



**XV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GOP / 16

**17 a 22 de Outubro de 1999
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil**

**GRUPO IX
OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GOP)**

**CAT - CONTROLE AUTOMÁTICO DE TENSÃO -
PACOTE COMPUTACIONAL PARA CONTROLE SISTÊMICO DE TENSÃO
NO SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE DISTRIBUÍDO DA CEMIG**

Maria Inês Murta Vale*
Marcelo Soares Lameiras

Maria Helena Murta Vale
Marco Polo B. Junqueira Jr.
Frederico Gualberto C. Coelho

CEMIG

Companhia Energética de Minas Gerais

UFMG

Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar a atuação do pacote computacional denominado **CAT, Controle Automático de Tensão**, no controle de tensão da Malha Principal do sistema elétrico da CEMIG. Tal aplicativo, desenvolvido em projeto cooperativo entre a CEMIG e a UFMG, se encontra integrado ao *Sistema de Supervisão e Controle Distribuído* da empresa, visando aumentar o desempenho do sistema, sob o ponto de vista operativo, além de aliviar o volume de atividades exercidas pelos operadores. Neste artigo, são apresentadas as suas principais características e a sua efetiva aplicação na operação do sistema elétrico.

PALAVRAS-CHAVE

Operação - Tempo Real - Controle de Tensão

1.0 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de estratégias para Controle de Tensão / Potência Reativa dos *Sistemas de Energia Elétrica (SEE)* tem sido objeto de intensa investigação por parte da comunidade envolvida com o setor elétrico. Isto se justifica por diversas razões, dentre elas podem ser citados a crescente complexidade relativa ao controle dos SEE (decorrente da sua operação próxima a limites) e o maior interesse em melhor aproveitar os recursos disponíveis no sistema.

A revisão bibliográfica, descrita nos documentos (1) e (2), mostra que a literatura técnica apresenta vários trabalhos sobre o tema, em diversas áreas, incluindo desenvolvimentos relativos às etapas de planejamento

da expansão, de planejamento da operação e da operação em tempo real, dentre outras. Parte dos trabalhos se dedica à apresentação do uso de técnicas computacionais e matemáticas para a solução da questão de controle. Outros textos tratam mais especificamente dos equipamentos envolvidos no controle. Especial atenção tem sido dada aos estudos sobre o tema estabilidade de tensão.

No entanto, apesar do grande número de trabalhos que vêm sendo publicados, poucos são aqueles que apresentam resultados práticos na solução de problemas reais de controle (3, 4, 5).

As equipes da UFMG e da CEMIG vêm atuando na elaboração de estratégias que tratam do Controle de Tensão / Potência Reativa de forma integrada, englobando as diversas etapas envolvidas na operação. Dentro deste contexto mais amplo, dando início à solução de questões relativas à operação em tempo real, verificou-se a necessidade de se desenvolver uma ferramenta computacional que automatizasse o controle de tensão efetuado no *COS (Centro de Operação do Sistema)* da empresa. Sendo assim, foi desenvolvido o pacote computacional **CAT - Controle Automático de Tensão** - apresentado neste trabalho.

O **CAT** foi projetado para efetuar o controle de tensão no *estado normal de operação* do SEE, estando atualmente aplicado na Malha Principal da CEMIG. Executado em tempo real, retira dos despachantes do COS a tarefa de efetuar um grande volume de ações de controle. No seu atual estágio de desenvolvimento, o aplicativo já se encontra integrado ao **SSCD (Sistema de Supervisão e Controle Distribuído)** da CEMIG.

Neste texto, a seguir, são detalhadas a filosofia, as principais características e a aplicação do *CAT*. Com o propósito de melhor caracterizar o aplicativo, optou-se por introduzi-lo através de uma seção contendo sua descrição básica global, porém sucinta, para posterior detalhamento de suas propriedades. Isto possibilita a compreensão do pacote computacional de forma detalhada, sem perder a visão global do controle.

2.0 – FILOSOFIA DO *CAT*- DESCRIÇÃO GERAL

O objetivo principal do *CAT* é monitorar os níveis de tensão em barramentos de controle e efetuar ações corretivas, quando necessárias, para manter as tensões dentro das faixas permitidas. Suas tarefas são realizadas na operação em tempo real do SEE e sua estratégia compreende um conjunto de ações de controle baseadas na filosofia de operação da empresa. Segundo tal filosofia, cabe ao COS a responsabilidade pela coordenação, supervisão, controle e operação da Malha Principal do SEE.

A idéia básica do *CAT* consiste na concepção de um *controlador virtual*, para cada *barramento de controle*. A cada barramento, estão associados *equipamentos de controle*. A tomada de decisão, por parte do aplicativo, sobre qual ação deve ser efetuada, baseia-se em um *algoritmo de controle*, identificado nos itens seguintes. Após processar tal algoritmo, sempre verificando as condições de tempo real do SEE, o *CAT* envia comandos para os equipamentos que estiverem associados aos barramentos.

O aplicativo pode atuar nos seguintes equipamentos: Transformadores, Geradores, Compensadores Síncronos e Estáticos, Bancos de Capacitores e Reatores. Para os dispositivos que não são controlados remotamente pelo COS, são gerados *alarmes* indicando aos despachantes a ação a ser executada para se controlar a tensão.

O *CAT* atua de forma a manter o valor da tensão atual, dos barramentos sob controle, no nível próximo a um valor denominado *Tensão Desejada*, a seguir definido. Para cumprir este objetivo, o *software* "percorre" os barramentos a serem controlados pelo *CAT*, segundo uma seqüência ditada pela prioridade dos mesmos. Em outras palavras, os barramentos de mais alta prioridade são verificados primeiro. O mesmo ocorre com os equipamentos pertencentes a cada barramento, os quais, também, se encontram ordenados segundo prioridades.

Aos barramentos de controle e aos equipamentos estão associados *parâmetros* que norteiam o controle em malha fechada. Aos barramentos, estão associados a

prioridade de atuação do *CAT*, a faixa de tensão recomendada, o intervalo de tempo entre duas atuações, o número máximo de atuações sem resposta, o erro de tensão aceitável entre a tensão desejada e a tensão real etc. Com respeito à atuação nos equipamentos de controle de um barramento, esta é feita de acordo com a prioridade e as restrições dos mesmos (limites operativos, número máximo de atuações diárias, intervalo de tempo entre duas atuações e sensibilidade kV/controle).

O desempenho do *CAT* é analisado através do *Registro Gráfico*, que compara a tensão desejada com a tensão real nos últimos 30 minutos, e também através do *Registro Histórico* dos valores da tensão real nos barramentos e das suas faixas recomendadas, nos últimos anos.

2.1 Cálculo da tensão desejada

Para o cálculo do valor da tensão desejada, o programa utiliza a seguinte expressão (6):

$$kV_{des} = kV_{mín} + (kV_{máx} - kV_{mín}) * REQ_{atual} / REQ_{máx}$$

onde:

- $kV_{mín}$ e $kV_{máx}$ são os limites de tensão para o barramento, de acordo com o regime de carga (leve, médio, pesado);
- REQ_{atual} e $REQ_{máx}$ são os requisitos de carga atual e máximo da região na qual o barramento está inserido.

Este cálculo é feito a cada 4 segundos, para todos os barramentos cujo modo de operação está no AUTOMÁTICO, procurando-se acompanhar as variações de carga que ocorrem durante o dia.

Para o regime de CARGA PESADA, existe a seguinte particularidade: quando o valor do requisito de carga ficar acima de uma percentagem (delta) do valor de requisito máximo de carga, ou seja,

$$REQ_{atual} \geq \text{delta} * REQ_{máx}$$

a tensão desejada passa a ser igual ao valor superior da faixa recomendada de tensão.

A *Tensão Desejada* pode ser simulada pelo despachante via IHM. Neste caso, o *CAT* não fará mais o cálculo, até que a simulação seja retirada. É sempre verificado se uma *tensão desejada simulada* encontra-se dentro da faixa permitida de tensão.

Os barramentos não controlados por Requisito de Carga e sim por Horário, também poderão ter seus níveis de tensão controlados pelo *CAT*. Neste caso,

deverão ter, **obrigatoriamente**, o valor da *tensão desejada simulada*.

3.0 – INTEGRAÇÃO DO CAT AO SSCD

3.1 Características do SSCD

O SSCD, apresentado na referência (7), supervisiona e controla a Malha Principal do sistema eletro-energético da CEMIG e as interligações da empresa com as demais companhias de energia elétrica do Sul-Sudeste do Brasil. Incorpora modernas técnicas para controle de processos: utiliza arquitetura distribuída, baseada em redes computacionais de alto desempenho; implementa arquitetura de *software* cliente-servidor, possibilitando a comunicação entre processos nos diversos nós da rede; sua interface *Homem-Máquina* é totalmente gráfica e extremamente amigável aos despachantes; possui um gerenciador de *Banco de Dados*, que garante a integridade e facilidade de manipulação de dados (dados telemetidos do sistema elétrico, dados oriundos de vários órgãos da empresa e de outras concessionárias, dados gerados por aplicativos etc.); oferece uma linguagem *SQL*, de consulta padronizada, que permite total conectividade e integração com os demais sistemas de informação corporativos da empresa.

3.2 Identificação dos pontos de integração do CAT ao SSCD

Conforme pode ser visto, através da Figura 1, a integração do *software* do CAT ao SSCD se dá através dos seguintes pontos:

- Base de Dados de Tempo Real (BDTR), para obter e armazenar os dados de tempo crítico de utilização (valores de tensão calculados ou simulados, grandezas telemetidas dos equipamentos etc.);
- Banco de Dados Relacional (BDR), para coletar e armazenar os dados de tempo menos crítico de acesso (parâmetros dos barramentos e equipamentos, requisitos de carga, por exemplo);
- Interface Homem Máquina (IHM), para trocar informações com o despachante;
- Gerenciador de Mensagens (GM), responsável por enviar ao operador, via *IHM*, as mensagens geradas durante a execução do programa e as operações feitas pelo despachante;
- Gerenciador de Controle (GC), através do qual serão enviados pedidos para que sejam efetuadas ações de controle;

- Servidor de Tensão (ST), para obter valores de tensão real dos barramentos, limites mínimo e máximo permitidos de tensão e requisitos atuais e máximos das regiões da empresa.

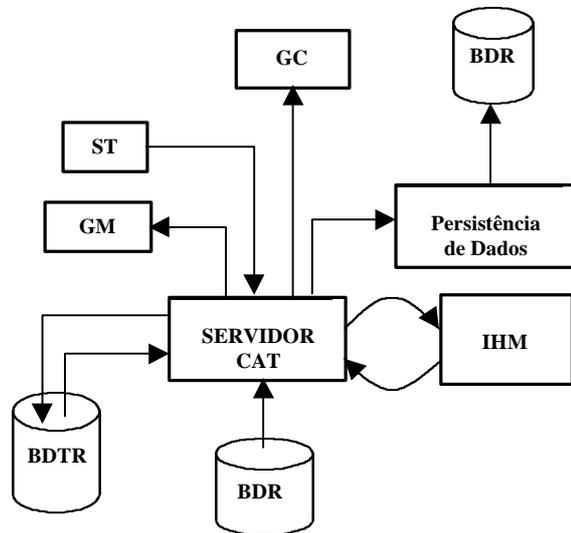


FIGURA 1
Integração do CAT ao SSCD

Na descrição dos próximos itens, pode-se perceber como toda esta integração atua, de forma a possibilitar o controle de tensão em tempo real, dentro dos padrões de qualidade dos aplicativos implantados no SSCD.

4.0 – O PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO

4.1 A interface homem-máquina

A *IHM*, componente fundamental para o controle da atuação do aplicativo, deve ser bem caracterizada, para dar subsídio à descrição da seqüência de ações do *CAT*.

Convém salientar que, para cada estação (subestação ou usina), podem existir um ou mais barramentos de controle, para um mesmo nível de tensão. A estes barramentos é associada uma prioridade. Aquele que possui prioridade 1 é eleito para ser o barramento que será usado no monitoramento e no controle do **nível de tensão** da estação.

Através do Menu Principal do SSCD, mostrado na Figura 2, o despachante do COS tem acesso à *Interface Homem-Máquina* (*IHM*) do aplicativo.

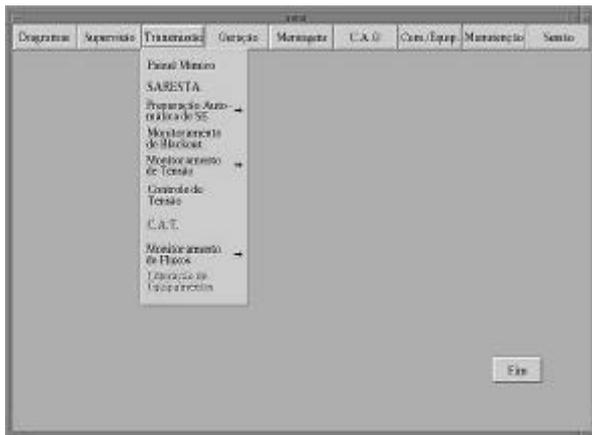


FIGURA 2
Menu principal do SSCD

Chamando-se a função **CAT**, é apresentada a tela ilustrada na Figura 3.

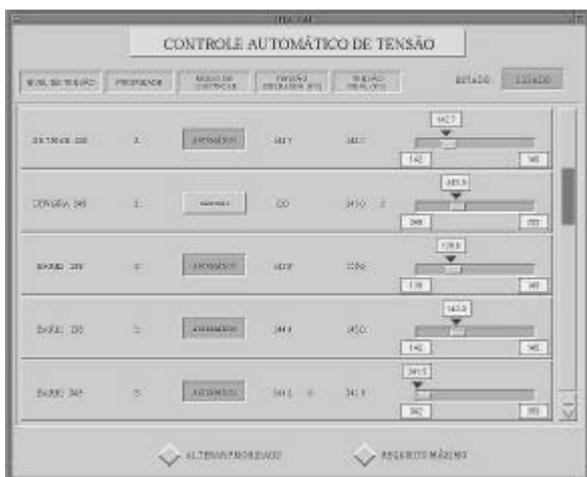


FIGURA 3
Tela principal do CAT

Nesta Tela Principal do CAT, encontram-se informações sobre o **estado** (ligado/desligado) do aplicativo e sobre os **níveis de tensão** (prioridade, modo de controle, tensão desejada, tensão real etc.) das estações controladas.

Por meio desta, o despachante monitora a tensão real, com relação à faixa recomendada dos níveis de tensão cadastrados, bem como interage com o *software*. Esta **interação** permite ao despachante:

- Ligar/desligar o aplicativo;
- Colocar cada nível de tensão, individualmente, em modo de controle automático/manual;
- Simular a tensão desejada;

- Alterar a prioridade de processamento dos níveis de tensão;
- Atualizar os requisitos máximos de carga, para cada região de monitoramento de tensão da empresa.

Ao se selecionar o nome do **nível de tensão**, é apresentada uma outra tela, denominada Tela Secundária do CAT, contendo informações específicas sobre o nível escolhido, conforme pode ser visto no exemplo mostrado na Figura 4 (ao final do documento).

Utilizando esta tela, o despachante pode controlar a atuação do **CAT**, da seguinte forma:

- Disponibilizar/indisponibilizar um equipamento para o controle automático;
- Alterar parâmetros do nível e dos equipamentos associados.

Um gráfico dinâmico apresenta os valores de tensão real e tensão desejada para o nível de tensão, nos últimos 30 minutos, bem como os limites da faixa de tensão recomendada, com atualização a cada 4 segundos. O tanque vertical indica os valores dos limites operativos máximo e mínimo do nível de tensão e o valor de tensão real.

Através desta tela, pode-se visualizar informações sobre a **atuação do CAT** no nível de tensão e seus equipamentos. Indicações sobre a **última atuação** do controle e sobre o **número de atuações** realizadas, por dia, estão disponíveis.

Informações de **tempo real** dos equipamentos são também obtidas, tais como a indicação do **estado atual** e dos **limites operativos** das grandezas dos equipamentos que estão sendo atuados pelo **CAT**.

Nesta tela, encontram-se, também, **parâmetros** relativos aos níveis de tensão e aos equipamentos associados, os quais podem ser alterados a qualquer momento.

Alguns parâmetros são usados para garantir a **eficiência** do controle automático, como, por exemplo, o **N. Máximo de Ações sem Resposta** e o **Erro Máximo de Tensão**. Outros garantem requisitos de **segurança**, tais como, não permitir um número excessivo de atuações em um mesmo equipamento (**Limite de Atuações**), garantir um intervalo mínimo entre duas atuações em um equipamento (**Temporização do Equipamento**), não executar controle automático quando ocorre um distúrbio no sistema elétrico (**Desvio de Tensão** máximo permitido entre duas leituras consecutivas da tensão real) etc.

4.2 Ativação/desativação do CAT

Ao ser iniciado o aplicativo, o CAT sempre estará no estado DESLIGADO. Cabe ao despachante ativar o controle automático de tensão.

Uma vez LIGADO, o CAT monitora, determina a tensão desejada e controla os níveis de tensão que estejam no *MODO DE CONTROLE* em AUTOMÁTICO, quando sua tensão estiver nas seguintes condições:

- O valor da tensão real, em relação ao valor da tensão desejada, estiver fora de uma faixa de tensão em torno da tensão desejada, definida pela *Banda Morta Interna*;
- O valor da tensão real estiver fora da faixa recomendada, mesmo que a *Banda Morta Interna* não tenha sido violada.

Para os níveis que estiverem no *MODO DE CONTROLE* em MANUAL, haverá apenas a supervisão da tensão real, com relação à faixa recomendada e aos limites operativos.

O despachante poderá desativar o CAT, a qualquer momento. O próprio aplicativo poderá desligar a si mesmo, nas seguintes situações:

- Falha na comunicação com o *Servidor de Tensão*;
- Falha na comunicação com o *Gerenciador de Controle*;
- Falha no cálculo do *Requisito de Carga Atual* das regiões da empresa.

4.3 Alteração do modo de operação dos níveis e do estado dos equipamentos

Conforme salientado anteriormente, há dois estados permitidos para os *níveis*: AUTOMÁTICO ou MANUAL. O modo *automático* indica que o nível está habilitado para o controle automático. Já o modo *manual* inibe qualquer ação por parte do CAT.

Apenas o despachante poderá alterar o modo de controle do nível de MANUAL para AUTOMÁTICO. Por outro lado, tanto o despachante como o CAT podem alterar o modo de AUTOMÁTICO para MANUAL. O CAT passará o modo de controle do nível para MANUAL em determinadas situações como, por exemplo:

- Valor da tensão real não confiável (falha de telemedição);
- Controle não efetivo, tensão real não está acompanhando a tensão desejada;

- Nenhum equipamento disponível;
- Falha no acesso à *Base de Dados de Tempo Real* do SSCD.

Com respeito aos *equipamentos*, estes possuem dois estados permitidos: DISPONÍVEL ou INDISPONÍVEL. Apenas o despachante poderá alterar o estado do equipamento de INDISPONÍVEL para DISPONÍVEL. Mas, tanto o despachante como o CAT podem alterar o estado do equipamento de DISPONÍVEL para INDISPONÍVEL. O CAT passará o dispositivo para INDISPONÍVEL, nas seguintes situações:

- Grandeza controlada do equipamento com estado/valor não confiável (falha de telemedição);
- Limite máximo de atuação diária no equipamento atingido;
- Falha no envio da ação de controle para o equipamento;
- Falha no acesso à *Base de Dados de Tempo Real* do SSCD.

4.4 Tipos de controle

Nem todos os equipamentos envolvidos no controle de tensão da empresa são remotamente controlados pelo COS, não podendo ser, portanto, automaticamente atuados pelo CAT. Para estes casos, foi incluído no aplicativo o controle do tipo ALARME, indicando a necessidade de ação local.

Dependendo do tipo de controle (automático ou alarme) o CAT interage no SSCD das seguintes formas:

- Com o *Gerenciador de Controle*, informando o equipamento e o número de pulsos (gerador, compensador estático, compensador síncrono) ou o número de *taps* a reduzir/aumentar (transformadores) ou comando de abrir/fechar (banco de capacitores e reatores);
- Com o *Gerenciador de Mensagens*, enviando um alarme indicando a ação recomendada, como, por exemplo:

“BARR1 CS01 MVAR executar controle para reduzir”

"BARB2 CAP_C1_27F4 AF executar controle para abrir".

Desta forma, o aplicativo, além de efetuar o controle automático, orienta o despachante na atuação dos equipamentos que ainda não são remotamente controlados.

5.0 - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a aplicação do pacote para Controle Automático de Tensão, denominado **CAT**, cujo objetivo é aumentar o desempenho do sistema e aliviar o volume de ações de controle por parte dos despachantes do COS. A filosofia básica do aplicativo, sua integração ao SSCD da CEMIG, bem como o processo de tomada de decisão desenvolvido, foram descritos em detalhes.

O **CAT** é o resultado de projeto conjunto entre a CEMIG e a UFMG, e constitui-se em um grande avanço para a operação em tempo real dos SEE. Apesar de estar atualmente implantado no SSCD da empresa, a metodologia utilizada no seu projeto, onde os detalhes relativos às particularidades do sistema elétrico são modelados externamente, permite que o **CAT** seja utilizado em outros centros de controle, não ficando restrito ao COS da CEMIG.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) SILVEIRA, M.F. Controle de Tensão - Proposta de Estratégia Global. (Tese de Mestrado Cpdee/UFMG). Belo Horizonte. 1999.
- (2) CARDOSO, R.M. Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência - Estudo de

Ferramentas Computacionais. (Tese de Mestrado Cpdee/UFMG). Belo Horizonte. 1999.

- (3) SOMAN, S.A. et al. Curtailed Number and Reduced Controller Movement Optimization Algorithms for Real Time Voltage/Reactive Power Control. (IEEE Transactions on Power Systems). vol.9. no.4. pp. 2035-2031. Nov.1994.
- (4) RAMOS, J.L. et al. A Hybrid Tool to Assist the Operator in Reactive Power/Voltage Control and Optimization. (IEEE Transactions on Power Systems). vol.10. no.2. May 1995.
- (5) LE, T.L. et al. Network Equivalents and Expert System Application for Voltage and VAr Control in Large-Scale Power Systems. (IEEE Transactions on Power Systems). vol.12. pp. 1440-1445. Nov. 1997.
- (6) LAMEIRAS, M.S., FONSECA, H.G., PONTELO, G.L., FERREIRA, D.G. Controle Automático de Tensão - Implantação de um *Software* para Controle Sistemico de Barramentos de EAT no Sistema de Supervisão e Controle Distribuído do COS da CEMIG. (III SIMPASE). Rio de Janeiro. 1996.
- (7) SILVA, M.V., VALE, M.I.M. O Sistema de Supervisão e Controle Distribuído da CEMIG. (VII ERLAC). Puerto Iguazú. Maio 1997.

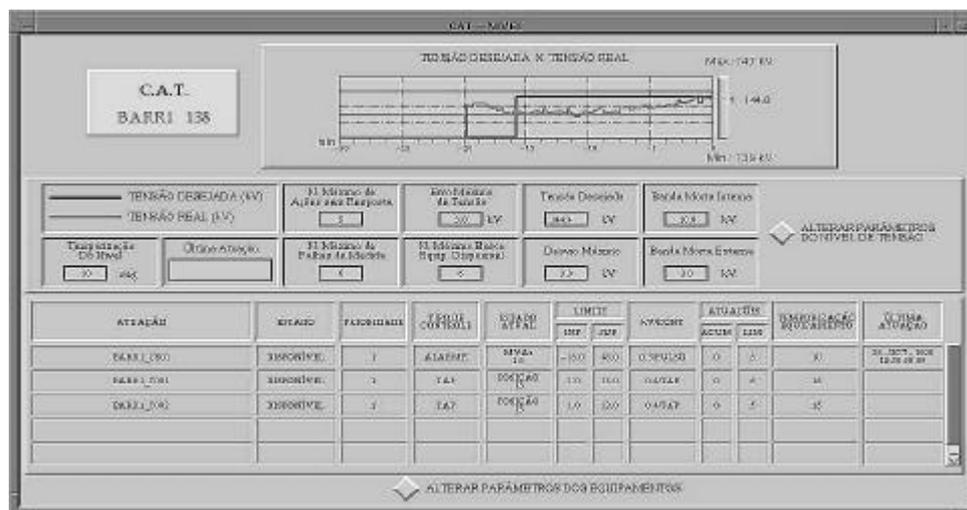


FIGURA 4
Tela secundária do **CAT**