2.13) em termos das variáveis elétricas, temos:

$$\begin{Bmatrix} \Delta \Theta \\ \Delta V_{(PQ)} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \Theta} & \frac{\partial P}{\partial V_{(PQ)}} \\ \frac{\partial Q}{\partial \Theta} & \frac{\partial Q}{\partial V_{(PQ)}} \end{Bmatrix}^{-1} * \begin{Bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V_{(PV)}} & \frac{\partial P}{\partial t} \\ \frac{\partial Q}{\partial V_{(PV)}} & \frac{\partial Q}{\partial t} \end{Bmatrix} * \begin{Bmatrix} \Delta V_{(PV)} \\ \Delta t \end{Bmatrix}$$

$$\Delta \underline{x} = [S_{xu}] \Delta \underline{u}$$

A matriz de sensibilidade S_{xu} fornece uma relação linear do sistema de transmissão.

As matrizes g_x e g_u são obtidas a partir do cálculo das derivadas da função g , no ponto x_o, u_o, p_o . Os elementos da Jacobiana g_x , relacionados com o vetor \underline{x} , são obtidas a partir das derivadas:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i} = -V_i^2 B_{ii} - V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \text{sen} \Theta_{ik} - B_{ik} \cos \Theta_{ik}) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \Theta_k} = V_i V_k (G_{ik} \text{sen} \Theta_{ik} - B_{ik} \cos \Theta_{ik}) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{i(PQ)}} = -V_i G_{ii} + \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \Theta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \Theta_{ik}) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{k(PQ)}} = V_i (G_{ik} \cos \Theta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \Theta_{ik}) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \Theta_i} = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \Theta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \Theta_{ik}) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \Theta_k} = -V_i V_k (G_{ik} \cos \Theta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \Theta_{ik}) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{i(PQ)}} = -V_i B_{ii} + \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \text{sen} \Theta_{ik} - B_{ik} \cos \Theta_{ik}) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{k(PQ)}} = V_i (G_{ik} \text{sen} \Theta_{ik} - B_{ik} \cos \Theta_{ik}) \quad (2.21)$$

$$i \in (PV + PQ) \quad e \quad k \in (PV + PQ)$$

Os elementos da matriz g_u , relacionados com o vetor \underline{u} , são obtidos a partir das derivadas:

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{i(PV)}} = -V_i G_{ii} + \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \Theta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \Theta_{ik}) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_{k(PV)}} = V_i (G_{ik} \cos \Theta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \Theta_{ik}) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{i(PV)}} = -V_i B_{ii} + \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \text{sen} \Theta_{ik} - B_{ik} \cos \Theta_{ik}) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_k(PV)} = V_i(G_{ik} \text{sen} \Theta_{ik} - B_{ik} \cos \Theta_{ik}) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial t_{ik}} = 2t_{ik} V_i^2 g_{ik} - V_{ik}(b_{ik} \text{sen} \Theta_{ik} + g_{ik} \cos \Theta_{ik}) \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial t_{ik}} = V_i V_k (b_{ik} \text{sen} \Theta_{ik} - g_{ik} \cos \Theta_{ik}) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t_{ik}} = -2t_{ik} V_i^2 b_{ik} + V_{ik}(b_{ik} \cos \Theta_{ik} - g_{ik} \text{sen} \Theta_{ik}) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial t_{ik}} = V_i V_k (b_{ik} \cos \Theta_{ik} + g_{ik} \text{sen} \Theta_{ik}) \quad (2.29)$$

$$i \in (PV + PQ) \quad e \quad k \in (PV + t)$$

onde:

b_{ik} e g_{ik} - elementos de admitância série do transformador.

Portanto, visto que a determinação dos parâmetros de sensibilidade tem como hipótese básica a aproximação linear da função, os resultados não serão representativos quando as variações em torno do ponto de operação forem grandes.

Capítulo 3

SISTEMAS ESPECIALISTAS

Este capítulo apresenta uma breve introdução sobre Inteligência Artificial, abordando características, evolução histórica e áreas de aplicação. Em seguida é dado um resumo sobre Sistemas Especialistas, onde são descritas algumas das principais características e aplicações. Também são discutidas as linguagens de aplicação e o processo de desenvolvimento de sistemas deste tipo.

3.1 Inteligência Artificial - IA

Embora haja muitas definições, assume-se aqui que, a inteligência artificial tem por objetivo auxiliar a automatização de procedimentos humanos possíveis de serem realizados pelo computador digital. A inteligência artificial é baseada em princípios teóricos que incluem metodologias usadas na representação do conhecimento, estratégias necessárias para aplicação do mesmo e linguagens de programação usadas em sua implementação.

A representação do conhecimento e a estratégia de busca para obter a informação necessária, são duas questões importantes que devem ser ressaltadas na aplicação da inteligência artificial [7] [27] [28]. Suas principais características são:

1. manipulação de símbolos;
2. inferências e deduções a partir das informações disponíveis e
3. aplicação de conhecimento específico para resolução de problemas.

Nos primeiros trabalhos da década de 50, os estudos em IA eram voltados para o desenvolvimento de jogos e provas de teoremas na matemática e lógica. Já nos anos 60,

caracterizaram-se pelas estratégias de buscas heurísticas. A partir da década de 70, os pesquisadores de IA exploravam formas de usar os conhecimentos especializados adquiridos na solução de problemas específicos. Toda essa demanda conduziu ao surgimento de novas áreas de aplicações, dentre as quais destacam-se:

- Compreensão da Linguagem Natural;
- Robótica;
- **Sistemas Especialistas;**
- Visão por Computador;
- Raciocínio Automático e
- Aprendizagem de Máquina.

3.2 Sistemas Especialistas

Sistemas Especialistas são programas computacionais que têm a capacidade de armazenar e processar conhecimento sobre problemas específicos. Estes programas são baseados no conhecimento de especialistas humanos.

Este conhecimento especializado não inclui tão somente dados, mas também, um conjunto de informações adquiridas da experiência que, quando manipuladas pela capacidade de raciocínio de forma pessoal, produz significativas conclusões sobre uma determinada tarefa. Esse conhecimento é codificado em procedimentos computacionais (por alguma forma de representação) mostrando as relações entre os fatos (informações) conhecidos que, quando processados, produzem soluções.

A tabela 3.1 mostra algumas características do conhecimento humano e do conhecimento armazenado em computador digital [8]:

Por estas razões muitos dos sistemas especialistas são, na verdade, auxiliares de peritos onde os problemas mais simples são resolvidos por aqueles, enquanto os mais complexos ainda necessitam de decisões destes.

CONHECIMENTO HUMANO	CONHECIMENTO ARMAZENADO
Perecível	Permanente
Irregular	Consistente
Difícil de documentar	Fácil de documentar
Difícil de transferir	Fácil de transferir
Criativo	Não é criativo
Adaptável	Rígido
Apresenta senso comum	Técnico
Amplio	Restrito

Tabela 3.1: Características do conhecimento

Os sistemas especialistas são especificamente diferenciados dos sistemas convencionais pela:

- capacidade de manipulação de expressões simbólicas ao invés de expressões numéricas;
- capacidade de representar o processo de solução do problema separado da lógica do algoritmo (Forma Declarativa). Assim, o conhecimento específico armazenado pode sofrer modificações de modo que a lógica não altere. Já nos sistemas convencionais, o processo de solução e a lógica estão misturados no programa (Forma Procedural). Para modificá-lo é preciso alterar toda a estrutura do programa;
- resolução de tarefas empregando busca heurística.
- resolução de alguns problemas onde o conhecimento é incerto, incompleto e não determinístico. Nos convencionais, o modelo matemático para o problema e o algoritmo para a solução são conhecidos e bem definidos.

A tabela 3.2 resume algumas características que distinguem um sistema especialista de um sistema convencional [8].

Estas peculiaridades justificam os diversos tipos de sistemas especialistas desenvolvidos nas seguintes áreas:

- | | |
|--------------|----------------------------|
| - Medicina | - Química |
| - Geologia | - Computação |
| - Direito | - Militar |
| - Comércio | - Agricultura |
| - Eletrônica | - Engenharia , etc. |

SISTEMA CONVENCIONAL	SISTEMA ESPECIALISTA
Representação e uso de dados	Representação e uso do conhecimento
Algorítmico	Heurístico
Estruturado(rígido)	Modular(flexível)
Processo sequencial	Processo conclusivo
Banco de dados adaptável	Banco de conhecimento executável

Tabela 3.2: Características de Sistemas

Entre eles, estão, o MYCIN desenvolvido para diagnóstico médico, o DEN-TRAL criado para fazer análises químicas, o PROSPECTOR desenvolvido para pesquisa de depósitos de minério, o R1 modelado para configuração do computador e outros mais [7] [8].

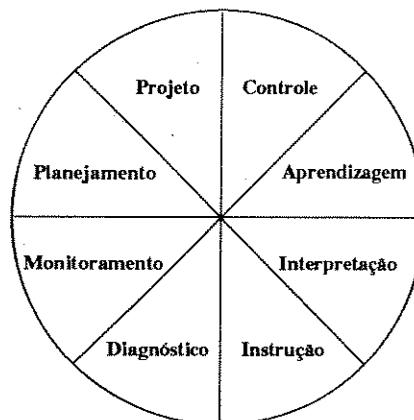


Figura 3.1: Tarefas de aplicação de Sistemas Especialistas

A figura 3.1, mostra algumas tarefas nas quais os sistemas especialistas têm grande aplicação.

Portanto, muitos dos Sistemas Especialistas têm demonstrado consideravelmente bons resultados, em diversas tarefas, com o desempenho próximo de especialistas humanos. Estes sistemas não necessariamente substituem o homem, mas servem como auxiliares, melhorando a produtividade e a qualidade da tomada de decisões.

3.3 Arquitetura Básica de Sistemas Especialistas

Uma arquitetura básica de sistemas especialistas encontra-se ilustrada na figura 3.2, e engloba os seguintes componentes:

- **Base de Dados**

Consiste de estruturas de dados que armazenam informações sobre um dado domínio.

- **Base de Conhecimento**

Compreende fatos e regras adquiridos de especialistas para resolver os problemas numa aplicação particular. Os *fatos* constituem informações sobre o domínio e as *regras* descrevem relações para a manipulação dos fatos.

Para resolver problemas complexos, o conhecimento pode ser sofisticado e muitas vezes resulta numa enorme base de conhecimento. Neste caso, outro conhecimento precisa ser desenvolvido para ser aplicado na Base de Conhecimento. Este conhecimento é denominado de *Meta-Conhecimento*, ou seja, conhecimento aplicado sobre conhecimento [8].

Para os diferentes tipos de representação do conhecimento, as formas mais usadas são:

- Lógica [7] [27]

A lógica é precisa, flexível e modular [7]. Estas caracterizações facilitam o crescimento da base de conhecimento. A lógica tem a capacidade de manipular e deduzir novos fatos a partir de fatos já conhecidos. Para isso, se utiliza de regras de inferência, como Modus Ponens [27] e Resolução [27], para fazer suas deduções. Entre os métodos lógicos mais usados está o Cálculo do Predicado de Primeira-Ordem [27].

- Regras de Produção [27] [28]

O conhecimento é representado na forma de regras, ou seja, na forma dedutiva: Se (condição) é verdadeira, então (ação) é inferida ou executada. As regras são executadas por um ciclo de três procedimentos básicos [28]: Unificação, Resolução de Conflitos e Ação. A unificação verifica se as condições das regras são satisfeitas com os dados existentes na Base de Dados. Se mais de uma regra é satisfeita, a resolução de conflito decidirá qual será disparada baseada em critérios específicos (por exemplo, prioridade das regras). A regra selecionada é então processada. Normalmente a ação altera os dados na Base de Dados e, portanto, o ciclo é repetido. Assim, a metodologia baseada em regras tem sido largamente utilizada em Sistemas Especialistas, devido a sua sintaxe ser

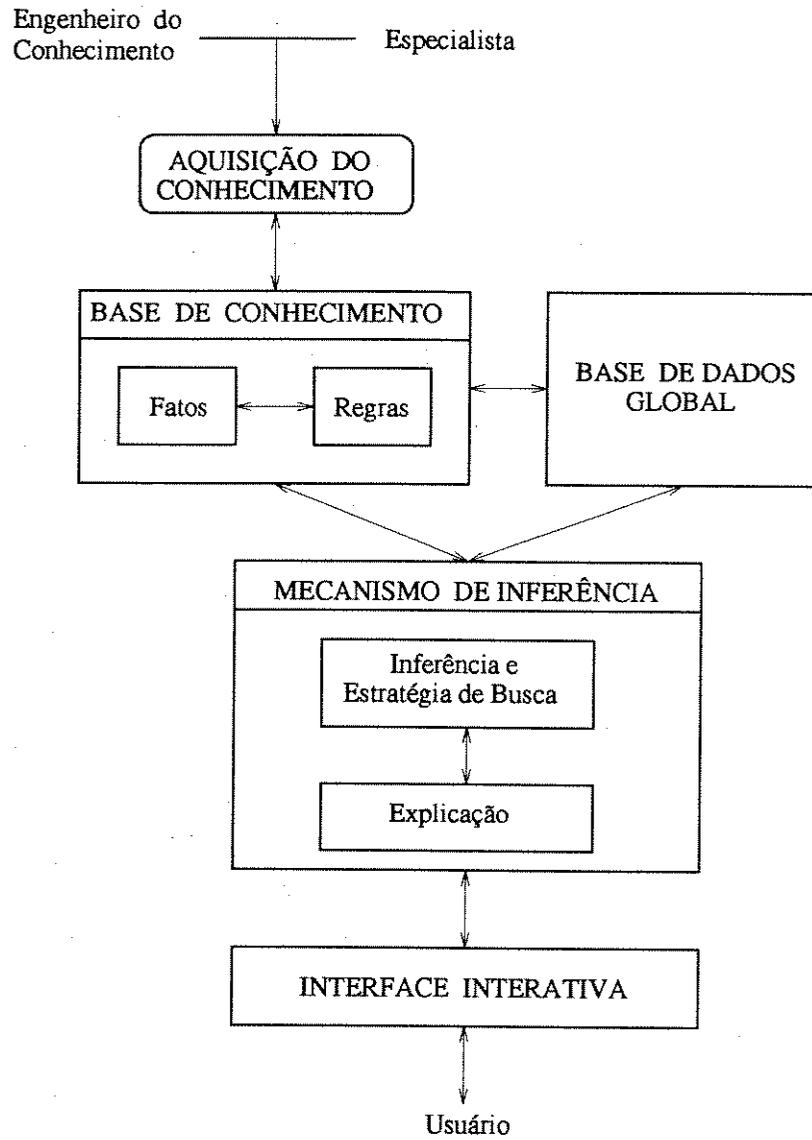


Figura 3.2: Arquitetura básica de Sistemas Especialistas

bastante parecida com decisões tomadas pelo homem. Isto faz com que elas sejam facilmente adequadas para representar o conhecimento especializado na solução de problemas.

– Redes Semânticas [9] [28]

O conhecimento é representado em grafo, onde os nós representam objetos, conceitos ou situações no domínio do problema e os arcos representam as relações ou associações entre os nós. Para que os nós e arcos representem uma rede semântica, deve haver uma descrição do objeto ou situação, ou então um procedimento que permita a descrição [28]. Portanto, uma característica da rede é que as associações da informações podem ser feitas explicitamente, enquanto outras podem ser deduzidas através do algoritmo que manipula a rede.

– Frames [7] [28]

Também conhecidos por *Quadros*, são estruturas de dados que descrevem uma classe de objetos ou situações estereotipadas (típicas) [28]. Estas estruturas consistem de atributos (“slots”) que estão associados a vários tipos de informações tais como: dados numéricos, dados simbólicos, ponteiros para uma outra estrutura e procedimentos que permitem representar ou calcular uma informação desejada. Uma das características dos Frames é que as estruturas são organizadas em uma hierarquia em que os descendentes herdam informações de seus ascendentes. Isto faz com que o conhecimento seja estruturado. Assim, muitos dos Sistemas baseados em Frames são indicados para representar o conhecimento descritivo e relacional.

• **Mecanismo de Inferência**

É o interpretador para a base de conhecimento, ou seja, para processar o conhecimento armazenado. O mecanismo ou motor de inferência tem a função de inferir e controlar a utilização do conhecimento armazenado. O processo de inferência utiliza-se das regras para manipular os fatos de modo a alcançar a solução desejada. O processo de controle é responsável por determinar a ordem em que as regras são selecionadas e qual regra deverá ser aplicada.

O controle pode ser processado em diferentes direções básicas:

- Encadeamento para frente (Forward Chaining) - o sistema parte das condições envolvidas nas regras e aquela que satisfizer tais condições é acionada.
- Encadeamento para trás (Backward Chaining) - o sistema parte de alguma conclusão e procura detectar quais as condições que podem ocasionar tal conclusão.
- Estratégia mista - esta utiliza a combinação das duas estratégias descritas anteriormente.

Para encontrar a solução com o mecanismo de inferência, existem diferentes estratégias de busca. São algumas delas: Busca em profundidade, busca em largura, busca heurística. Podem ainda utilizar a estratégia “backtracking”(volta atrás). Isto significa que quando o sistema alcança um caminho não satisfatório, ele retorna e tenta seguir uma linha diferente. Estas estratégias e outras encontram-se explicadas com mais detalhes em [7] [27] [28].

Alguns sistemas possuem um mecanismo de explicação que permite explicar ao usuário como uma conclusão foi encontrada ou por que o sistema precisou de um determinado parâmetro quando uma pergunta é feita ao usuário.

- **Interface**

O usuário interage com o sistema especialista através da interface. Por meio desta, o usuário pode fornecer informações ao sistema e/ou receber as mensagens enviadas pelo sistema.

3.4 Características dos Sistemas Especialistas

Os Sistemas Especialistas devem apresentar bom desempenho e para tanto utilizam-se de regras empíricas ou heurísticas que lhes permitem examinar e filtrar as alternativas das soluções possíveis, evitando buscas exaustivas. Além dessa característica, os Sistemas Especialistas têm capacidade de oferecer treinamento aos peritos novatos, já que podem explicar o seu processo de raciocínio. Algumas características destes sistemas são [8] [29] [30]:

- **Universalidade:** A base de conhecimento depende da aplicação de conhecimento específico enquanto o mecanismo de inferência é de domínio independente. Assim, diferentes sistemas especialistas são desenvolvidos apenas por substituir a base de conhecimento.
- **Flexibilidade:** Pode ser facilmente modificado, permitindo adicionar novas informações ou regras para melhorar a base de conhecimento.
- **Disponibilidade:** A preservação do conhecimento empírico (experiências anteriores do especialista nas soluções de problemas análogos) em algum domínio é armazenado, podendo ser utilizado na sua ausência.
- **Especificidade:** Opera em um domínio estreito onde a situação real não admite ser modelada matematicamente.
- **Consistente:** Não toma decisões diferentes para uma mesma situação, enquanto o especialista humano as faria.

- **Heurística:** Capacidade de resolver problemas em domínios limitados utilizando-se de conhecimento empírico ou heurístico. Estes problemas podem exigir decisões de um raciocínio baseado em informações incompletas ou incertas. Dois métodos utilizados para este tipo de raciocínio sobre incertezas são: Fatores de Certeza e Probabilidade de Bayes. O conhecimento incorporado busca um caminho que tenha alta probabilidade de obter a solução do problema. Mas, nem sempre garante a melhor solução.
- **Compreensão:** O usuário pode a qualquer momento, durante a execução do programa, verificar o processo de raciocínio e decisões que o programa está fazendo durante e após o processo de solução.
- **Rapidez:** Pode fornecer uma resposta mais rápida para um evento de emergência, ou seja, se um problema é detectado o sistema especialista pode ser executado para sugerir soluções ao usuário rapidamente, baseado no conhecimento incorporado.

3.5 Ferramentas Utilizadas no Desenvolvimento de Sistemas Especialistas

Existem dois tipos de ferramentas que são empregadas no desenvolvimento de sistemas especialistas [8]. O primeiro tipo, Linguagens de Programação, requer tempo e esforço de planejamento, projeto e programação para implantar um sistema especialista. Deve-se ao fato que o programador deverá modelar a base de conhecimento e implementar o mecanismo de inferência que acessará o conhecimento. No segundo tipo, Linguagens de Engenharia do Conhecimento, já se encontra pronto o mecanismo de como representar e acessar o conhecimento. É necessário apenas inserir os fatos e regras na Base de Conhecimento. Estes dois tipos de linguagens são apresentados a seguir:

- **Linguagens de Programação**

Estas podem se apresentar como: convencionais e de Inteligência Artificial. As linguagens convencionais foram desenvolvidas para manipular expressões matemáticas, tais como: FORTRAN, PASCAL e C. As linguagens de IA foram modeladas para representar e manipular expressões simbólicas. São exemplos deste tipo de linguagem: LISP e PROLOG. As linguagens de IA têm sido as mais utilizadas pelos programadores na implementação e desenvolvimento de sistemas especialistas.

- **Linguagens de Engenharia do Conhecimento**

Também denominadas "SHELLS", estas ferramentas computacionais consistem de um mecanismo de inferência, uma base de conhecimento vazia e mais o ambiente de

suporte. Este último consiste de um conjunto de programas que ajuda o usuário interagir com o sistema especialista na programação, tais como: depuração, facilidades de entrada/saída, editor, facilidades de explicação e conexão externa.

Estes “shells” são programados independentemente de qualquer aplicação de conhecimento específico. Podem ser usados em diferentes bases de conhecimento, contanto que a representação do conhecimento seja adequada. Os “shells” tornam-se um sistema especialista completo somente quando recebem conhecimento específico do domínio em sua base de conhecimento. São exemplos de alguns deles: EMYCIM derivado do MYCIM, KAS originado do PROSPECTOR, EXPERT do CASNET, ART (Automated Reasoning Tool), KEE (Knowledge Engineering Environment) e o OPS83.

Além destes dois tipos de linguagens básicas, existe um outro tipo de linguagem considerada de auxílio. Estas, consistem de programas projetados para auxiliar na aquisição e representação do conhecimento do especialista, como também na modelagem do sistema especialista. Um exemplo, o TEIRESIAS que foi utilizado na aquisição do conhecimento do MYCIM.

3.6 Processo de Desenvolvimento de Sistemas Especialistas

A utilização de sistemas especialistas no setor industrial e comercial está intensamente disseminado em diversas tarefas [8] [31] [32]. Entretanto, o processo de desenvolvimento de um aplicativo é razoavelmente complexo no que diz respeito à obtenção, formalização e implementação do conhecimento humano em um programa computacional. Este processo, normalmente, chamado *Engenharia do Conhecimento* envolve vários fatores, tais como, tempo e dinheiro.

Os principais elementos e relações envolvidos com a construção e utilização de um sistema especialista estão esquematizados na figura 3.3 [8] e são descritos a seguir:

- **Usuário**

É o profissional que irá interagir com o Sistema Especialista. Deverá estar bem familiarizado com o sistema sendo, portanto, capaz de avaliar as mensagens recebidas e decisões a serem tomadas.

- **Domínio do Especialista**

Refere-se a uma área específica de conhecimento onde a cognição do especialista

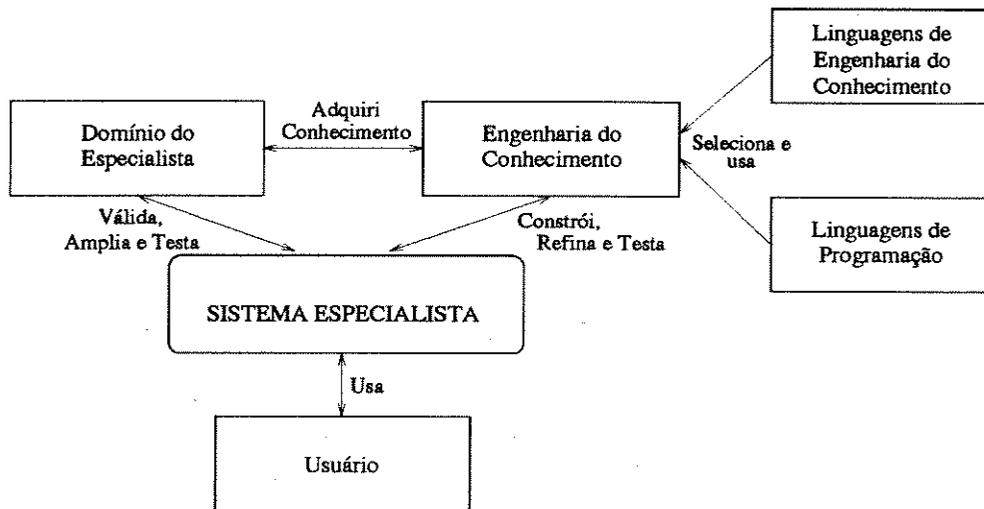


Figura 3.3: Ambiente em torno de um Sistema Especialista

humano é uma combinação do entendimento teórico do problema com um conjunto de regras práticas que a experiência tem mostrado ser eficaz no domínio.

• Engenharia do Conhecimento

No processo de desenvolvimento, o primeiro passo será o engenheiro do conhecimento entender os objetivos do sistema. Em seguida, na fase de aquisição do conhecimento, o engenheiro do conhecimento, que talvez não tenha nenhuma experiência prévia, tenta ganhar alguma familiaridade com os problemas específicos, o que ajuda a comunicação com o especialista. Isto é feito através de entrevistas (uma das técnicas de aquisição) com o especialista para obtenção das soluções dos problemas específicos. Após esta etapa o engenheiro do conhecimento e o especialista, juntos, trabalham para [29] [30]:

- determinar as características do problema, recursos e participantes importantes para o desenvolvimento;
- identificar os conceitos, relações e estratégias para a descrição do problema.
- deduzir os fatos e regras necessárias para alcançar a solução do problema;
- selecionar as ferramentas mais convenientes para formular o conhecimento adquirido. O engenheiro deverá conhecer as formas de representação do conhecimento utilizadas pelas ferramentas.
- implementar o conhecimento formalizado em um programa computacional de modo a reproduzir as decisões do especialista.

Finalmente, após feita a modelagem do sistema, o engenheiro do conhecimento constrói um protótipo do sistema especialista, quando então são realizados os testes, refinamentos e validação do conhecimento.

São inúmeras as dificuldades encontradas no desenvolvimento do sistema especialista [8]. Dentre elas:

- A falta de pessoas experientes para modelar e desenvolver o sistema; poucas ferramentas de suporte de alto nível;
- Algumas limitações:
 - representação do raciocínio de senso comum,
 - reconhecer seus limites, quando são dados problemas diferentes daqueles que foram modelados o sistema especialista pode falhar,
 - dificuldades em reconhecer conhecimentos incorretos e inconsistentes,
- leva-se um longo tempo para construir um sistema especialista, sendo portanto, necessário que a solução justifique o custo e esforço;
- aquisição do conhecimento, onde o engenheiro do conhecimento tem grande dificuldade em extrair e codificar os fatos e as regras do especialista para obter as soluções;
- limitação da tecnologia para desenvolver sistemas especialistas, pois as linguagens de representação são limitadas, sendo difícil de representar todos os relevantes conhecimentos do domínio;
- cooperação dos especialistas.

Portanto, a fase de aquisição do conhecimento é a que apresenta maior dificuldade no desenvolvimento de sistemas especialistas. Deve-se ao fato que os especialistas humanos, em geral, utilizam métodos de raciocínio alternativos com base na sua experiência para solucionar os problemas específicos. Isto faz com que seja difícil expressar ou descrever de maneira organizada o seu raciocínio.

Capítulo 4

APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Neste capítulo são analisadas as áreas de aplicações de sistemas especialistas no gerenciamento da operação de redes elétricas de potência. Em seguida, são descritos três sistemas da literatura aplicados ao controle de tensão/ potência reativa, onde são abordados objetivos, metodologia empregada e resultados.

4.1 Introdução

Com o progresso da tecnologia aplicada à Inteligência Artificial, vários motivos levaram à introdução de sistemas especialistas para apoio no planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. São alguns deles: grande quantidade de dados, decisões baseadas em experiência humana, informações incompletas, complexidade na estrutura da rede e análise de várias soluções candidatas para o mesmo problema.

Por causa destes motivos, várias aplicações têm sido desenvolvidas nas áreas de planejamento, operação e treinamento. As aplicações, segundo a literatura [32] [33] [34], incluem:

- planejamento com o Fluxo de Carga;
- programação da manutenção da rede;
- planejamento das Unidades Geradoras;
- **controle de tensão/potência reativa;**
- restabelecimento do sistema;

- avaliação de segurança;
- diagnóstico de Falta;
- análise de Contingências;
- processamento de Alarme;
- automação de Subestações;
- treinamento do operador; etc.

Muitos dos sistemas especialistas apresentados pela literatura são apenas idéias e protótipos que levarão algum tempo até alcançarem o estágio de utilização na produção. São poucos que chegaram a um estágio prático operacional. No desenvolvimento de sistemas especialistas utilizados em sistemas de potência alguns problemas ainda são encontrados. Dentre eles estão: a aquisição do conhecimento e interface entre os sistemas especialistas e os programas convencionais.

Segundo [10] [35], uma pesquisa realizada com a colaboração de vários países, foram obtidas as seguintes informações:

- (a) a maioria das aplicações estão concentradas nas seguintes tarefas: Monitoração, Controle, Planejamento e outras.
- (b) as linguagens de programação mais utilizadas para o desenvolvimento são: LISP (28.1%), PROLOG (25.0%), FORTRAN (25.0%), C (10.9%), PASCAL (6.3%) e outras (4.7%).
- (c) as linguagens de Engenharia do Conhecimento mais usadas: KEE (22.9%), OPS83 (14.3%), ART (5.7%) e outras (57.1%).
- (d) os hardware mais usados são: VAX (26.1%), IBM(14.7%), SYMBOLICS (10.1%), APOLLO(9.0%) e outros (37.4%).

As aplicações têm demonstrado que são ferramentas importantes de auxílio aos operadores dos sistemas de potência. Estes sistemas têm tido como objetivo principal fornecer suporte no processo de decisões ajudando a selecionar, analisar e interpretar estratégias de controle, visando encontrar um ponto de operação que resulte em benefícios na economia e na confiabilidade da rede elétrica. Também têm por finalidade melhorar a funcionalidade das redes de potência de modo a minimizar os erros humanos, reduzindo os riscos de blecaute e perda de confiabilidade.

Dentre as aplicações citadas, destaca-se aqui o suporte ao Controle de tensão/potência reativa, uma vez que este trabalho tem por objetivo propor uma aplicação nessa área.

4.2 Aplicações no Controle Tensão/Potência Reativa

Inúmeras são as aplicações nesta área relatadas na literatura nos últimos anos [19] [20] [21] [22] [23] [36] [37].

Na Universidade de Washington - USA, um grupo liderado por Chen Ching Liu deu início ao desenvolvimento de um sistema especialista para o controle de tensão [19], chamado VCES - Voltage Control Expert System. Este sistema incorpora regras heurísticas para ajudar o operador na resolução dos problemas de tensão. Fatores de sensibilidade foram introduzidos nas regras para aumentar a capacidade do sistema. O capítulo 4 da referência [10], descreve o relatório publicado por Liu e Tomsovic em 1987, onde se discute o modelo e os resultados obtidos na avaliação de desempenho de VCES. Dois aspectos são analisados: qualidade da solução e eficiência no processamento. O sistema IEEE-30 barras foi usado para demonstrar a capacidade de VCES. As regras, escritas no ambiente do OPS83, foram interfaceadas com rotinas do FORTRAN para o cálculo de sensibilidade e fluxo de carga.

Em [20], uma Árvore de Sensibilidade é utilizada para identificar o controlador mais conveniente para restabelecer a tensão na barra de carga com problema e verificar se não ocorrerão novas violações após a ação corretiva.

São apresentadas em [22] duas técnicas baseadas em regras que utilizam o conceito do Caminho do Reativo. A primeira técnica, associa a cada controlador os barramentos de carga sobre os quais este apresenta influência significativa. Na segunda, são encontrados dois controladores para o barramento de carga com problema. Um conceito de Rede Local é adotado em [36] para simplificar a procura do controlador disponível, necessário para corrigir as tensões violadas.

Um sistema especialista que combina técnicas baseadas em regras com uma rotina de Programação Linear é descrito em [23], para o controle de tensão. Em [37] é apresentado um conjunto de procedimentos que se utilizam de regras.

A seguir, é feito um breve resumo de três aplicações a título de exemplos.

4.2.1 Sistema proposto por Liu e Tomsovic

O sistema descrito no capítulo 4 em [10], visa detectar violações de tensão e determinar ações de controle baseadas em conhecimentos representados através de regras.

MÉTODO

Regras Gerais

Orientado pela aplicação de regras gerais, o sistema especialista (VCES) foi desenvolvido para auxiliar o usuário nas decisões no controle de tensão/potência reativa. Estas regras gerais são apresentadas e justificadas em [19] e são as seguintes:

- Se a tensão da barra de carga está abaixo (ou acima) dos limites de operação, os equipamentos de controle podem ser chaveados ou ajustados para restabelecer a tensão da barra.
- Se a tensão da barra de carga está abaixo (ou acima) dos limites de operação, é mais provável atuar num compensador local. Se a capacidade desse controlador é insuficiente para corrigir a violação de tensão, então o compensador mais próximo de maior sensibilidade deve ser escolhido.
- Se a tensão é baixa (ou alta) na barra de carga, o ajuste do tap do transformador local pode ser aumentado (ou diminuído) para corrigir a violação. Entretanto, o ajuste dado pode causar violações em outras barras de carga.
- A tensão da barra de um gerador pode ser aumentada (ou diminuída) para corrigir a violação de tensão baixa (ou alta) na carga.
- Banco de Capacitor pode ser ligado (ou desligado) para restabelecer a tensão baixa (ou alta) na carga.

A partir destas regras desenvolveu-se uma base de conhecimento para o controle de tensão.

Baseado no nível de violação dos limites operacionais da rede elétrica o problema apresentado é classificado de acordo com os seguintes graus de severidade (S):

- **Severidade 0:** todos os limites de tensão são satisfeitos;
- **Severidade 1:** se existe menos do que 5 barras com tensões anormais (abaixo de 0.95 pu ou acima de 1.05 pu) e todas tensões estão dentro dos limites de emergência (0.9 - 1.1 pu);
- **Severidade 2:** se existe mais do que 5 barras com problemas de tensão ou se no mínimo uma tensão de barra viola os limites de emergência.

Conforme a aplicação desejada a quantidade de barras e os limites de operação e emergência de tensão podem ser modificados.

A seguir discute-se a estrutura de dados usada pelo VCES e a base de regras empregada.

Estrutura de Dados

Para o problema do controle de tensão, os dados mais relevantes são as tensões, a demanda de potência nas barras de carga, a disponibilidade e os limites dos controladores. Todos os dados da rede elétrica estão representados como elementos do VCES. Por exemplo:

1. Barras de carga = elemento
(nome, tipo, estado, tensão, limite tensão superior, limite tensão inferior, demanda de MW, demanda de MVAR).
2. Controladores de reativo = elemento
(nome, classe, localização, estado, valor corrente, passo, limite inferior, limite superior).

Base de regras

O sistema desenvolvido é dividido em várias tarefas. Cada tarefa consiste de inúmeras regras. As principais tarefas com as respectivas regras são apresentadas a seguir:

1. **Tarefa 1: Classifica o problema de tensão**
As regras aqui classificam o tipo (alto ou baixo) de violação de tensão e determinam o grau de severidade da violação.
2. **Tarefa 2: Seleciona os controladores**
As regras identificam os controladores com relação a barra violada.
3. **Tarefa 3: Prioridade dos controladores**
As regras ordenam os controladores baseadas na análise de sensibilidade (ordem decrescente).
4. **Tarefa 4: Implementa os controladores sugeridos**
As regras implicam em:
 - (a) selecionar o controlador de maior sensibilidade,
 - (b) calcular o desvio de tensão máxima baseada na análise de sensibilidade, se o compensador selecionado estiver disponível.
 - (c) implementar a ação de controle, se o controlador apresentar recurso suficiente para corrigir a violação.
 - (d) ajustar o controle do compensador até o limite, se este não está no seu limite e é insuficiente para corrigir o problema.

5. Tarefa 5: Estima o efeito da ação de controle

Aqui, algumas regras consistem em: verificar o efeito da ação de controle sobre todas as tensões de barra com problema, selecionar o próximo controlador disponível caso ainda ocorrem violações após a ação considerada.

IMPLEMENTAÇÃO

- SHELL OPS83: para a base de regras, com aproximadamente 100 regras.
- FORTRAN: para manipulação de dados e cálculo numérico.
- Rede Elétrica: IEEE-30 barras.

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

A avaliação de desempenho do VCES está dividida em duas partes: Na primeira parte, a avaliação foi feita pela comparação entre o VCES e um método de programação convencional (Programação Linear - PL), baseada em alguns critérios adotados. Para isso, vários cenários de problemas foram criados e classificados de acordo com as severidades mencionadas anteriormente.

A tabela 4.1, mostra os resultados da comparação entre VCES e PL. Os critérios adotados foram:

- **CR-1: Número de cenários resolvidos**
Todos 96 cenários foram resolvidos por VCES e PL após o ajuste dos parâmetros de controle.
- **CR-2: Número de iterações para cada solução**
O VCES resolve cada cenário em 1 iteração, ao passo que PL em muitos casos de nível 2 resolve o problema em 2 iterações (se o programa sugere um conjunto de ações que não resolve o problema de tensão em todas barras, então o programa procura resolver o problema na próxima iteração).
- **CR-3: Número de controladores usados**
O VCES usa menos controladores em 30 casos e sugere mais controladores do que PL em 24 casos. Para cenários de nível 2 (mais severo), VCES tende a usar menos controladores.
- **CR-4: Número de controladores irreais usados**
O VCES leva em consideração controladores discretos, portanto não sugere qualquer controle irreal. Já o PL sugere em 29 casos.
- **CR-5: Tempo de solução**
O VCES é mais rápido do que PL em 54 casos, contra 32 de PL. Os dois métodos

CRITÉRIOS	S	VCES	PL
CR-1	1	52	52
	2	44	44
CR-2	-	1:96	1:68
	-		2:28
CR-3	1	16	16
	2	14	8
CR-4	-	0	29
CR-5	1	25	21
	2	29	11

Tabela 4.1: Resultados obtidos do VCES e do PL

apresentam velocidade comparável em casos menos severos (nível 1), mas VCES tende a ser mais rápido em casos mais severos (nível 2).

Na segunda parte, o tempo de processamento de programas baseados em regras depende não somente da linguagem de programação (software), do equipamento (hardware), mas também, da qualidade do próprio programa. Liu e Tomsovic analisaram que para o mesmo conhecimento implementado em diferentes conjuntos de regras, um fator de melhoramento de aproximadamente 36 para 1 foi observado para a pior e a melhor implementação. Isto mostrou a importância de selecionar adequadamente regras e estruturas de dados.

Neste caso, foi analisado o mecanismo de inferência utilizado pelo OPS83 (Forward Chaining) no contexto do VCES. O tempo de solução computacional do VCES é quebrado dentro de tarefas básicas representadas pelo mecanismo de inferência: Testa Atributos, Testa Condições, Resolução de Conflitos, Mudança na Memória de Trabalho e Execução das Regras. O tempo de cálculo do PL, Fluxo de Carga e interfaces não são incluídas aqui.

O tempo gasto em cada tarefa ajudou a identificar os pontos críticos de processamento. Assim, esta avaliação estabeleceu o melhor modelo de estruturas de dados e regras para o desempenho de VCES.

CONCLUSÃO

Liu e Tomsovic concluíram que o desempenho do VCES e PL são comparáveis para violações de tensão menos severas (Severidade 1), enquanto o VCES é melhor para violações de tensão mais severas (Severidade 2). Também concluíram, que o tempo de

simulação obtido neste estudo indica a possibilidade de utilizar o VCES no auxílio da operação “on-line”, para problemas que requerem tempo de resposta na ordem de segundos ou minutos.

4.2.2 Sistema descrito por Cheng, Malik e Hope

O sistema apresentado em [20] tem por objetivo:

- Identificar a configuração de operação do sistema, seja em condições normais ou de contingência;
- Detectar a(s) barra(s) em condições anormais;
- Selecionar o controlador eficiente na correção da anormalidade detectada, dentre eles:
 - geradores,
 - transformadores,
 - banco de capacitores e reatores,
 - compensadores síncronos;
- Calcular a ação de controle necessária para restabelecer a situação normal.

MÉTODO

Árvore de Sensibilidade

Baseado nesta metodologia, foi desenvolvido um sistema para o controle de tensão/potência reativa em tempo real. Esta técnica é fundamentada no uso dos fatores de sensibilidade entre as magnitudes de tensão e variáveis de controle.

A figura (4.1) apresenta a árvore de sensibilidade para o controle de tensão. São construídas N árvores de sensibilidade que correspondem ao número de barras de carga do sistema de energia. Cada árvore é formada por:

- nó raiz - magnitude de tensão da barra a ser corrigida (V_c).
- ramo - fatores de sensibilidade associados à magnitude de tensão a ser corrigida e as variáveis de controle (S_c).
- nó 1º nível - variáveis de controle (C).
- sub ramo - fatores de sensibilidade associados às variáveis de controle e as magnitudes de tensões das barras de carga (S').

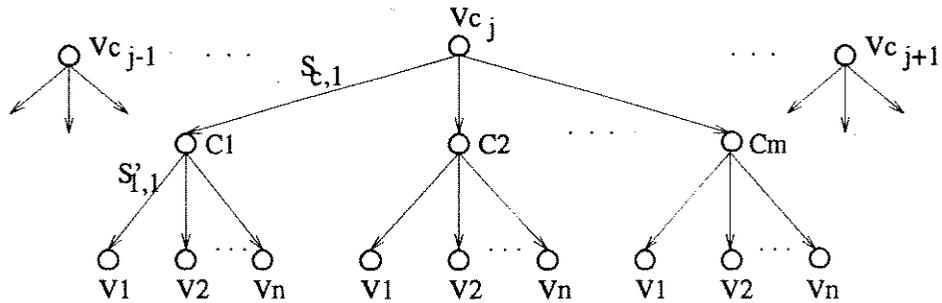


Figura 4.1: Árvore de Sensibilidade

- nó 2^o nível - magnitude de tensão de todas as barras de carga do sistema elétrico (V).

Para uma dada magnitude de tensão violada é possível determinar quais os controladores que podem ser usados. A ação de controle (ajuste dado nas variáveis de controle) resulta na mudança de diversas tensões de barra. Portanto, através da análise de sensibilidade é possível calcular a ação de controle para corrigir a tensão violada, sem que exceda as restrições impostas.

BASE DE CONHECIMENTO

O conhecimento está representado como fatos que são os seguintes:

1. limite inferior e superior das tensões de cada barra, dos controladores e da potência reativa das barras de controle;
2. controladores discretos com os valores de seus passos;
3. tabela com os fatores de sensibilidade entre a magnitude de tensão e as variáveis de controle;
4. fator peso dos controladores;
5. tabela de sensibilidade entre a potência reativa e a magnitude de tensão para um grupo de possíveis configurações de operações do sistema.

Como o sistema pode operar em diferentes configurações, os fatores de sensibilidade podem ser diferentes, os quais incluíam-se os itens 4) e 5). As tabelas de sensibilidade do item 3) e 5) podem ser obtidas de um especialista ou da análise numérica do cálculo do fluxo de carga.

MECANISMO DE INFERÊNCIA

As regras básicas para o mecanismo de inferência foram desenvolvidas baseadas na Árvore de Sensibilidade. Utilizou-se a estratégia de busca em profundidade (depth-first), para os seguintes procedimentos de regras:

1. identificação da configuração de operação do sistema; formação das árvores de sensibilidade para o controle de tensão e potência reativa, a partir da tabela de fatores de sensibilidade na base de conhecimento;
2. leitura dos valores correntes da magnitude de tensão de cada barra;
3. comparação dos valores de tensão com seus limites; e seleção da magnitude de tensão violada;
4. para cada barra violada, procura-se o controlador mais eficaz (maior valor de sensibilidade) através da árvore de sensibilidade; calcula-se a ação de controle;
5. verifica-se se a ação de controle calculada não violou as restrições do controlador; caso tenha excedido, o limite do controlador é escolhido como a ação de controle;
6. verifica-se se a ação de controle para restabelecer a magnitude de tensão em uma barra violada não causa violações em outras barras; como o sistema é não linear, algumas tolerâncias são introduzidas nas magnitudes de tensões das barras violadas pela sobrecorreção por um fator;
7. informa ao operador, do controlador escolhido e a ação de controle recomendada;
8. conforme a ação de controle selecionada, recalculam-se as novas magnitudes de tensões das barras;
9. repete-se o procedimento de (3) a (8) até que as violações das magnitudes de tensões das barras tenham sido restabelecidas;
10. no caso em que todos os controladores tenham sido usados e a magnitude de tensão da barra violada não tenha sido restabelecida dentro dos limites, é feito o procedimento com as regras para o despacho de potência reativa no controle de tensão utilizando suas devidas árvores de sensibilidade. Sendo assim, inicia-se um procedimento similar de (3) a (9);
11. repetem-se os procedimentos acima para cada barra de carga do sistema até que todas as magnitudes de tensões de barra estejam dentro dos limites.

IMPLEMENTAÇÃO

O sistema foi implementado na linguagem de programação PROLOG, devido:

- ao procedimento de busca recursiva,
- capacidade de estruturar dados baseados em árvores,
- capacidade de unificação.

Foi testado no sistema de potência IEEE 30 barras.

RESULTADOS

Foram simulados cinco casos. Nos três primeiros, o sistema está completamente conectado e foram feitas alterações de cargas, de modo que aparecessem violações nas tensões de barra. Enquanto nos dois últimos casos, a condição é de retirada de circuitos. Baseadas nas regras descritas, as devidas ações de controle foram tomadas obtendo resultados satisfatórios para todos os casos. Portanto, concluíram que o sistema desenvolvido para estratégia de controle pode restabelecer o sistema dentro dos limites desejados, quando sujeito a alterações de carga e topológicas da rede.

4.2.3 Sistema descrito por Godart e Puttgen

Este sistema discutido em [22], tem por finalidade:

- Desenvolver técnicas baseadas em regras que limitam uma região de controle (conjunto de barras) para cada controlador do sistema e que determine dois controladores eficazes para restabelecer a magnitude de tensão de uma barra de carga violada.

MÉTODO

Caminho do Reativo

$$\Delta V = \frac{XQ}{V_2}$$

No apêndice A, encontra-se a dedução da equação acima. Verifica-se que a queda de tensão nas linhas é determinada basicamente pelo fluxo de potência reativa, em sistemas de Extra Alta Tensão (EAT). Assim, quanto maior o fluxo de reativo do controlador para uma barra de carga, maior será o efeito deste controlador sobre a magnitude de tensão dessa barra. As variações de tensão podem ser corrigidas pelo ajuste nas variáveis de controle modificando o fluxo de potência reativa no sistema.

Logo, o Caminho do Reativo de cada controlador sobre todas as magnitudes de tensão das barras será formado pelas linhas que contiverem o maior fluxo de potência reativa, que por sua vez, representa um caminho de mínima impedância do reativo.

A busca do Caminho do Reativo está baseada no fluxo de potência reativa determinado pela solução do cálculo do fluxo de carga (AC Desacoplado) de sua configuração base, seja normal ou de emergência. Esta busca não poderá constituir:

- das linhas que saíam devido a uma contingência;
- das linhas que contêm transformador, pois possuem indutâncias série maiores que as indutâncias da linha, o qual tende a aumentar a queda de tensão. Desta maneira, os controladores no lado de baixa tensão compensam as tensões do lado de baixa tensão em sua região de controle. O mesmo para os controladores do lado de alta tensão.

Baseado no conceito do Caminho do Reativo, duas técnicas foram descritas:

TÉCNICA 1 - Região de Controle da Potência Reativa - RPC

- Todos os controladores (compensadores estáticos e síncronos, transformadores LTC) são atribuídos a um conjunto de barras, tal que, seguido de qualquer ação de controle, as magnitudes de tensões de barras do conjunto são significativamente afetadas enquanto as tensões fora da região são pouco afetadas.
- Utilizou-se a estratégia de busca em largura. A heurística utilizada baseou-se nos dados do fluxo de potência reativa do caso básico.
- Procedimento das regras:
 1. Inicia-se numa barra de controle (barra A) e se registram todas as barras diretamente conectadas a esta.
 2. A barra B que está interligada à barra A, será incluída na região de controle se satisfizer as seguintes condições:
 - (a) $|q| > \alpha |Q|_{max}$
onde:
 - i. q - fluxo de potência reativa da linha AB;
 - ii. Q_{max} - soma de todos os fluxos de potência reativa na barra de controle;
 - iii. α - parâmetro ajustado pelo usuário ($0 < \alpha < 1$).
 - (b) q deve ter o mesmo sinal que Q_{max} .
 - (c) verificação se nenhum fluxo de potência reativa q' conectado á barra B, tenha:

$$\beta |q'| > |q|$$
 onde:

- i. q - fluxo de potência reativa de outras linhas que conectadas à barra B;
- ii. β - parâmetro ajustado pelo usuário ($0 < \beta < 1$).

Caso a barra B não satisfaça as condições (1) e (2), o procedimento busca a próxima linha conectada à barra A. Uma vez todas barras conectadas à barra A tenham sido verificadas, a busca leva para origem a próxima barra que foi incluída na região.

- Os parâmetros α e β são ajustados pelo usuário para que o efeito da ação de controle seja limitado a uma região. Pode-se verificar que a região de controle aumenta com o decréscimo de α e β . Logo, diminuir α - resulta em incluir barras na região que são mais distantes do controlador. diminuir β - resulta que a região de controle inclui mais barras que são mais afetadas por ações de outros controladores.
- Para evitar sobreposições de regiões, o Caminho do Reativo “para” quando encontra uma outra barra de controle.

TÉCNICA 2 - Controladores Eficientes

- A busca pelo Caminho do Reativo determina o primeiro e o segundo controlador mais eficiente para cada barra em que a magnitude de tensão foi violada (barra observada) na configuração base de operação; podendo os controladores mudarem no caso de contingência.
- Utilizou-se a estratégia de busca em profundidade orientada heurísticamente, para encontrar os dois controladores que terão efeito sobre a barra observada.
- Procedimento das regras:

O Caminho do Reativo é construído a partir da barra observada (barra O). Todas as barras diretamente conectadas à barra O através das linhas de transmissão, com exceção das linhas com transformador, são registradas pela busca do caminho do reativo. O procedimento de busca procede sobre a linha que carregar o maior fluxo de potência reativa deixando a barra O, Q_{omax} . Quando uma barra de controle for encontrada, será declarado o primeiro controlador se:

 - este não estiver localizado na barra O;
 - sua saída não é considerada correntemente.

Se nenhuma barra satisfizer essas condições, o procedimento de busca continua sobre o maior fluxo de reativo que deixa a barra analisada e com o mesmo sinal de Q_{omax} . Uma vez encontrado o primeiro controlador, a busca procede para o segundo controlador usando o mesmo procedimento sobre o mesmo caminho de reativo.

IMPLEMENTAÇÃO

Foram escritas 40 regras na sintaxe do OPS/83, para a formação das técnicas 1 e 2. Foram testadas no sistema de potência AEP 118 barras.

RESULTADOS

Thierry Godart e Hans Puttgen fizeram uma comparação de duas regiões. Na primeira, as regiões RPC, são determinadas pelas regras descritas acima (técnica 1). Na segunda, as regiões FC, são determinadas como se segue: Ajusta-se o parâmetro de um controlador para obter 1% de aumento da tensão no terminal da barra. Consequentemente, na solução do fluxo de carga as variações das magnitudes de tensões são registradas. As barras com variações acima de 0.2% são incluídas na região FC. Foram feitas as seguintes observações: - geralmente a região RPC está inscrita dentro de sua correspondente região FC. - a região FC somente pode ser ajustada pela decisão de quantos % as magnitudes de tensão de barras podem variar, enquanto as regiões RPC podem ter um ajuste fino usando os parâmetros α e β . Também, determinaram dois controladores utilizando o procedimento de regras (técnica 2), para resolver as violações de tensões de barra sob cada configuração estudada. Concluíram que a implementação dessas duas técnicas como ferramentas no controle de tensão dentro do ambiente de sistemas especialistas, prediz muito mais rápido os resultados comparado com as simulações do fluxo de carga.

Capítulo 5

SISTEMA COM PROCESSAMENTO DE CONHECIMENTO PARA APOIO AO CONTROLE DE TENSÃO/POTÊNCIA REATIVA

Neste capítulo é descrita a metodologia proposta, com uma discussão da idéia e apresentação da arquitetura do sistema desenvolvido. Em seguida é descrito e discutido o conhecimento representado nas rotinas de controle, análise de sensibilidade e base de consulta.

5.1 Introdução

Modelos matemáticos bem estabelecidos representam a operação em regime permanente de sistemas de transmissão (capítulo 2). Os planejadores da operação possuem um conhecimento baseado em experiências acumuladas com a simulação de cenários operacionais. Este tipo de conhecimento permite, juntamente com o modelo de sensibilidade do sistema, estabelecer uma heurística para obter ações corretivas no controle de tensão e de reativos.

Entretanto, a operação efetiva é realizada levando em conta a experiência específica com uma dada rede elétrica. Essa experiência com a operação fornece um conhecimento empírico que deve ser considerado nas ações de controle. Um exemplo típico desse tipo de conhecimento são as restrições que consideram a dinâmica da rede. Outro exemplo, seriam as estratégias específicas que garantem acordos de intercâmbio de potência entre

empresas. As técnicas de Inteligência Artificial podem ser utilizadas para representar esse tipo de conhecimento com o objetivo de automatizar a sua utilização.

A idéia da metodologia proposta neste trabalho é combinar, em um único sistema computacional, uma heurística baseada na simulação que está associada a um modelo de sensibilidade com o conhecimento empírico resultante da experiência operacional. A heurística baseada na análise de sensibilidade poderá ser aplicada em várias redes elétricas, ao passo que o conhecimento empírico será solicitado para cada rede com a qual existe uma experiência específica com a operação. As decisões suportadas pelo sistema estão limitadas ao controle de pequenas violações de tensão e potência reativa, uma vez que este está baseado em um modelo de sensibilidade.

O conhecimento resultante da experiência com a simulação de cenários operacionais está representado através de regras implícitas (R1) na heurística baseada na análise de sensibilidade. Ou seja, esse conjunto de regras atua em um procedimento sequencial de análise de cenários e decisões fundamentadas em resultados produzidos por simulações com o modelo de sensibilidade. Neste caso, o conjunto de regras não está separado da lógica do programa.

O conhecimento resultante da experiência com a operação do sistema é representado através de regras explícitas (R2) que são armazenadas em uma base de consulta. Estas regras são independentes da lógica do sistema e são implementadas para cada rede a partir do conhecimento fornecido pelos seus operadores.

A arquitetura geral do sistema proposto é representado na figura 5.1.

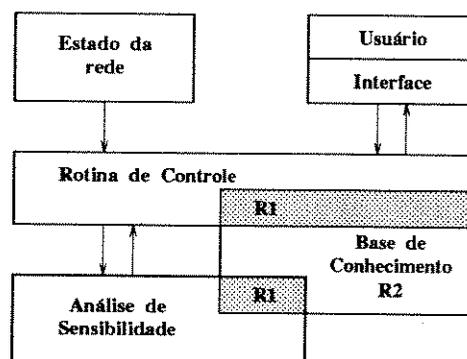


Figura 5.1: Arquitetura do sistema

A implementação da metodologia presente exige a escolha de uma ferramenta para codificação do sistema. A parte do sistema com estrutura procedural é implementada

eficientemente através de uma linguagem de programação convencional como C, Pascal, Fortran, etc. Por outro lado, para a implementação da base de consulta, as soluções mais indicadas são o uso de:

- linguagens de Inteligência Artificial, e
- shells para o desenvolvimento de sistemas especialistas.

A sugestão para um sistema produto que vai ser utilizado em um ambiente de produção, ou seja, em um centro de controle de uma empresa, é que a base de consulta seja desenvolvida em um shell e então integrada ao sistema geral. A razão disto é que, embora a parte heurística possa ser utilizada para várias redes elétricas, em cada rede haverá uma experiência específica acumulada com sua operação. Assim, a base de consulta experimental deverá ser desenvolvida em um trabalho de coleta, organização, formalização e implementação de um conhecimento disponível junto aos especialistas e documentos dentro das empresas.

Para este trabalho foi desenvolvido um sistema que explora a idéia geral da arquitetura proposta na figura 5.1. A linguagem de programação utilizada foi a C no ambiente de estações SUN. Esta opção, evidentemente, ao mesmo tempo que torna eficiente a parte procedural e de processamento numérico do sistema facilitando a integração da parte de conhecimento empírico com os programas convencionais, pode comprometer as possibilidades de processamento eficiente desse mesmo conhecimento dependendo da sua complexidade. Neste caso, adotou-se um conhecimento experimental formalizado através de regras explícitas implementadas numa árvore de consulta.

A seguir é apresentada a descrição do sistema desenvolvido e a organização do conhecimento utilizado.

5.2.1 Rotina de Controle (regras implícitas - R1)

Esta rotina tem por objetivo analisar e interpretar a solução elétrica da rede, acionar as rotinas de Análise de Sensibilidade ou a Base de Consulta e, finalmente, determinar a ação de controle adequada.

Uma representação mais detalhada da rotina de controle é vista na figura 5.3.

Esta rotina de controle requer dados e conhecimento relativos ao estado da rede, aos limites operacionais, aos equipamentos de controle, às regras implícitas operacionais e a outros requisitos para a operação da rede. Consiste em um processo de raciocínio sequencial representado por um conjunto de regras implícitas na lógica de uma heurística que faz uso intenso de um modelo de sensibilidade da rede elétrica. Este processo tem os seguintes passos:

1. Recebe a solução elétrica

O sistema inicializa-se recebendo a solução elétrica da rede e mostrando ao operador (usuário) as informações necessárias. Dentre estas, encontram-se:

- barras de carga (tensão, geração e consumo de MW e MVar);
- barras de controle (tipo de controle, tensão, geração de MVar, estado);
- situação da rede (normal ou contingência);

Estas informações e outras são armazenadas em uma base de dados. No desenvolvimento deste trabalho, a solução elétrica da rede foi produzida por um programa de cálculo do Fluxo de Carga que simula cenários distintos de carga/carregamento.

2. Identifica e classifica os limites violados e os controladores disponíveis

Os valores de tensão/potência reativa são comparados com seus limites e:

- se a tensão da barra de carga está abaixo (acima) do limite normal, então classificam-se as violações;
- se a geração de reativo em barras de controle estão em seus limites inferior (superior), então eliminam esses controladores do conjunto de possíveis soluções;
- se não houver violação de limites operacionais, o operador é informado que o sistema está operando em condições normais. Caso contrário, o processo de busca de uma ação de controle corretivo é inicializado.

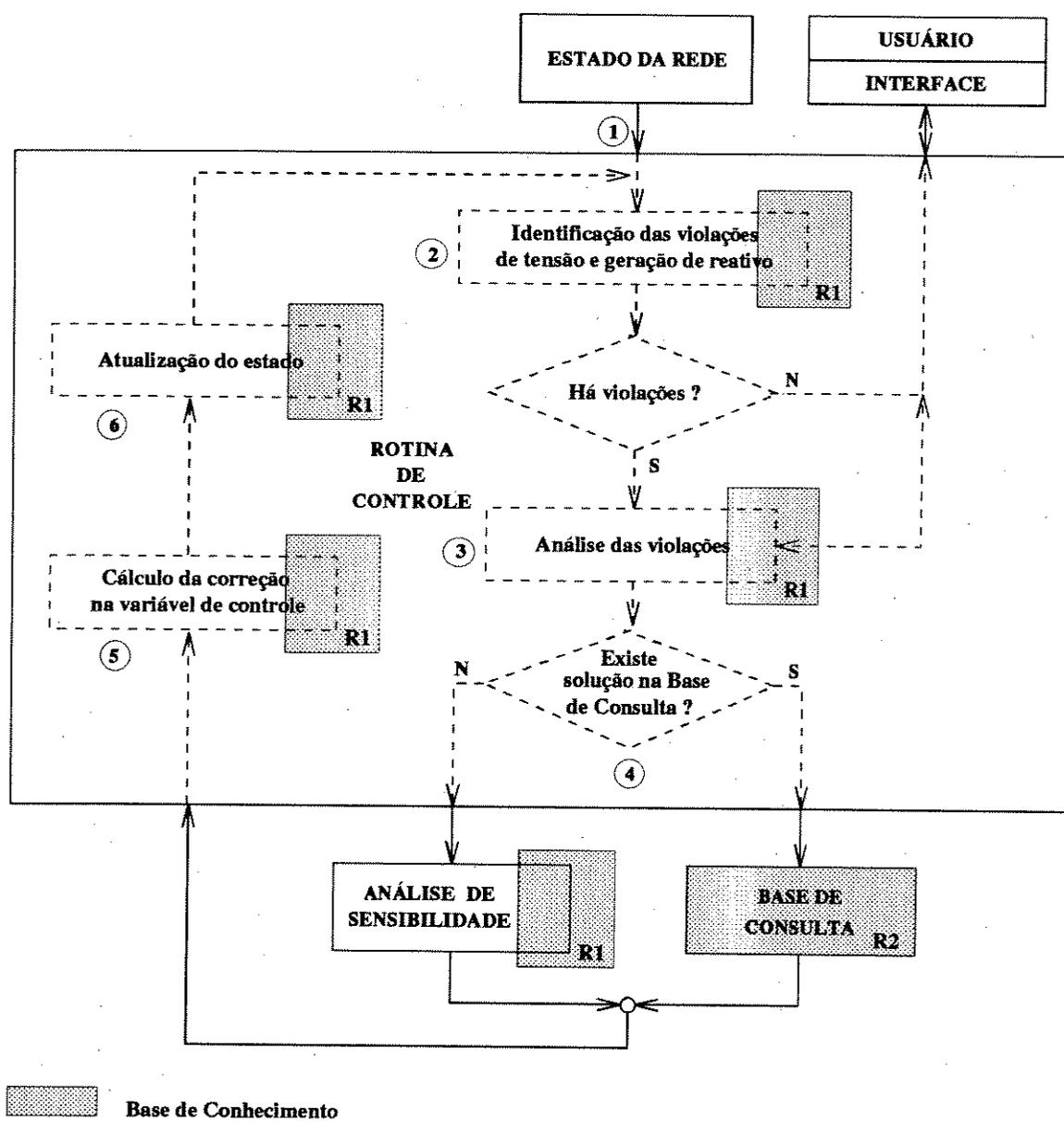


Figura 5.3: Procedimentos da Rotina de Controle

3. Análise e seleção das violações a serem corrigidas

A seleção da violação a ser corrigida pode ser feita diretamente pelo operador que se baseia em sua experiência com a rede. Entretanto, essa seleção pode ser feita de maneira automática através dos seguintes passos:

- (a) se existir apenas uma violação superior (inferior), então esta é selecionada;
- (b) se existir mais de uma violação superior (ou inferior), seleciona-se aquela que corresponde ao maior desvio de tensão (em pu).
- (c) caso haja violações superiores (sobretensões) e inferiores (subtensões) aos limites estabelecidos, primeiramente será corrigida a violação superior. Com isso tenta-se evitar a danificação de equipamentos (rompimento de isolamento). Posteriormente, as violações inferiores são corrigidas.

4. Busca dos controladores candidatos

Inicialmente verifica-se na base de consulta se existem regras empíricas operacionais aplicáveis. Estas poderão ou não fornecer os controladores a serem usados para remover a violação. No caso de não haver solução na base de consulta, é acionada a análise de sensibilidade que poderá fornecer a indicação dos controladores a serem utilizados. O primeiro controlador candidato será chamado de controlador primário.

5. Cálculo da correção na variável de controle

Para o controlador primário obtido em (4) calcula-se o desvio de tensão necessário para eliminar a violação. Se o desvio calculado não implica em violação dos limites do controlador selecionado, então implementa-se a ação de controle. Caso contrário fixa-se a variável de controle do controlador primário em seu limite e corrige-se o restante da violação através do segundo controlador selecionado (controlador secundário). O detalhamento deste processo é apresentado no apêndice b.

6. Atualização do estado e estimativa do efeito da ação de controle

Atualizam-se as tensões em todas as barras de carga com base nas correções determinadas em (5). Para a estimativa de um novo perfil de tensão nas barras de carga é feita uma análise de factibilidade. Depois disso é apresentada ao operador a ação de controle determinada ou, se for o caso, uma advertência de que o sistema não suporta o cálculo da ação de controle desejada. Ou seja, o nível de problema apresentado requer uma ferramenta mais poderosa.

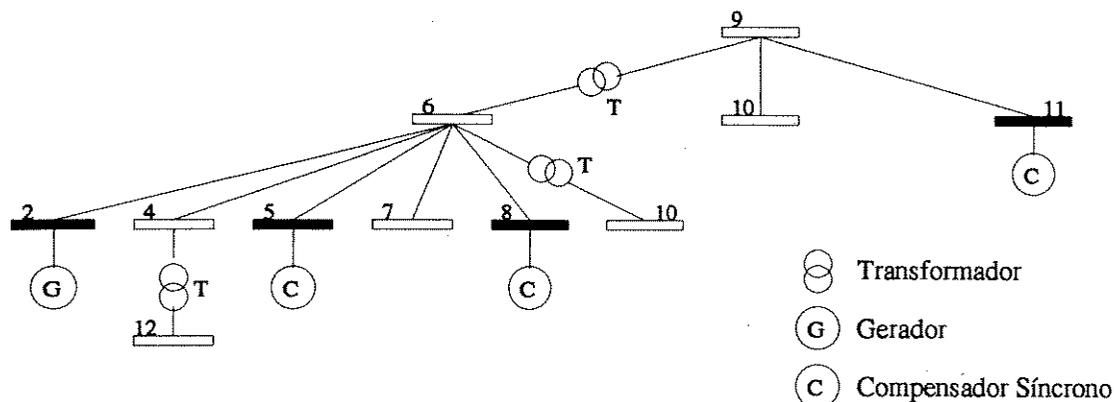


Figura 5.4: Controladores candidatos

5.2.2 Análise de Sensibilidade (regras implícitas R1)

Esta rotina tem por objetivo identificar os controladores candidatos para o restabelecimento de uma determinada violação de tensão. É formada por um conjunto de regras que estão combinadas com cálculos efetuados com a matriz de sensibilidade do sistema elétrico (capítulo 2).

Os controladores candidatos podem consistir de: geradores, compensadores síncronos, transformadores, compensadores de reativo estáticos e controláveis. Estes pertencem à primeira e segunda região adjacente em relação à violação detectada, onde o efeito da ação de controle, normalmente, é mais eficaz. A técnica implementada, rede local [36], foi usada para identificar os controladores candidatos. A figura 5.4 exemplifica os controladores candidatos obtidos a partir da violação na barra de carga (nº 9) do sistema IEEE30 [38].

A violação apresentada pode ou não ter controladores para atuarem sobre ela. Caso não os tenha, informa-se ao operador. Neste caso, outras técnicas de controle serão necessárias, tais como desligamento de carga ou alocação de reativo, as quais não são abordadas neste trabalho.

Para determinar qual dos controladores candidatos será usado para corrigir a violação, calcula-se a matriz de sensibilidade. Através desta os fatores de sensibilidade entre a violação e as variáveis de controle candidatas são conhecidas. A variável de controle com maior valor de sensibilidade é sugerida como *controlador primário* e a segunda, de maior sensibilidade, de *controlador secundário*.

Normalmente, a sensibilidade da injeção de potência reativa com relação a magnitude de tensão de barra é positiva, ou seja, aumentando a injeção de reativo aumenta-se também, a tensão de barra. Pode acontecer, por exemplo, que ao ser chaveado (ligado) um banco de capacitor para uma barra sob condições de tensão baixa, ao invés de uma melhora, piora o perfil de tensão. A razão disto é a sensibilidade negativa. Esta limitação foi representada neste trabalho, ou seja, se a ação de controle do controlador escolhido para corrigir a violação apresentar esta condição, então seleciona-se um outro controlador. Conforme Liu e Tomsovic no capítulo 4 em [10], a sensibilidade negativa ocorre quando o ponto de operação está distante da condição nominal de operação, mudando completamente o comportamento de tensão/potência reativa.

As regras utilizadas na análise de sensibilidade estão implícitas no algoritmo descrito abaixo:

1. Identificar o conjunto de controladores candidatos a resolver o problema apresentado.
 - (a) se a barra com problema possui controladores candidatos, então estes são selecionados e vai-se ao passo 2.
 - (b) se não existirem controladores candidatos, então informa-se ao operador e fim.
2. Selecionar o controlador mais eficiente entre os candidatos.
 - (a) calcula-se a matriz de sensibilidade entre o problema apresentado e às variáveis de controle e ordenam-se os controladores candidatos na ordem decrescente do valor de sensibilidade;
 - (b) seleciona-se o controlador de maior sensibilidade.

5.2.3 Base de Conhecimento (regras implícitas R1 e explícitas R2)

Parte do sistema proposto denominada base de conhecimento consiste de dois tipos de regras implementadas de modos distintos. O primeiro tipo, regras implícitas R1, estão acopladas à lógica na parte algorítmica do sistema e parte delas são acionadas juntamente com o modelo de sensibilidade do sistema de transmissão. O segundo tipo, regras explícitas R2, estão desacopladas da lógica do programa e são baseadas na experiência do operador com a rede elétrica. Neste trabalho, as regras explícitas estão implementadas na parte da base de conhecimento denominada de base de consulta.

Base de Consulta - Regras explícitas R2

A base de consulta processa conhecimento específico que pode ser adquirido, formalizado e implementado sem a necessidade de se interferir na lógica da parte procedural do sistema proposto. Neste trabalho foi implementado um conjunto pequeno de regras explícitas no sentido de dar uma idéia de como o sistema proposto pode ser aplicado. Logo, a manipulação dessas regras é feita através de uma simples busca em árvore que permite acioná-las e, caso haja uma solução armazenada para o problema apresentado, esta vai ser analisada pelo sistema como um todo. Assim, no caso de aplicações específicas em redes reais (produção) esta parte do sistema proposto pode ser desenvolvida utilizando-se de outras tecnologias de processamento do conhecimento como linguagens de Inteligência Artificial ou "Shells".

As regras explícitas implementadas aqui caracterizam-se por resolverem violações de tensão em alguns barramentos específicos (críticos) de carga. Estes barramentos, geralmente, tendem a violar seus limites operacionais quando ocorrem perturbações.

A modelagem do conhecimento experimental é ilustrada de forma bem simplificada na figura 5.5. Quando um pequeno problema ocorre, o operador primeiramente compreende a situação (diagnóstico) identificando as restrições violadas e, em seguida, determina as ações (decisões) de controle as quais virão a restabelecer o sistema dentro das condições normais. Estes procedimentos de diagnóstico e decisão para o controle corretivo de tensão estabelece regras empíricas (R2).

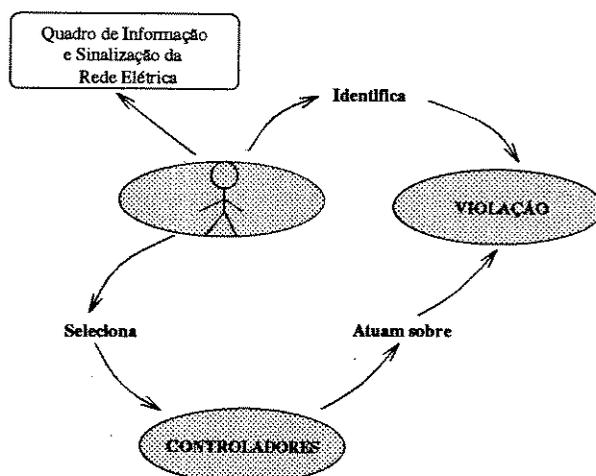


Figura 5.5: Modelagem do Conhecimento Experimental

Baseado na experiência de operação para cada rede de transmissão, o conhecimento experimental adquirido é formalizado e implementado em forma de regras de

produção (conhecimento explícito) numa árvore de consulta. Através destas sabe-se, a princípio, quais os convenientes controladores para restabelecer a magnitude de tensão de uma determinada barra específica com problema.

O modelo de representação deste tipo de conhecimento é baseado em uma *árvore de consulta*, como mostra a figura 5.6. A árvore de consulta é uma estrutura de dados recursiva que facilita o processo de busca e consulta. É importante que uma certa ordem em relação ao conhecimento representado seja mantida na estrutura da árvore, pois grande parte do nosso conhecimento está relacionado de maneira hierárquica.

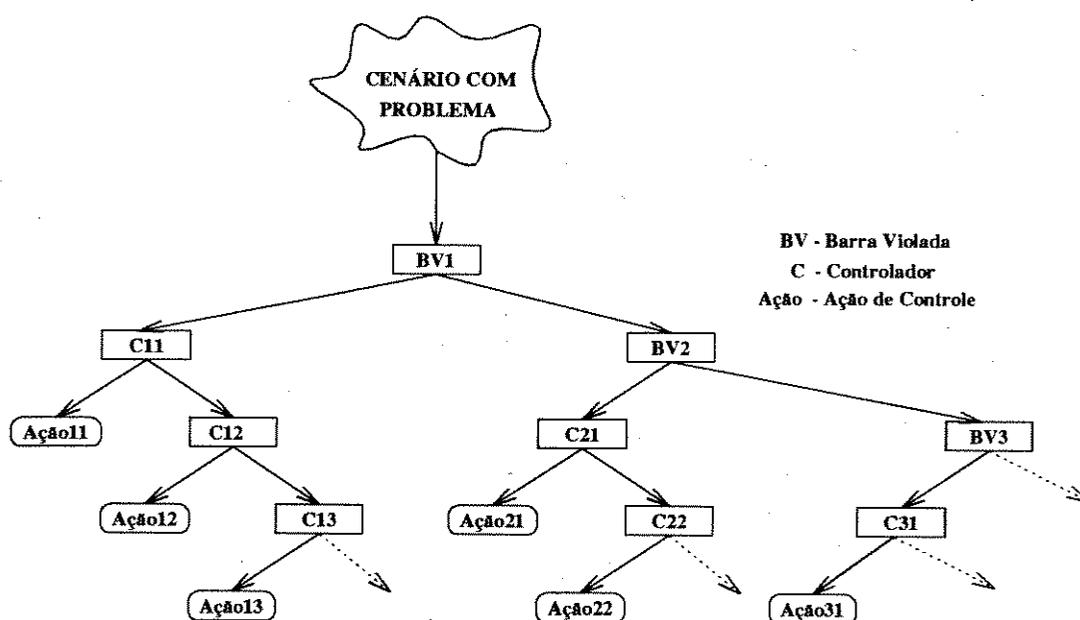


Figura 5.6: Representação da Árvore de Consulta

A árvore de consulta se ramifica em sub árvores que correspondem às barras de carga específicas da rede. Para cada barra o conhecimento específico sobre a correção de sua tensão é codificado em regras que estão agregadas à árvore. Os nós contêm as condições da barra e dos controladores. Os arcos fazem relações para a manipulação dessas condições, representando as regras empíricas do tipo R2. Portanto, os controladores para cada barra específica são definidos, ordenados e suas condições estabelecidas a partir do conhecimento adquirido.

O esquema abaixo simplifica a idéia das regras implementadas na árvore de consulta:

SE condições da barra de carga violada (BV1) são satisfeitas

ENTÃO

(*) SE condições operacionais do controlador (C11) são satisfeitas

ENTÃO selecionar o controlador (C11)

SE corrigir o problema

ENTÃO implementar ação de controle (AÇÃO11)

SENÃO retornar (*) e buscar o próximo controlador (C12)

SENÃO

SE condições operacionais do controlador (C12) são satisfeitas

ENTÃO sugerir controlador (C12)

SE ...

SENÃO

SE condições da barra de carga violada (BV2) são satisfeitas

ENTÃO ...

O método de inferência utilizado está implícito na própria estrutura de programação da árvore. Este mecanismo tem a função de verificar se as condições estabelecidas em cada nó da árvore são satisfeitas com os dados da Base de Dados. O caminho seguido é dado pelo resultado no nó, conforme o algoritmo acima representado.

Com relação a figura 5.6, o processo de busca do controlador mais eficiente inicializa-se ao comparar uma barra com problema com as barras especificadas (BV) na árvore de consulta. A condição inicial para disparar as regras empíricas é que elas se igualem. Concretizado este fato, o mecanismo de inferência verifica se todas as condições estabelecidas nas regras são satisfeitas para o controlador proposto (C). Se forem, o controlador é selecionado e uma ação de controle (Ação) é calculada e sugerida. Se as condições não forem satisfeitas, outro controlador, caso exista, é indicado.

Caso não existam regras na árvore de consulta que satisfaçam as condições, o processo de busca pelo controlador continuará através da análise de sensibilidade descrita anteriormente.

Portanto, para resolver certos problemas de tensão/potência reativa, a decisão de controle pode ser baseada em regras empíricas (R2). Embora estas regras muitas vezes comprometam as exigências de otimalidade, busca-se uma resposta que nem sempre será a melhor.

Capítulo 6

SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

Neste capítulo é apresentada e discutida a simulação computacional de cenários para avaliar o desempenho da metodologia proposta no capítulo 5.

Em escala de laboratório, foram analisadas várias situações de perturbação nos sistemas IEEE-30 e IEEE-57 barras [38] para adquirir uma certa familiaridade com a operação destes sistemas. Estas perturbações consistiram em eventos simples, tais como, variação na carga, contingência de linha e de transformador. A partir daí, estabeleceram-se as regras empíricas que devem atuar no controle corretivo de tensão/potência reativa na Base de Consulta.

Para demonstrar os procedimentos do sistema proposto no capítulo 5, alguns cenários com problemas de tensão e suas respectivas decisões de controle são aqui abordados. Comparações entre estratégias de controle baseadas na Análise de Sensibilidade e Base de Consulta são apresentadas em certas simulações de cenários com a finalidade de avaliar as regras experimentais utilizadas. Além disso, para visualizar os resultados obtidos, o perfil de tensão após a perturbação e depois da ação de controle sugerida é representado através de gráficos.

As condições consideradas comuns na simulação de cenários são as seguintes:

1. Base: 100 MVA;
2. Restrições operacionais
 - (a) Limites do módulo da tensão nas barras de carga: 0.95 - 1.05 pu;
 - (b) Limites do módulo da tensão nas barras de controle: 0.90 - 1.1 pu;
 - (c) Limites da potência reativa gerada são especificados.

3. Todos taps são considerados como LTC (Load Tap Changing), ou seja, são providos de comutador de derivação sob carga.

Abreviações utilizadas:

BV	barra violada,
C	controlador,
Ação	ação de controle,
GER	gerador,
CS	compensador síncrono,
TRAFO	transformador,
CRF	compensador de reativo fixo,
CRV	compensador de reativo variável,
(X)	barra X,
$[i - j]$	ramo entre as barras i e j,
V	magnitude de tensão,
Q_g	potência reativa gerada.

6.1 Sistema IEEE-30 Barras

O diagrama unifilar correspondente ao sistema é ilustrado na figura 6.1. O estado inicial do sistema é apresentado na tabela 6.1. Os parâmetros de circuito encontram-se em [38].

Na figura 6.1, a linha pontilhada demonstra quais são os controladores atribuídos às barras de carga específicas (críticas). Estas estão representadas na base de consulta, figura 6.2, juntamente com o conhecimento experimental para o cenário previsto.

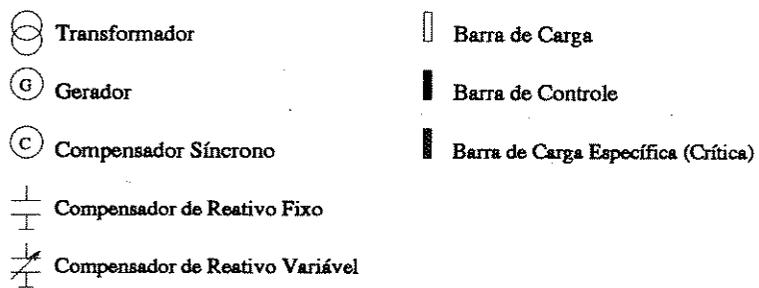
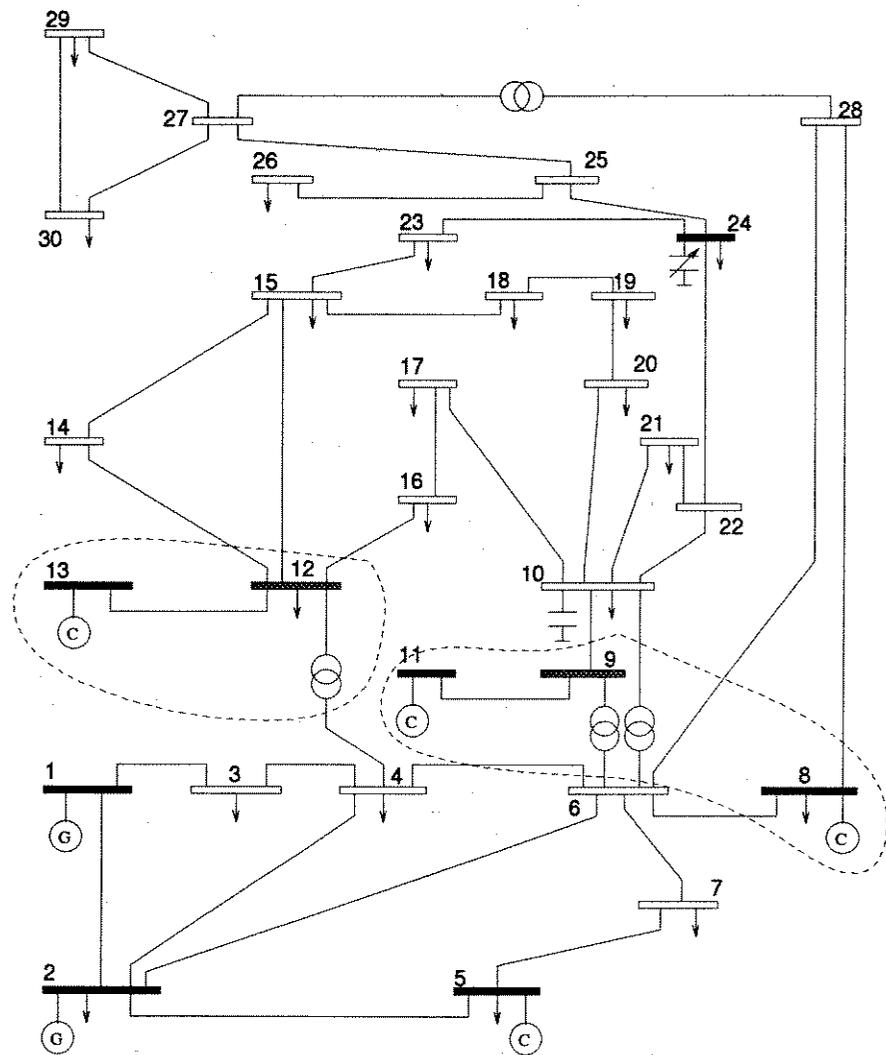


Figura 6.1: Diagrama unifilar - Sistema IEEE30 barras

No. BARRA	TIPO	TENSÃO		GERAÇÃO		CARGA		SHUNT
		MOD. /pu	ANG. /grau	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	GER	1.0700	-0.00	260.8	8.1	0.0	0.0	0.0
2	GER	1.0420	-5.25	40.0	28.1	21.7	12.7	0.0
3	Carga	1.0226	-7.79	0.0	0.0	2.4	1.2	0.0
4	Carga	1.0120	-9.41	0.0	0.0	7.6	1.6	0.0
5	CS	1.0100	-14.17	0.0	37.5	94.2	19.0	0.0
6	Carga	1.0102	-11.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	Carga	1.0023	-12.92	0.0	0.0	22.8	10.9	0.0
8	CS	1.0100	-11.90	0.0	37.3	30.0	30.0	0.0
9	Carga	1.0500	-14.23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	CRF	1.0440	-15.84	0.0	0.0	5.8	2.0	20.9
11	CS	1.0820	-14.23	0.0	16.5	0.0	0.0	0.0
12	Carga	1.0499	-15.01	0.0	0.0	11.2	7.5	0.0
13	CS	1.0550	-15.01	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0
14	Carga	1.0362	-15.92	0.0	0.0	6.2	1.6	0.0
15	Carga	1.0327	-16.05	0.0	0.0	8.2	2.5	0.0
16	Carga	1.0402	-15.64	0.0	0.0	3.5	1.8	0.0
17	Carga	1.0375	-15.99	0.0	0.0	9.0	5.8	0.0
18	Carga	1.0245	-16.67	0.0	0.0	3.2	0.9	0.0
19	Carga	1.0228	-16.85	0.0	0.0	9.5	3.4	0.0
20	Carga	1.0273	-16.66	0.0	0.0	2.2	0.7	0.0
21	Carga	1.0323	-16.30	0.0	0.0	17.5	11.2	0.0
22	Carga	1.0330	-16.29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	Carga	1.0253	-16.50	0.0	0.0	3.2	1.6	0.0
24	CRV	1.0240	-16.75	0.0	0.0	8.7	6.7	7.8
25	Carga	1.0191	-16.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	Carga	1.0014	-16.67	0.0	0.0	3.5	2.3	0.0
27	Carga	1.0245	-15.68	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	Carga	1.0069	-11.78	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	Carga	1.0047	-16.91	0.0	0.0	2.4	0.9	0.0
30	Carga	0.9933	-17.79	0.0	0.0	10.6	1.9	0.0

Tabela 6.1: Estado inicial do sistema IEEE30

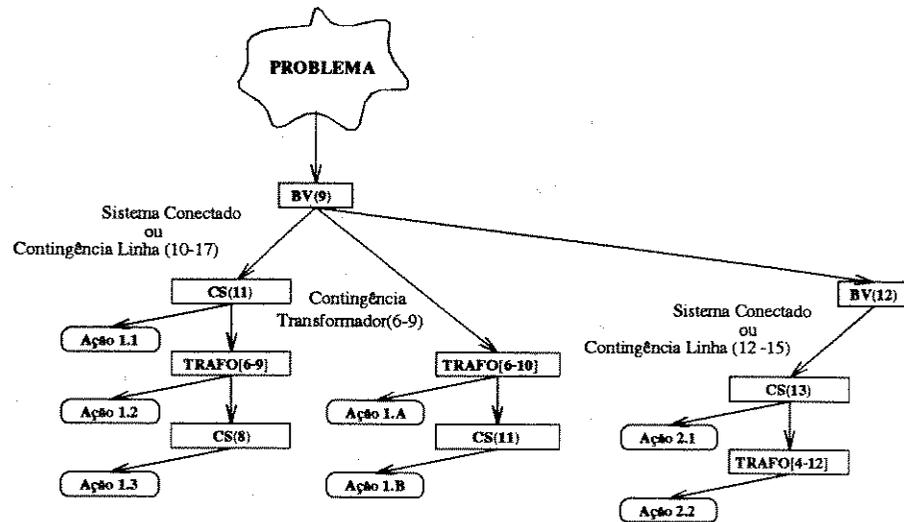


Figura 6.2: Base de Consulta - IEEE30

6.1.1 Cenário 1

Contingência simples, saída da linha [10-17].

PROBLEMA

Tensão alta (> 1.05) na barra de carga 9. Desvio de tensão $\Delta V(9) = 0.0032$ pu.

Figura 6.3.

ANÁLISE

A base de consulta correspondente ao sistema é consultada. Logo, verifica-se que existe uma regra empírica armazenada que poderá resolver o problema. O primeiro controlador, um compensador síncrono CS(11), é selecionado e suas condições analisadas.

SE há contingência da linha (10-17) e
barra de carga (9) é violada (tensão alta),

ENTÃO o controlador CS(11) é selecionado.

SE este é disponível e
encontra dentro dos seus limites,

ENTÃO o controlador CS(11) é sugerido.

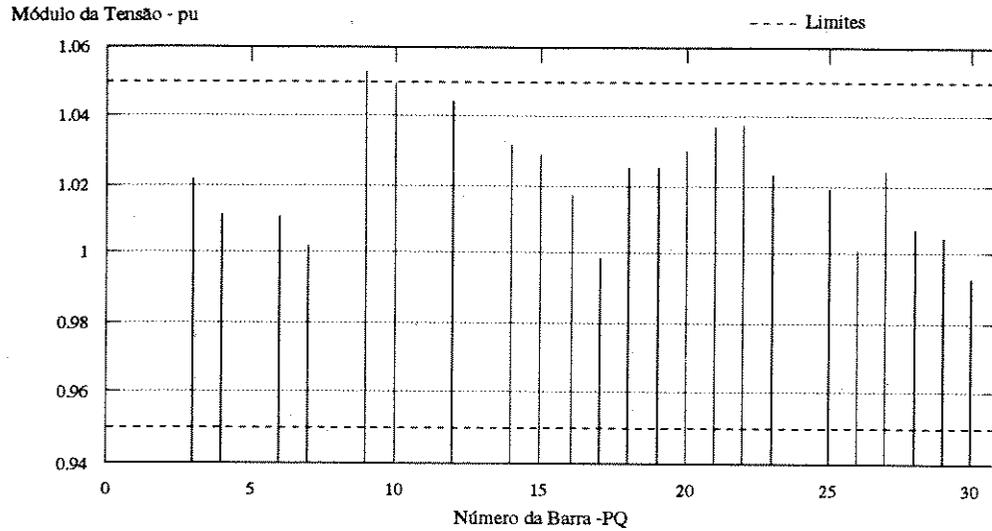


Figura 6.3: **Cenário 1:** Perfil de tensão após a contingência

Satisfeitas estas condições, uma ação de controle baseada na sensibilidade é sugerida para o CS(11). O perfil de tensão estimado após a ação de controle, figura 6.4, mostra que o problema foi eliminado e todas as demais barras de carga permaneceram dentro de seus limites. Quanto à geração de potência reativa, não houve violação nas barras com controle.

DECISÃO DE CONTROLE

Reduzir de 1.082 para 1.0733 pu a magnitude de tensão da barra (11) através do compensador síncrono (11) para eliminar $\Delta V(9)$.

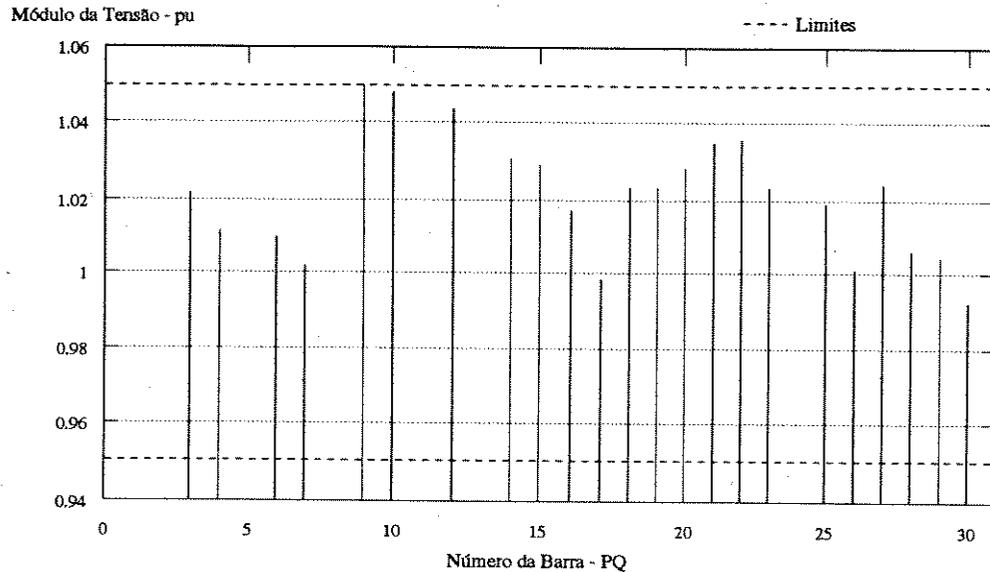


Figura 6.4: **Cenário 1:** Perfil de tensão depois da ação de controle

6.1.2 Cenário 2

Contingência: saída do transformador(6-9).

PROBLEMA

Tensão alta nas barras de carga 9 e 12, com os respectivos desvios de tensão $\Delta V(9) = 0.0059$ pu e $\Delta V(12) = 0.0011$ pu, figura 6.5. Violação de reativo do compensador síncrono CS(8), tabela 6.2.

ANÁLISE E DECISÃO DE CONTROLE

Foi feita uma comparação entre as estratégias de controle obtidas pela Análise de Sensibilidade e pela Base de Consulta, com o objetivo de demonstrar que às vezes a escolha do controlador de maior sensibilidade pode obter soluções não muito boas.

A barra de carga (9) é escolhida primeiramente para ser corrigida, pois apresenta o maior desvio.

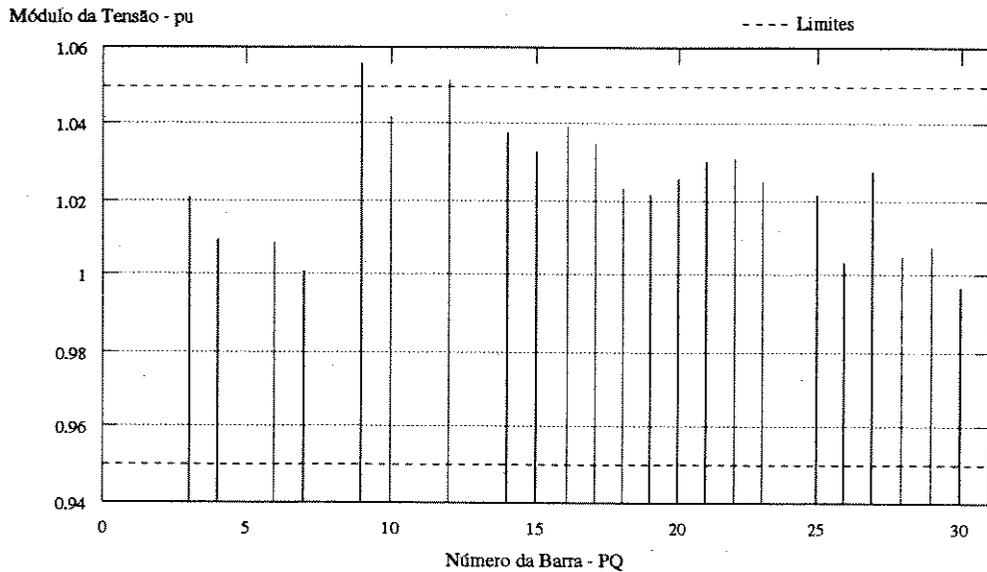


Figura 6.5: **Cenário 2:** Perfil de tensão após a contingência

- Estratégia baseada na Análise de Sensibilidade

1. São identificados os controladores locais com os respectivos valores de sensibilidade em relação à barra de carga (9).

Variável Violada	Controlador	Sensibilidade
(9)	CS(11)	0.5287
	TRAFO(6)(10)	0.1046

2. O controlador de maior sensibilidade é selecionado, CS(11) - controlador primário.
3. Para corrigir o incremento de tensão $\Delta V(9)$, o controlador primário reduziu a magnitude de tensão da barra (11) de 1.082 para 1.0708 pu.
4. A sua ação de controle restabeleceu as tensões violadas para dentro dos limites, figura 6.6, mas fez com que o CS(8) fornecesse mais reativo, continuando assim violado, tabela 6.2.

Portanto, foi necessário atuar em um outro controlador para corrigir o reativo. O compensador síncrono da barra (8) foi escolhido e sua ação de controle foi reduzir a magnitude de tensão de 1.010 para 1.008 pu, obtendo-se a geração de reativo dentro dos seus limites 39.70 MVar.

- Estratégia baseada no Conhecimento Experimental

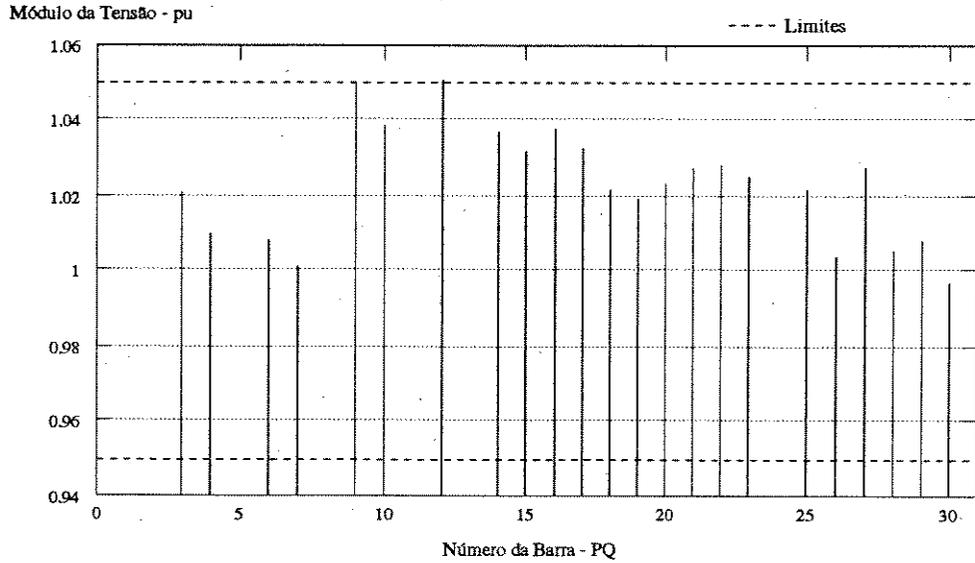


Figura 6.6: Perfil de tensão - Análise de Sensibilidade

Barra	Controlador	Potência Reativa (Geração - MVar)				
		Qg inicial	Sensibilidade	Empírico	Mín.	Máx.
1	GER	9.08	9.16	8.77	-50	50
2	GER	30.04	30.22	28.69	-40	50
5	CS	38.32	38.39	37.52	-40	40
8	CS	41.78	42.18	37.51	-10	40
11	CS	13.59	10.75	16.42	-6	24
13	CS	2.91	3.42	3.96	-6	24
24	CR	7.8	12.60	11.6	-6	24

Tabela 6.2: **Cenário 2:** Geração de potência reativa

1. Observa-se na figura 6.2, que existe um conhecimento experimental referente ao cenário juntamente com o problema. Os controladores determinados a atuar na barra (9) são sugeridos conforme a seguinte ordem respectiva: TRAF0(6)(10) e CS(11).
2. procedimento operacional estabelecido:

SE Contingência TRAF0(6-9) e
 Barra de carga (9) violada (tensão alta),
ENTÃO o ajuste de tap do TRAF0(6-10) é uma provável sugestão,
SE TRAF0(6)(10) está em serviço e
 encontra dentro de seus limites e
 Reativo gerado CS(8) $> 95\% Q_{gmax}$ e
 Reativo gerado CS(11) $< 80\% Q_{gmax}$
ENTÃO o TRAF0(6)(10) é sugerido e a ação de controle é implementada.

Satisfeitas as condições, a ação de controle foi diminuir a posição do tap do TRAF0(6-10) de 1.032 a 0.98 pu.

3. Após a ação de controle, a violação foi eliminada, o novo perfil das tensões da rede encontra-se dentro dos limites, figura 6.7, e o requerimento de reativo é satisfeito, tabela 6.2.

6.1.3 Cenário 3

Contingência de linha, saída da linha [27 -30].

PROBLEMA

Tensão baixa na barra de carga 30. Desvio $\Delta V(30) = 0.0110$ pu.

ANÁLISE

Pode acontecer de ocorrer situações novas em que ainda não exista um conhecimento experimental armazenado que possa corrigir o problema. Nota-se na figura 6.2, que a barra 30 não é considerada como uma barra específica. Neste caso, o sistema-teste informa ao operador que não existem regras na base de consulta que se relacionem com o problema. Assim, busca-se um outra alternativa, a análise de sensibilidade. Esta fornece a seguinte solução:

DECISÃO DE CONTROLE

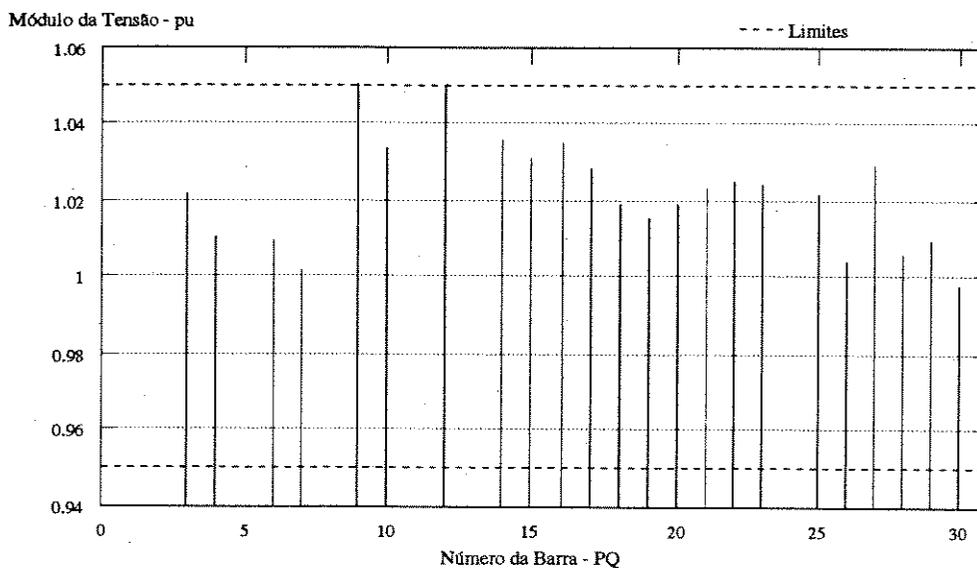


Figura 6.7: Perfil de tensão - Conhecimento Experimental

A decisão de controle tomada foi de aumentar a posição do tap do TRAFO(27-28) de 1.033 para 1.050 pu.

Resolvido o problema, o operador poderá, facultativamente, acrescentar na base de consulta o conhecimento correspondente à solução encontrada.

6.2 Sistema IEEE-57 Barras

O diagrama unifilar é representado na figura 6.8. A tabela 6.3, apresenta o estado inicial do sistema. Os parâmetros do sistema podem ser encontrados em [38].

Parte do conhecimento experimental adquirido e implementado na base de consulta está ilustrado na figura 6.9.

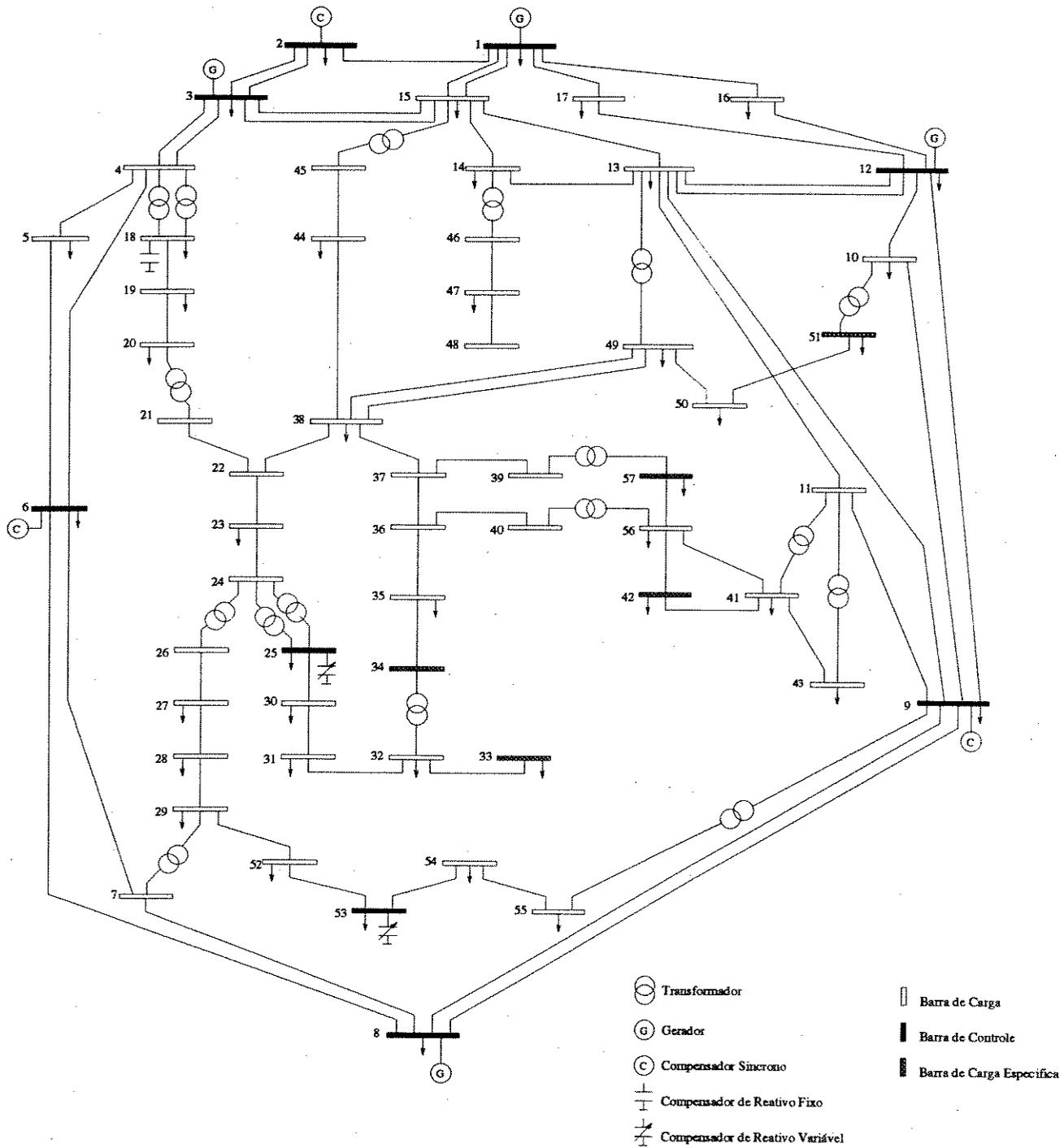


Figura 6.8: Diagrama unifilar - Sistema IEEE57 barras

No. BARRA	TIPO	TENSÃO		GERAÇÃO		CARGA		SHUNT
		MOD. /pu	ANG. /grau	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	GER	1.0400	-0.00	491.0	126.31	55.0	17.0	0.0
2	CS	1.0100	-1.25	0.0	-0.52	3.0	88.0	0.0
3	GER	0.9850	-6.25	40.0	-1.96	41.0	21.0	0.0
4	Carga	0.9807	-7.71	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	Carga	0.9764	-9.08	0.0	0.0	13.0	4.0	0.0
6	CS	0.9800	-9.29	0.0	1.25	75.0	2.0	0.0
7	Carga	0.9846	-8.45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	GER	1.0050	-5.14	450.0	61.35	150.0	22.0	0.0
9	CS	0.9800	-10.14	0.0	-1.24	121.0	26.0	0.0
10	Carga	0.9860	-11.87	0.0	0.0	5.0	2.0	0.0
11	Carga	0.9743	-10.63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	GER	1.0150	-10.77	310.0	127.60	377.0	24.0	0.0
13	Carga	0.9799	-10.14	0.0	0.0	18.0	2.3	0.0
14	Carga	0.9750	-9.65	0.0	0.0	10.5	5.3	0.0
15	Carga	0.9891	-7.44	0.0	0.0	22.0	5.0	0.0
16	Carga	1.0132	-9.08	0.0	0.0	43.0	3.0	0.0
17	Carga	1.0172	-5.51	0.0	0.0	42.0	8.0	0.0
18	CRF	0.9997	-12.13	0.0	0.0	27.2	9.8	10.0
19	Carga	0.9668	-13.66	0.0	0.0	3.3	0.6	0.0
20	Carga	0.9589	-13.89	0.0	0.0	2.3	1.0	0.0
21	Carga	1.0015	-13.46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	Carga	1.0024	-13.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	Carga	1.0015	-13.50	0.0	0.0	6.3	2.1	0.0
24	Carga	1.0012	-14.29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	CRV	1.0060	-19.13	0.0	0.0	6.3	3.2	10.3
26	Carga	0.9611	-13.99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	Carga	0.9839	-12.59	0.0	0.0	9.3	0.5	0.0
28	Carga	0.9990	-11.59	0.0	0.0	4.6	2.3	0.0
29	Carga	1.0125	-10.89	0.0	0.0	17.0	2.6	0.0
30	Carga	0.9841	-19.59	0.0	0.0	3.6	1.8	0.0
31	Carga	0.9518	-20.08	0.0	0.0	5.8	2.9	0.0
32	Carga	0.9564	-18.99	0.0	0.0	1.6	0.8	0.0
33	Carga	0.9541	-19.03	0.0	0.0	3.8	1.9	0.0
34	Carga	0.9548	-14.76	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	Carga	0.9608	-14.48	0.0	0.0	6.0	3.0	0.0

No. BARRA	TIPO	TENSÃO		GERAÇÃO		CARGA		SHUNT
		MOD. /pu	ANG. /grau	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
36	Carga	0.9698	-14.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	Carga	0.9783	-13.98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	Carga	1.0044	-13.22	0.0	0.0	14.0	7.0	0.0
39	Carga	0.9763	-14.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	Carga	0.9669	-14.21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	Carga	0.9950	-14.57	0.0	0.0	6.3	3.0	0.0
42	Carga	0.9642	-16.02	0.0	0.0	7.1	4.4	0.0
43	Carga	1.0096	-11.81	0.0	0.0	2.0	1.0	0.0
44	Carga	1.0104	-12.30	0.0	0.0	12.0	1.8	0.0
45	Carga	1.0342	-9.64	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	Carga	1.0340	-11.36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	Carga	1.0165	-12.83	0.0	0.0	29.7	11.6	0.0
48	Carga	1.0141	-13.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	Carga	1.0291	-13.42	0.0	0.0	18.0	8.5	0.0
50	Carga	1.0166	-13.89	0.0	0.0	21.0	10.5	0.0
51	Carga	1.0466	-12.98	0.0	0.0	18.0	5.3	0.0
52	Carga	0.9785	-13.78	0.0	0.0	15.9	6.2	0.0
53	CRV	0.9800	-14.70	0.0	0.0	20.0	10.0	17.9
54	Carga	1.0029	-13.28	0.0	0.0	4.1	1.4	0.0
55	Carga	1.0351	-11.58	0.0	0.0	6.8	3.4	0.0
56	Carga	0.9650	-16.55	0.0	0.0	7.6	2.2	0.0
57	Carga	0.9607	-17.06	0.0	0.0	6.7	2.0	0.0

Tabela 6.3: Estado inicial do sistema IEEE57

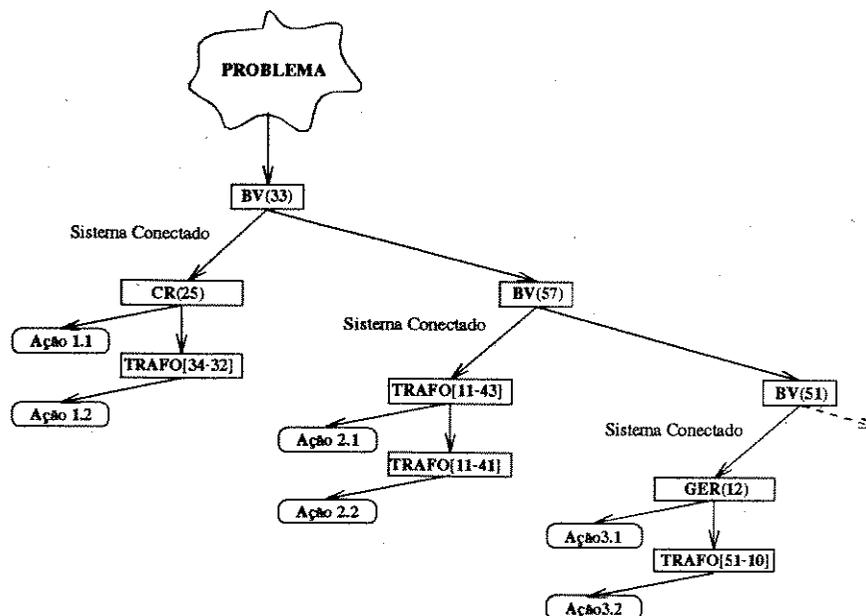


Figura 6.9: Base de Consulta - IEEE57

6.2.1 Cenário 4

Adicionou-se carga ($3.0+j1.0$ pu) na barra 57.

PROBLEMA

Tensão baixa (< 0.95) na barra de carga 57. Desvio $\Delta V(57) = 0.0024$ pu. Veja Figura 6.10.

ANÁLISE

A princípio, pela análise de sensibilidade, o TRAFO[39-57] seria escolhido para eliminar o problema. Mas, sua ação fez com que as tensões da extremidade oposta (barras 32,33,34,35) do trafo diminuíssem, aproximando-as do limite inferior, o que não é muito viável. Portanto, a base de consulta indica que o melhor controlador é o TRAFO[11-43] pois, além de corrigir o problema, percebe-se ainda uma melhoria em algumas tensões do sistema (barras 31,32,34,42,43,56,57). A explicação para isso é a mudança no comportamento de tensão/potência reativa na rede elétrica quando altera o tap do transformador mantendo as fontes com tensão constantes.

DECISÃO DE CONTROLE

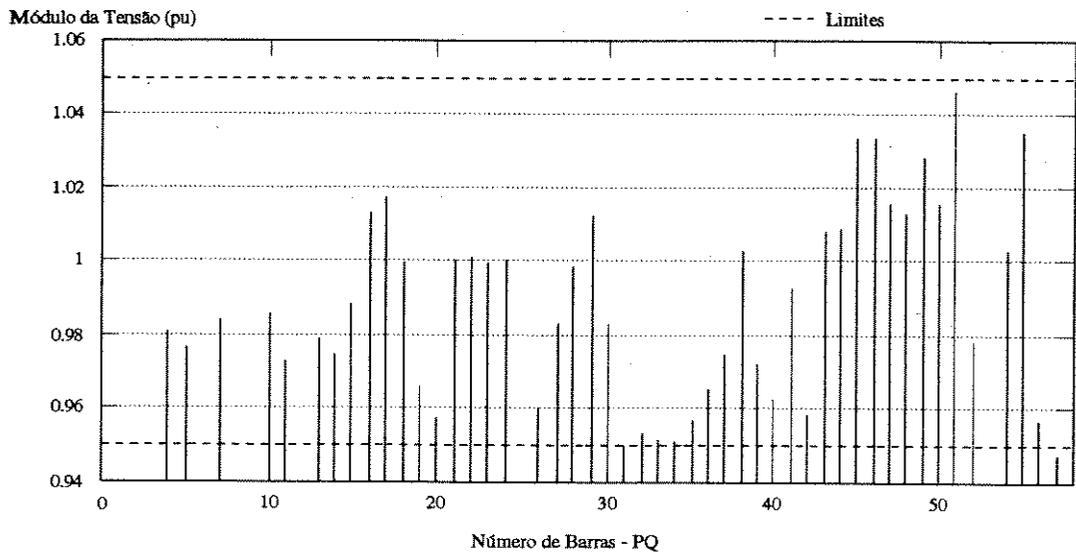


Figura 6.10: **Cenário 4:** Perfil de tensão

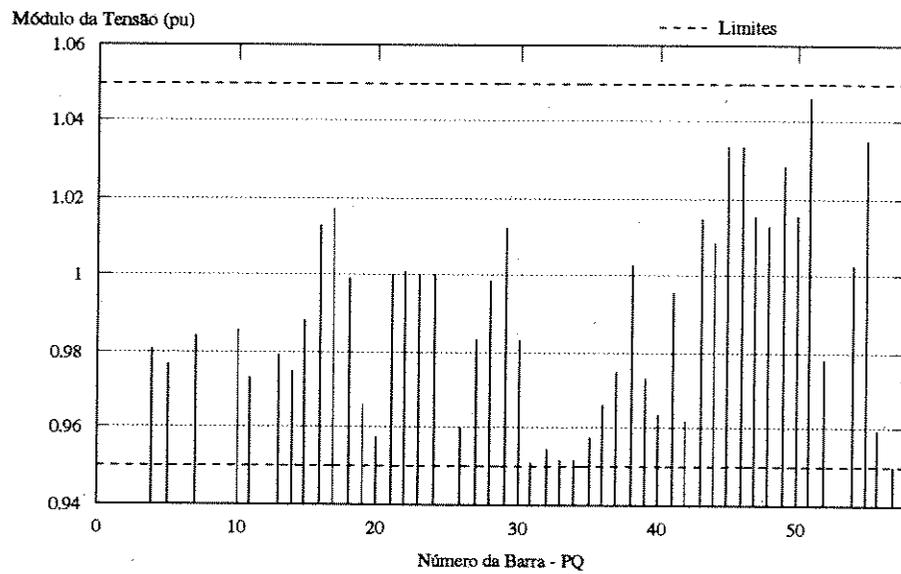


Figura 6.11: **Cenário 4:** Perfil de tensão obtido pela base de consulta

A ação de controle sugerida foi de aumentar a posição do tap do TRAF0[11-43] de 1.044 para 1.0522 pu. A figura 6.11 mostra o resultado obtido do perfil de tensão após a ação de controle.

6.2.2 Cenário 5

Adicionou-se carga ($2.4+j0.5$ pu) na barra 32.

PROBLEMA

Tensão baixa nas barras de carga 31,32,33 e 34. Seus desvios são, respectivamente, $\Delta V(31)= 0.0038$ pu, $\Delta V(32)= 0.005$ pu, $\Delta V(33)= 0.0073$ pu, $\Delta V(34)= 0.0012$ pu. Veja Figura 6.12.

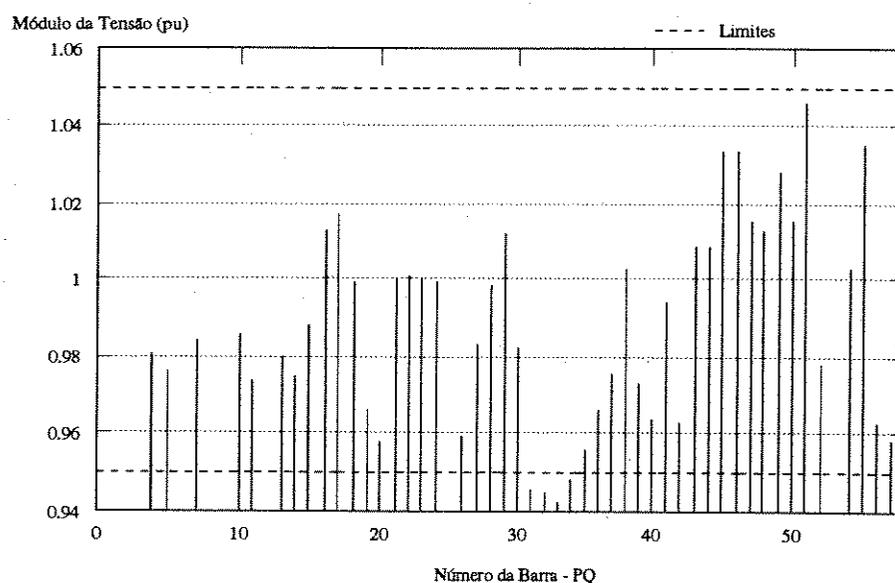


Figura 6.12: Cenário 5: Perfil de tensão

ANÁLISE

A violação mais severa é então selecionada, barra de carga(33). A base de consulta é consultada e o compensador de reativo (banco de capacitores) da barra 25 é indicado para eliminar a violação.

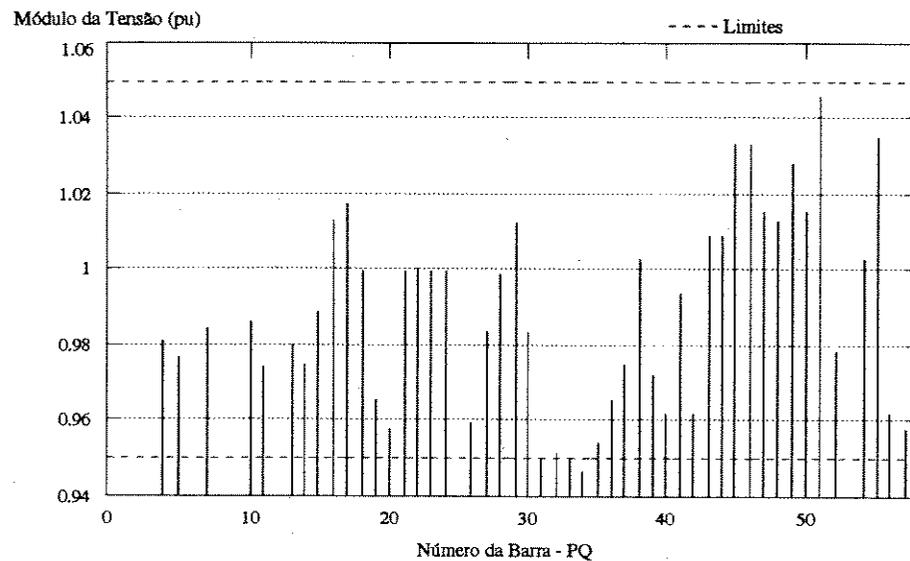


Figura 6.13: **Cenário 5:** Perfil de tensão obtido pela análise de sensibilidade

Apesar da sensibilidade indicar o TRAF0[34-32], este não pode ser escolhido, pois sua ação piora ainda mais a tensão no barramento (34). Veja figura 6.13.

DECISÃO DE CONTROLE

A decisão de controle fornecida pelo sistema-teste foi de aumentar a magnitude de tensão da barra (25) de 1.006 para 1.020 pu através do compensador de reativo (25). A figura 6.14 mostra o perfil de tensão após a ação de controle do CR(25). Quanto a geração de reativo, não houve problemas de violação.

Portanto, pode-se concluir que a simulação de cenários realizada nos sistemas IEEE-30 e IEEE57 barras demonstra que as decisões de controle obtidas pelas regras empíricas na base de consulta são encontradas de maneira consistente para resolver certos problemas de tensão/potência reativa.

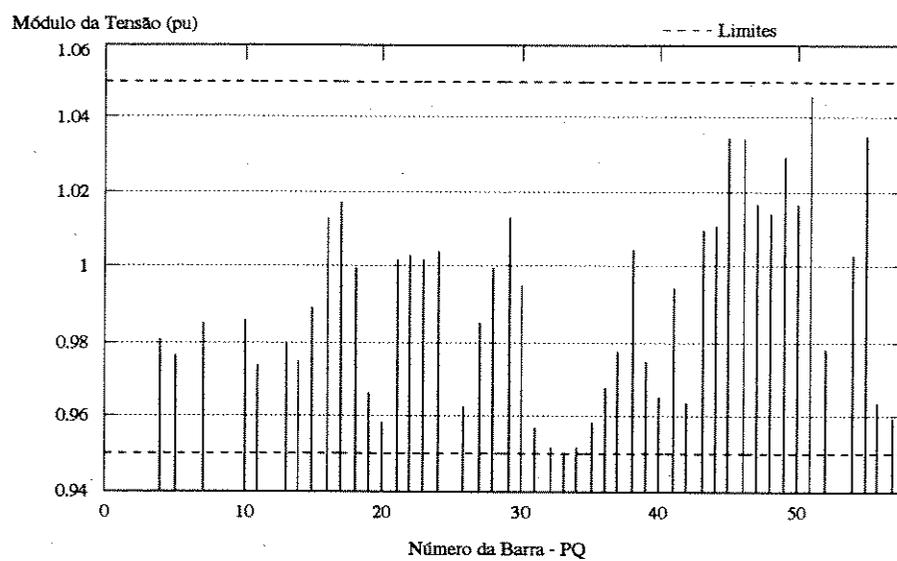


Figura 6.14: **Cenário 5:** Perfil de tensão obtido pela base de consulta

Capítulo 7

Conclusões

Procurou-se neste trabalho limitar o conjunto de conceitos apresentados ao essencial necessário para o entendimento da metodologia proposta. Inicialmente, descreveu-se o ambiente no qual um sistema do tipo proposto deve ser utilizado e caracterizaram-se os Sistemas Especialistas segundo a literatura disponível.

Em seguida, analisaram-se as aplicações de Sistemas Especialistas no suporte ao controle de tensão/potência reativa propostas em [10] [20] [22]. Estas aplicações caracterizam-se por utilizar algoritmos, baseados em análise de sensibilidade, gerenciados por um conjunto de regras implementadas em OPS/83 e PROLOG. Estas regras, entretanto, não estão representando a experiência prática dos técnicos com a operação da rede elétrica. Assim, essas aplicações não demonstram o potencial de Sistemas Especialistas para armazenar e utilizar conhecimento especializado que, geralmente, não podem ser representados por algoritmos computacionais. Ao contrário, no sistema proposto aqui as regras de gerenciamento da Análise de Sensibilidade são implementadas em um algoritmo computacional escrito em linguagem C. Ou seja, operam de maneira procedural conjuntamente com o cálculo dos fatores de sensibilidade. Entretanto, juntamente com esse algoritmo propõe-se a execução conjunta de uma base de consulta onde deve estar representado o conhecimento experimental proveniente dos especialistas da operação.

Neste trabalho é proposta uma metodologia que combina uma heurística baseada na simulação associada a um modelo de sensibilidade (Rotinas de Controle e de Análise de Sensibilidade) com o conhecimento específico dos técnicos a respeito da operação da rede elétrica (Base de Consulta). Esta idéia norteou o desenvolvimento e implementação de um sistema híbrido para auxiliar nas decisões de controle de tensão/ potência reativa em situações não críticas da operação de redes elétricas.

O sistema proposto pode ser aplicado na supervisão e controle de redes de trans-

missão. O conhecimento específico para cada rede pode ser adquirido, implementado, modificado e expandido, à medida em que os operadores ganham novas experiências com a operação, sem comprometer a parte procedural do programa. Desta forma, o sistema torna-se mais flexível e, além de dar apoio a operação, pode ser utilizado no treinamento de operadores menos experientes. Certamente a utilização de sistemas análogos ao proposto tornarão a operação mais eficiente devido a disponibilidade do conhecimento especializado.

Nas simulações computacionais, demonstrou-se que o conhecimento específico adquirido e implementado para determinados cenários, fornece soluções mais eficientes do que aquelas que poderiam ser fornecidas pela Análise de Sensibilidade. Portanto, com base nos resultados apresentados, constatou-se que na existência de conhecimento específico armazenado, este fornece ao operador ações de controle que atuam na correção da violação. E na falta deste conhecimento, a Análise de Sensibilidade sugere as ações de controle.

A linguagem de programação utilizada foi o C que, evidentemente, limita as possibilidades de representação, manipulação e processamento do conhecimento necessário à base de consulta. Portanto, é recomendável a implementação desse conhecimento através de linguagens de Inteligência Artificial ou ferramentas de Engenharia do Conhecimento (Shells). Para isso, é necessário o interfaceamento entre as rotinas convencionais que executam a parte algorítmica e o programa que executa a base de consulta. Esta é uma sugestão para possíveis aplicações no ambiente de produção de sistemas análogos ao proposto neste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **DyLiacco, T.E.** - *Real Time Computer Control of Power Systems*, Proceedings of the IEEE, Vol.62, N0.7, July 1974.
- [2] **Wu, F.F.** - *Real Time Network Security Monitoring, Assessment and Optimization*, Electrical Power & Energy Systems, Vol.10, No.2, April 1988.
- [3] **Stadlin, W.O.; Wasley R.G.** - *Network Applications in Energy Management Systems*, Proceedings of the IEEE January 1991.
- [4] **Glavitsch, H.** - *Security and Optimization in Power Systems*, IFAC Power Systems Modelling and Control Applications, Brussels, Belgium 1988.
- [5] **DyLiacco, T.E.** - *The Adaptive Reliability Control System*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.PAS-86, No.5, pp.517-531, May 1967.
- [6] **Schaffer, G.** - *User Oriented Software in Energy Management Systems*, Electrical Power & Energy Systems, Vol.10, No.2, April 1988.
- [7] **Feigenbaum, E.A.; Barr, A.; Cohen, P.R.** - *The Handbook of Artificial Intelligence*, Vol.1 a 4, Addison Wesley Publishing Company, 1982.
- [8] **Waterman, D.A.** - *A Guide to Expert Systems*, Addison Wesley Publishing Company, 1986.
- [9] **Lucas, P.; Van Der Gaag, L.** - *Principles of Expert Systems*, Addison Wesley Publishing Company, 1991.
- [10] **Dillon, T.S.; Laughton, M.A.** - *Expert System Applications to Power Systems*, Prentice Hall Internacional Series in Power System Computation, 1990.
- [11] **Weedy, B.M.** - *Sistemas Eléctricos do Potência*, Editora da Universidade de São Paulo, 1973.
- [12] **Elgerd, O.I.** - *Introdução a Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*, MacGraw-Hill, 1977.

- [13] **Miller, T.J.E.** - *Reactive Power Control in Electric Systems*, Editora A Wiley Interscience Publication, 1982.
- [14] **Ramos, D.S.; Dias, E.M.** - *Sistemas Eléctricos de Potência - Regime Permanente*, Vol.1 e 2, Editora Guanabara Dois S.A., 1983.
- [15] **Expósito, A.G.; Ramos, J.L.M.; Macías, J.L.M.; Salinas, Y.C.** - *Sensitivity Based Reactive Power Control for Voltage Profile*, IEEE/Power Engineering Society, 92 SM 538-9 PWRS, July 1992
- [16] **Kirschen, D.S.; Van Meeteren, H.P.** - *MW/Voltage Control in Linear Programming Based Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.2, pp.481-489, May 1988.
- [17] **Chang, S.K.; Marks, G.E.; Kato, K.** - *Optimal Real Time Voltage Control*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.3, August, 1990.
- [18] **Mamandur, K.R.C.** - *Emergency Adjustments to VAR Control Variables to Alleviate Over-Voltage, Under-Voltage and Generator VAR Limit Violations*; IEEE Transactions on Power Apparatus, Vol.PAS-101, No.5, pp.1040-1047, May 1982.
- [19] **Liu, C.C.; Tomsovic, K.** - *An Expert System Assisting Decision-Making of Reactive Power/Voltage Control*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.PWRS-1, No.3, pp.195-201, August 1986.
- [20] **Cheng, S.J.; Malik, O.P.; Hope, G.S.** - *An Expert System for Voltage and Reactive Power Control of a Power System*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.PWRS-3, No.4, pp.1449-1455, November 1988.
- [21] **Yokoyama, R.; Matsumoto, T.; Niimura, T.; Ueki, Y.** - *An Expert System for Interactive Operation Guidance in Power System Emergency Control*, Second Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Seattle-USA, July 1989.
- [22] **Godart, T.F.; Puttgen, H.B.** - *A Reactive Path Concept Applied within a Voltage Control Expert System*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No.2, pp.787-793, May 1991.
- [23] **Hsu, Y.Y.; Ho, K.L.; Liang, C.C.; Lai, T.S.** - *Voltage Control Using a Combined Integer Linear Programming and Rule Based Approach*, IEEE Transactions on Power Systems, 1992.
- [24] **Monticelli, A.J.** - *Fluxo de Carga em Redes de Energia Eléctrica*, Editora Edgard Blucher, 1983.
- [25] **Tinney, W.F.; Hart, C.E.** - *Power Flow Solution By Newton's Method*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-86, No.11, pp.1446-1460, November 1967.

- [26] **Morozowski Filho, M.** - *Matrizes Esparsas em Redes de Potência: Técnicas de Operação*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1981.
- [27] **Nilsson, N.J.** - *Principles of Artificial Intelligence*, Tioga Publishing Company, 1980.
- [28] **Winston, P.H.** - *Inteligência Artificial*, Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 1988.
- [29] **Hayes, F.; Waterman, D.A.; Lenat, Douglas B.** - *Building Expert Systems*, Addison Wesley Publishing Company, Canada, 1983.
- [30] **Weiss, Sholon M.; Kulikowski, Casimir A.** - *Guia Prático para Projetar Sistemas Especialistas*, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1988.
- [31] **Chorafaz, D.N.** - *Sistemas Especialistas: Aplicações Comerciais*, McGraw-Hill, 1988.
- [32] **Hope, G.S.; Malik, O.P.; Zhang, Z.Z.** - *Expert Systems in Electric Power Systems - A Bibliographical Survey*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.4, October 1989.
- [33] **Sakaguchi, T.; Tanaka, H.; Uenishi, K.; Gotoh, T.; Sekine, Y.** - *Prospects of Expert Systems in Power System Operation*, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.10, No.2, pp.71-82, April 1988.
- [34] **Bretthaver, G.; Handschin, E.; Hoffmann, W.** - *Expert System Applications to Power Systems - State of the Art and Future Trends*, IFAC Symposium on Control of Power Plants and Power Systems, Munich, Fed. Rep. of Germany, March 1992.
- [35] **Tamura, T.** - *Expert System for System Analysis and Techiques, Results of a Questionnaire on the present status and the Perspective of Expert System on Power System*, CIGRE SC 38 TF07, 1988.
- [36] **Wagner, W.R.; Keyhani, A.; Hao, S.; Wong, T.C.** - *A Rule Based Approach to Decentralized Voltage Control*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5, No.2, pp.643-651, May 1990.
- [37] **Lai, K.C.; Lee, W.J.; Chen, M.S.** - *Design of a Microcomputer Based Operator Assistance System for Real Time and Reactive Power Correction*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No.2, May 1991.
- [38] **Freris, L.L.; Sassom, A.M.** - *Investigation of the Load-Flow Problem*, Proc. IEE, Vol.115, No.10, October 1968.
- [39] **Feigenbaum, A.E.** - *Knowledge Processing: From File Servers to Knowledge Servers*, "Applications of Expert Systems" Vol.2, J.Ross Quinlan, Addison Wesley Publishing Company, 1989.

- [40] **Doi,A.; Uemura,K.** - *Knowledge-Based Operation Guidance Method for Voltage and Reactive Power in Power Systems*, IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, RJ-Brasil, pp.393-398, July 1985.
- [41] **Fujiwara,R.; Sakaguchi,T.; Kohno,Y.; Suzuki,H.** - *An Intelligent Load Flow Engine For Power System Planning*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.PWRS-1, No.3, pp.302-307, August 1986.
- [42] **Tamura,Y.; Sasaki,H.** - *Expert System Applied to Voltage & Var Control - Final Report*, ÉLECTRA, No.139, December 1991.
- [43] **Wilhelmsson,K.; Andersson,G.** - *Reactive Power and Voltage Control a Knowledge-Based Approach*, Second Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Seattle-USA, July 1989.
- [44] **Peng,T.M.; Hsu,J.C.; Karady,G.G.** - *An Expert System for Voltage Control Integrated with Existing Software Environment*, Second Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Seattle-USA, July 1989.
- [45] **Vadari,S.V.; Tyson,F.D.; Venkata,S.S.** - *The Issues of Languages Versus Shells for Expert Systems Applications to Power Systems*, Second Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Seattle-USA, July 1989.
- [46] **Peng,T.M.; Karady,G.G.; Ranaweera,D.K.** - *A knowledge Based Model for the Study of Power System Steady-State Operation*, Electric Power System Research, Vol.21, pp.231-239, February 1991.
- [47] **Ramsay,B.; Zitouni,S.; Moffatt,A.; Moyes,I.** - *A PC - Based Expert System Assistant for Power System Operational Control*, Electric Power Systems Research, Vol.22, pp.1-6, 1991.

Apêndice a

Relação entre Tensão e Potência Reativa

Em [14] [13], encontram-se os conceitos básicos e as equações que relacionam a tensão (V), a potência reativa (Q) e o ângulo de transmissão (δ). Através de um simples circuito de transmissão apresentado na figura a, os conceitos básicos são definidos. Desconsiderando a reatância capacitiva shunt da linha, tem-se que a queda de tensão é representada por:

$$S_{ik} = P_{ik} + jQ_{ik} = E_i I_{ik}^*$$

$$I_{ik} = \frac{E_i - E_k}{R + jX}$$

Se considerarmos que à medida que crescem os níveis de transmissão, a relação R/X diminui, temos $R \ll X$. Logo

$$S_{ik} = E_i \left(\frac{E_i^* - E_k^*}{-jX} \right) = \frac{V_i^2 - V_i V_k (\cos\delta + j \operatorname{sen}\delta)}{-jX}$$

$$S_{ik} = \frac{1}{X} [V_i V_k \operatorname{sen}\delta + j(V_i^2 - V_i V_k \cos\delta)]$$

Separando em suas partes real e imaginária:

$$P_{ik} = \frac{V_i V_k}{X} \operatorname{sen}\delta$$

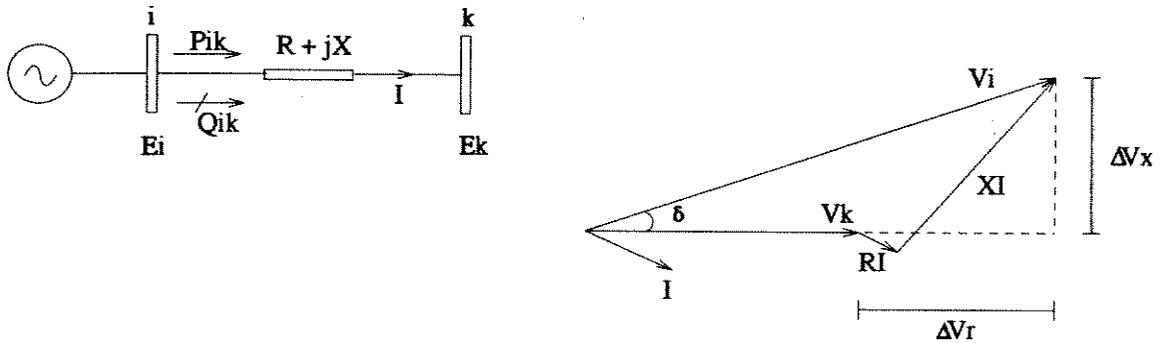


Figura a.1: Queda de tensão nas linhas

$$\delta = \text{sen}^{-1} \frac{P_{ik} X}{V_i V_k} \quad (\text{a.1})$$

Na prática, é usual ter-se pequenos valores de δ (ângulo de transmissão) em sistemas de transmissão. Portanto $\cos \delta \cong 1$.

$$Q_{ik} = \frac{V_i}{X} (V_i - V_k \cos \delta)$$

$$V_i - V_k = \frac{Q_{ik} X}{V_i} \quad (\text{a.2})$$

Pelas relações das equações (a.1) e (a.2), os fluxos ativo e reativo podem ser analisados de modo independente.

$$\Delta V_x \propto P \quad \text{e} \quad \Delta V_r \propto Q$$

A equação (a.2) permite verificar que o fluxo de potência reativa na linha será determinado pela diferença de tensão entre seus terminais, sendo a direção do fluxo de potência reativa, a barra com maior valor de tensão para o de menor em módulo. Além disso, sempre que em uma barra tiver deficiência de reativo, esta deverá ser fornecida pelas linhas que incidem na barra, e desta forma a tensão deverá diminuir. Por outro lado, quando em uma barra houver excesso de reativo, a tensão deverá aumentar.

O fato é que a queda de tensão nas linhas de transmissão são determinadas basicamente pelo fluxo de reativo, confirmando que deve-se evitar o transporte desnecessário de potência reativa.

Apêndice b

Processo de Correção na Variável de Controle

Este processo de correção é efetuado por regras implícitas que fazem o uso de um modelo de sensibilidade da rede elétrica. Considerando-se uma barra de carga i com problema de tensão, temos:

$$V_{(i)}^{(0)} < \underline{V}_{(i)} \text{ ou } V_{(i)}^{(0)} > \overline{V}_{(i)}$$

onde:

$V_{(i)}^{(0)}$ - tensão inicial da barra i ;

$\underline{V}_{(i)}, \overline{V}_{(i)}$ - limite inferior e superior de tensão da barra i .

Controlador Primário

O desvio de tensão para corrigir a violação pode ser calculada por:

$$\Delta V_{(i)}^{(0)} = V_{(i)}^{lim} - V_{(i)}^{(0)} \quad (\text{b.1})$$

$$\Delta V_{(k)} = \frac{\Delta V_{(i)}^{(0)}}{S_{(ik)}} \quad (\text{b.2})$$

onde:

$V_{(i)}^{lim}$ - limite inferior ou superior de tensão da barra de carga i ;

$\Delta V_{(i)}^{(0)}$ - desvio de tensão inicial da barra de carga i ;

$\Delta V_{(k)}^{(0)}$ - desvio de tensão inicial calculado para variável de controle da barra k;

$S_{(ik)}$ - valor de sensibilidade entre à violação de tensão da barra i e a variável de controle da barra k.

Após calcular o desvio de tensão, é verificado se a tensão do controlador primário encontra-se dentro dos seus limites:

$$V_{(k)}^{(0)} + \Delta V_{(k)} < \underline{V}_{(k)} \quad \text{ou}$$

$$V_{(k)}^{(0)} + \Delta V_{(k)} > \overline{V}_{(k)}$$

onde:

$V_{(k)}^{(0)}$ - tensão inicial da barra de controle k;

$\underline{V}_{(k)}, \overline{V}_{(k)}$ - limite inferior e superior da barra de controle k.

Controlador Secundário

No caso do desvio de tensão calculado $\Delta V_{(k)}^{(0)}$ implicar em violação dos limites do controlador primário, faça:

$$V_{(k)}^{(1)} = V_{(k)}^{lim}$$

ou seja:

$$V_{(k)}^{(0)} + \Delta V_{(k)}^{(0)} = V_{(k)}^{lim}$$

Encontre o valor de tensão da barra de carga i $V_{(i)}^{(1)}$ correspondente a ação de controle $\Delta V_{(k)}^{(0)}$ através da matriz de sensibilidade:

$$\Delta V_{(i)}^{(0)} = S_{(ik)} * \Delta V_{(k)}^{(0)}$$

$$V_{(i)}^{(1)} = V_{(i)}^{(0)} + \Delta V_{(i)}^{(0)}$$

O restante da violação da barra i $\Delta V_{(i)}^{(1)}$ será corrigida pelo controlador secundário de maneira similar ao processo de correção do controlador primário.