



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GOP - 01
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO IX
GRUPO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP**

ASPECTOS DE PROJETOS VOLTADOS A FLEXIBILIZAÇÃO DE LIMITES OPERACIONAIS E MELHORIA DE DESEMPENHO DE INSTALAÇÕES DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Francisco Coelho de Abreu

Jonas Mendes de Souza Júnior

Mauro Amâncio Pinto*

CESP – Companhia Energética de São Paulo

RESUMO

Este trabalho apresenta avaliação, análise e estudo, para a exploração de valores numéricos, supervisionados, controlados e associados a parâmetros do sistema e das instalações, e que objetivam estabelecer níveis de confiabilidade e/ou suportabilidade operativa no sistema eletroenergético e hidráulico da CESP, largamente utilizado na época do último racionamento de energia no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE

Flexibilização, Limites operativo, Unidade geradora, Desempenho, Usinas, Curva colina e CUCAGE.

1.0 - INTRODUÇÃO

A prioridade num sistema elétrico de potência, é fazer com que o produto chegue aos consumidores, dentro dos padrões de qualidade aceitáveis. Para atender a esse pré-requisito, as empresas de energia elétrica do Brasil, tiveram que se adequar ao novo cenário surgido. Diante disto, a valorização de ganhos, resulta nas medidas operativas desenvolvidas.

Sabendo-se que o SIN, é predominantemente hidráulico, foi necessário aperfeiçoar a flexibilização dos limites operativos em unidades geradoras e reservatórios, para enfrentar a situação de baixos índices pluviométricos e conseqüente racionamento de energia ocorrido em 2002/2003. Essa flexibilização consiste em estender os limites operativos dos equipamentos para as proximidades dos limites de projeto, mantendo coeficientes de segurança menores, porém adequados à estabilidade das unidades geradoras e operativas do sistema.

Isto, levou a CESP a praticar um Despacho Otimizado de Unidades Geradoras (DOUG), flexibilizando os limites operativos de cada Máquina sincronizada. As usinas da CESP tiveram que, muitas vezes racionalizar ou até mesmo extrapolar as cotas de operação e navegação de seus reservatórios, onde as usinas Ilha Solteira e Três Irmãos com seus reservatórios interligados através do Canal de Pereira Barreto; Conforme Figura-1, alcançaram valores críticos no ano de 2001, comprometendo em parte a geração de energia e a navegação Tietê-Paraná. Com a aplicação do DOUG efetuando o desligamento de Unidades Geradoras de uma forma segura, houve um ganho de produtividade que contribuiu para a recuperação dos reservatórios, porém as unidades geradoras que permaneceram no sistema, trabalhavam com um valor mais significativo de absorção de potência reativa.



FIGURA-1 – Foto de satélite dos Reservatórios

O presente trabalho mostra as ferramentas utilizadas no Centro de Controle da Produção -CCP da CESP, para evitar violações de limites operativos de unidades geradoras, bem como o equacionamento do número mínimo de unidades geradoras que deviam permanecer sincronizadas ao sistema.

Para se conseguir os números e valores estipulados para cada Usina, foram realizados vários e exaustivos ensaios para cada modalidade e horário de carga do sistema.

A flexibilização de limites operativos em equipamentos e sistema constitui-se por várias ações, as quais têm o propósito de minimizar os efeitos das contingências, como também evitar condições operativas críticas.

As Usinas da CESP, principalmente a Usina Ilha Solteira, merece atenção especial em Tempo Real, para que o Despacho Otimizado, não venha afetar equipamentos ou até mesmo o sistema, pois, além de sua grande capacidade de potência instalada, executa um papel muito importante, no SIN, devido ao seu CAG (Controle Automático de Geração), corrigir 80% dos valores de desvios da Freqüência, ocorridos na área SUL/SUDESTE/CENTRO-OESTE. Outro papel importante desempenhado é o da absorção de reativo oriundo das linhas de transmissão do sistema de 440 KV da CTEEP, Conforme figura-2.

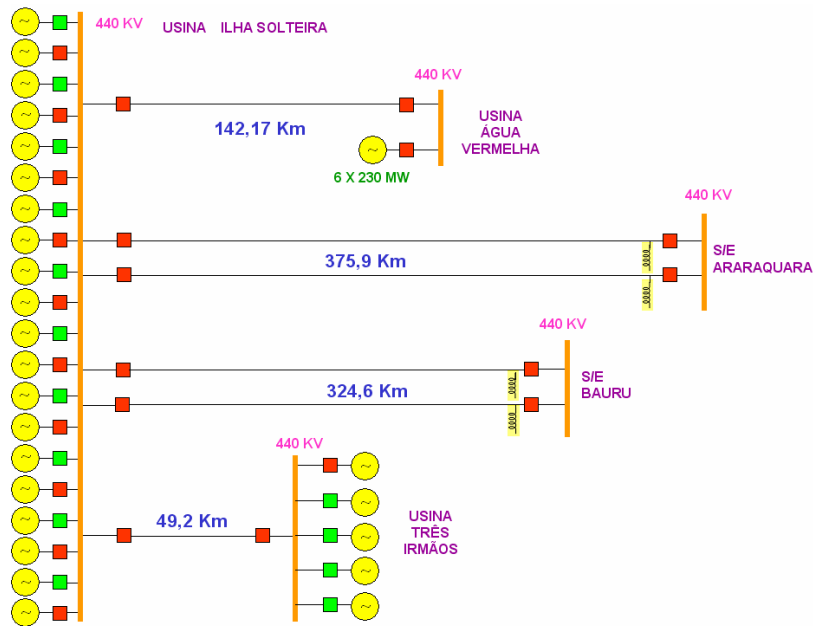


FIGURA-2 – Usina Ilha Solteira e suas linhas de interligações em 440KV

Com a implantação do DOUG e a necessidade de redução do número de unidades geradoras sincronizadas, foi necessário implantar um controle mais efetivo dos limites operativos, exigindo da Operação em Tempo Real, ações de remanejamento constante de geração entre as Usinas operadas pelo Centro de Controle de Produção (CCP) da CESP, buscando sempre a recuperação dos reservatórios com níveis mais baixos, analisando e controlando os valores de tensões nas barras para os períodos de carga mínima, leve, média e pesada. Para atendimento ao Despacho Otimizado por Unidade Geradora, foi utilizado um programa, desenvolvido na própria empresa denominado “**CUCAGE**” (Curva de Capabilidade do Gerador), e Curva de Colina de cada turbina, onde com o desligamento de Unidades Geradoras, as que permaneceram em operação passaram a trabalhar na sua faixa ótima na curva de colina, conforme figura-3, melhorando o rendimento e amenizando problemas de cavitação.

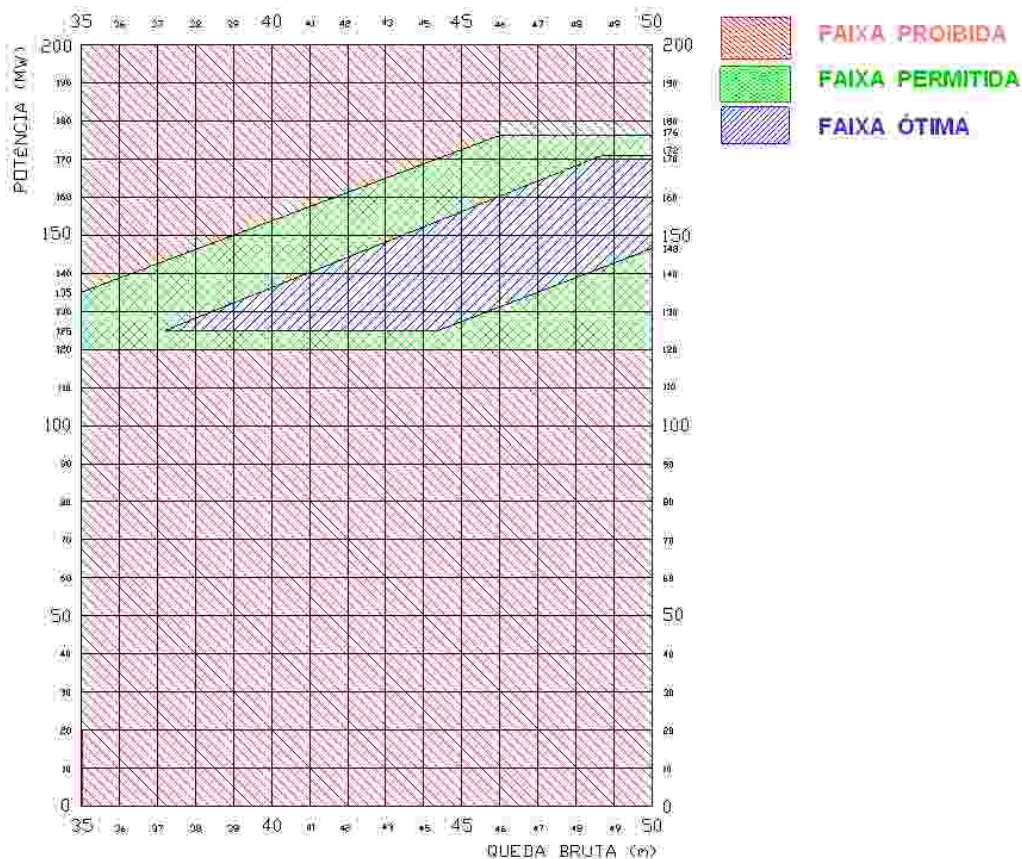


FIGURA-3 – Curva de Colina especificando as faixas operativas

Os agentes em conjunto com o ONS, realizaram estudos e análises hidrelétricas para a Otimização Energética, observando o número de unidades geradoras sincronizadas e preservando a confiabilidade e a segurança do sistema obedecendo aos critérios de que a operação elétrica é prioritária em relação à otimização energética de cada Usina. A contribuição dos agentes de geração foi estabelecida através do Despacho Ótimo por Unidade Geradora-DOUG.

Para atendimento ao DOUG, na CESP está sendo utilizado o programa “CUCAGE” e a Curva de Colina de cada turbina. Estas ferramentas proporcionaram os seguintes resultados:

- Definição e controle da Potência Reativa máxima a ser absorvida para cada unidade geradora, nos períodos de tensão e cargas críticas, em tempo real.
- Otimização do rendimento da turbina, diminuindo problemas de cavitação.
- Operação hidráulica otimizada na cascata, que envolvem as Usinas da CESP.
- Maior produtividade de energia (MW/m³/s), por metro cúbico de água turbinada.
- O resultado mais expressivo conseguido com a implantação da operação DOUG foi o ganho de produtividade dos reservatórios operado (%).

2.0 – PROGRAMA CUCAGE

O CUCAGE é um software desenvolvido pela CESP que permite obter a curva de capacidade do gerador, em função de seus parâmetros de projeto e assim, acompanhar o ponto de operação da unidade geradora, em tempo real.

2.1 Suporte Computacional

O programa foi escrito em TURBO-PASCAL versão 3.0, sob o sistema operacional MS-DOS versão 3.1, e é conversacional. A entrada de dados é via teclado e a saída prevista, em princípio, para o monitor de vídeo, entretanto poderá ter seus resultados impressos por recursos de DOS. Para tanto, deverá ser carregado o programa auxiliar "GRAPHICS.COM".

3.0 – ASPECTOS NECESSÁRIOS A COMPREENSÃO DAS CURVAS APRESENTADAS PELO PROGRAMA

Face à não existência de máquinas de pólos lisos na CESP, esta versão do programa contempla somente as máquinas de pólos salientes.

3.1 Considerações quanto às curvas plotadas e os dados obtidos

A corrente nominal da máquina é obtida através da fórmula $I = \frac{S_n}{(\sqrt{3}) \cdot V_n}$, onde S_n é a potência aparente nominal e V_n é a tensão nominal da máquina.

A potência mecânica é a especificada no projeto. A limitação imposta à curva pela potência mecânica somente será traçada para as condições nominais da máquina.

A corrente de excitação máxima é determinada em função dos dados de especificação da máquina e corresponde à corrente de campo nominal definida pela equação a seguir:

$$I = \frac{E_f}{R_f}, \text{ sendo } E_f = V_t + jX_d * I_{dn} + jX_q * I_{qn}$$

Onde:

- E_f = Tensão de campo nominal
- R_f = Resistência do campo
- V_t = Tensão terminal da máquina
- X_d = Reatância síncrona de eixo direto
- X_q = Reatância síncrona de eixo em quadratura
- I_{dn} = Corrente nominal de eixo direto
- I_{qn} = Corrente nominal de eixo em quadratura

A excitação mínima corresponde à corrente de campo nula é definida como sendo a área interna a circunferência cujo diâmetro é obtido através da fórmula:

$$D_{exm} = \frac{V_t^2}{X_q} - \frac{V_t^2}{X_d}$$

Entretanto como a maioria das máquinas não admite corrente de campo nula ou negativa, é aconselhável que o seu valor não seja inferior a 10% da corrente nominal. Esse limite está representado na curva.

A curva de estabilidade teórica é a linha que delimita a máxima potência que a máquina pode fornecer sem perder a sua estabilidade. Esta curva é dependente da tensão terminal, das reatâncias síncronas X_d e X_q , da máxima corrente de campo e naturalmente do ângulo de carga máximo.

Qualquer combinação de potência ativa e reativa que viole esta linha irá provocar a saída da máquina.

A curva de estabilidade teórica é obtida pela resolução da equação:

$$\left(Q + \frac{V_t^2}{X_q}\right)^3 + \left(Q + \frac{V_t^2}{X_d}\right) * P^2 = 0$$

Que representa os pontos de máxima potência que a máquina pode fornecer.

Como não se deve operar máquinas com despachos muito próximos ao limite teórico de estabilidade, foi determinada uma nova curva que está à cerca de 10% deste limite, chamada de curva de estabilidade prática.

Máquinas operando na região entre as linhas de estabilidade teórica e prática estão precariamente estáveis, podendo perder o sincronismo para pequenas oscilações do sistema.

4.0 – UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

O programa dispõe de um módulo compilado denominado CUCAGE.COM.

Estão disponíveis para utilização no programa dados de usinas da CESP, que serão lidos automaticamente. Pode-se usar o programa para obter curvas de uma máquina qualquer.

- a) Estando no subdiretório C:\CUCAGE>:

TECLAR [CC] E EM SEGUIDA [ENTER]

Ao carregar o programa teremos a seguinte tela:

CESP
 COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO
 TOE – DIVISÃO DE ESTUDOS DA OPERAÇÃO
 TOEE – SETOR DE ESTUDOS ELÉTRICOS
 PROGRAMA TRAÇADOR DE CURVAS DE CAPABILIDADE

VERSÃO – 2.1

PRESSIONE QUALQUER TECLA

- b) Em seguida aparece a seguinte tela:

TECLE – 1 PARA TRAÇAR CURVAS DE CAPABILIDADE
 2 PARA LISTAR DADOS CONTIDOS NO ARQUIVO
 3 PARA INSERIR DADOS DE NOVAS MÁQUINAS
 4 PARA CORRIGIR DADOS DO ARQUIVO
 5 PARA ELIMINAR DADOS DO ARQUIVO
 6 PARA ENCERRAR O PROCESSAMENTO

- c) SE A OPÇÃO ESCOLHIDA FOR [1] TEREMOS A SEGUINTE TELA:

1 – ÁGUA VERMELHA	21 –
2 – BARIRI	22 –
3 – BARRA BONITA	23 – POLOS LISOS
4 – CACONDE	24 – POLOS LISOS.1
5 – CAPIVARA	25 – POLOS LISOS.3
6 - EUCLIDES DA CUNHA	26 – SALTO GRANDE
7 – IBITINGA	
8 – ILHA SOLTEIRA	
9 – JAGUARI	
10 – JUPIÁ	
11 – JURUMIRIM	
12 – LIMOEIRO	
13 – NOVA AVANHANDAVA	
14 – PARAIBUNA	
15 – PORTO PRIMAVERA	
16 – PROMISSÃO	
17 – ROSANA	
18 – TAQUARUÇU	
19 – TRÊS IRMÃOS	
20 – XAVANTES	

DIGITE O NÚMERO DA USINA DESEJADA

SE A OPÇÃO FOR [8] (USINA DE ILHA SOLTEIRA) TEREMOS A SEGUINTE TELA:

LIMITADORES DE SUBEXCITAÇÃO

- 1 – LIMITADOR FIXO
- 2 – LIMITADOR SIMPLES
- 3 – LIMITADOR COMPOSTO

DIGITE O NÚMERO DA OPÇÃO DESEJADA

- e) Para as máquinas da CESP utilizar a opção [2]

Em seguida aparece na tela a seguinte mensagem

DESEJA CURVA COM PONTO DE OPERAÇÃO [S/N]?

Se a opção for [S] teremos a seguinte mensagem na tela

POTÊNCIA ATIVA NOMINAL [MW] = 161,58

POTÊNCIA ATIVA [MW] =

DIGITE O VALOR DE POTÊNCIA ATIVA E EM SEGUIDA [ENTER]:

Em seguida aparece na tela a seguinte mensagem :

POTÊNCIA REATIVA NOMINAL [MVA_r] =53,08

POTÊNCIA REATIVA [MVA_r] =

- f) DIGITE O VALOR DE POTÊNCIA REATIVA E EM SEGUIDA [ENTER] :

Em seguida aparece na tela a seguinte mensagem :

DESEJA CURVA COM TENSÃO NOMINAL [S/N]?

Se a opção for [S], o programa traçará a curva de capacidade da máquina com tensão nominal.

Se a opção for [N], o programa solicitará a tensão terminal que será colocada na máquina, calculando então as novas condições para o traçado da curva de capacidade.

DIGITE [S/N] E EM SEGUIDA [ENTER]

- g) Se a opção for [N] aparece a seguinte tela:

TENSÃO PARA CÁLCULO DA CURVA [KV]=

SE DIGITAR O VALOR EM [KV] :

Aparece a curva solicitada e mostrada a seguir:

A partir desta tela o programa encerrará o traçado de curvas informativas. Qualquer utilização até aqui encerrará neste ponto.

Ao entrar com o valor aparece a curva solicitada, mostrada a seguir na figura 4 :

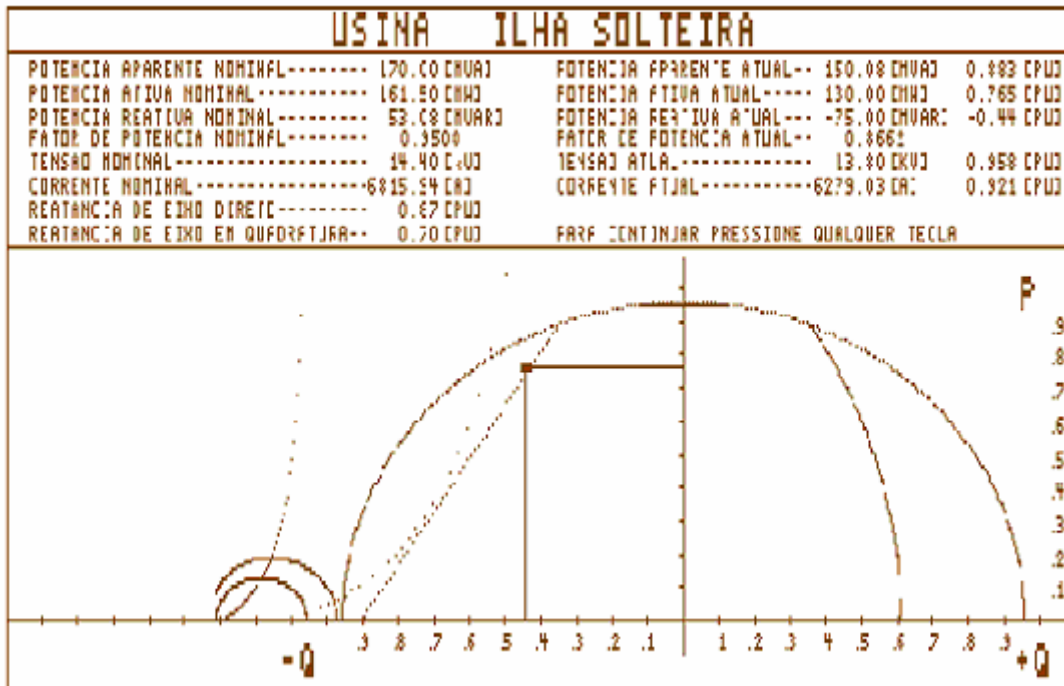


FIGURA-4 – Curva de Capabilidade do Gerador

4.1 Análise da Curva

A curva acima nos mostra o ponto de operação da Unidade Geradora com relação à Curva de Capabilidade do Gerador, fornecendo parâmetros numéricos e gráficos a serem utilizados em correção da mesma, caso estejam fora ou próximo dos limites permitidos, possibilita efetuar ajustes de maneira que auxilie no controle de tensão e também no controle do reservatório, devido um menor número de Unidades Geradoras ligadas no sistema.

Uma Unidade Geradora subexcitada, poderá ter instabilidade, corrente do estator elevada, corrente de excitação baixa, aquecimento do cobre e ferro, perdas, dilatação do cobre podendo comprometer a isolamento, risco de perda de excitação e sincronismo.

Uma Unidade Geradora sobreexcitada, poderá ter sobrecorrente no campo do gerador e sobretensão nos pólos do rotor .

5.0 – IMPRESSÃO

O programa foi concebido para que os resultados gráficos sejam visualizados em tela, entretanto, se for necessária impressão dos resultados, estes deverão ser feitos através de recursos do MS-DOS. Caso seja usado o "Print Screen", é necessário carregar o programa auxiliar "GRAPHICS.COM".

6.0 – CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação e análise da flexibilização de limites operativos de equipamentos de sistema, buscando melhorias e confiabilidade para o Sistema Interligado Sul/Sudeste/Centro-Oeste, dentro da área de operação da CESP.

A aplicação dos recursos, CUCAGE e Curva de Colina, durante a operação da CESP, reduziu a velocidade de deplecionamento dos reservatórios, durante o período de estiagem, melhorando a produtividade das Unidades Geradoras e amenizando problemas cavitationais das turbinas, com o inconveniente de se trabalhar com elevada absorção de reativo pelas Unidades Geradoras.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Geradores síncronos - Curvas de Capacidade - José Antonio Feijó de Melo - Publicações Técnicas CHESF.
- The Capability of Alternators - R. W. Bruck and H. K. Messerle
- Manual de Diagramas de limites Operativos (CESP)