

# Sistema de Apoio à Tomada de Decisão na Operação em Tempo Real do Sistema da CTEEP

T. Ohishi, UNICAMP e P. V. Pereira, CTEEP

**Resumo**—Este projeto desenvolveu um sistema de suporte à decisão para operação de um sistema de transmissão. Este sistema visa a análise da operação diária e também a operação em tempo real. Em relação à análise da operação diária, o objetivo foi desenvolver uma metodologia para analisar a operação diária do ponto de vista da operação do sistema de transmissão. O ponto de partida desta análise é o programa de operação diária de produção de energia elétrica. Na elaboração deste programa de operação é dado maior enfoque aos aspectos ligados ao sistema de geração, não detalhando muito a operação do sistema de transmissão. A metodologia desenvolvida foi baseada em um fluxo de carga integrado a um modelo utilizando algoritmos evolutivos. Esta metodologia também pode ser utilizada para dar suporte à operação em tempo real.

**Palavras-chave**—Sistema de transmissão; Sistema de suporte à decisão, Fluxo de carga; Algoritmos Evolutivos.

## I. INTRODUÇÃO

O sistema de energia elétrica brasileiro é caracterizado por uma forte predominância de geração de origem hidrelétrica. Como estas fontes geradoras situam-se em geral distante dos principais centros de consumo de energia elétrica e também dada a grande extensão territorial brasileira, faz-se necessário uma extensa rede de transmissão e de distribuição para transportar a energia produzida até os consumidores finais.

A geração hidrelétrica usa um recurso natural gratuito que são as vazões dos rios, porém a sua operação é fortemente influenciado pelo regime de chuvas, o que trás uma grande incerteza sobre a disponibilidade futura de recursos energéticos. Para otimizar o aproveitamento do ciclo anual de chuvas, a operação do sistema requer uma cadeia de planejamentos, que começa avaliando a operação vários anos à frente até chegar a operação em tempo real. No caso brasileiro, inicialmente é realizado o planejamento de longo prazo, que considera um horizonte de tempo de cinco anos à frente. Este modelo utiliza uma representação agregado e

visa determina a proporção entre as gerações hidrelétrica e termelétrica ao longo deste horizonte de tempo e determina os custos marginais de geração, os quais são um dos principais parâmetros na definição dos preços no mercado de energia elétrica. A etapa posterior é o planejamento de médio prazo, que considera a operação individualizada das unidades geradoras considerando um horizonte de estudo de um ano à frente. Atualmente, neste planejamento a operação do primeiro mês do período de estudo é discretizada em períodos semanais, enquanto que para os meses restantes a discretização é mensal. O principal objetivo deste planejamento é estabelecer o total de geração de energia elétrica a ser produzido em cada fonte geradora em cada um dos intervalos de tempo. Desse estudo é aproveitado o planejamento das cinco primeiras semanas. O montante de energia elétrica a ser produzida por uma dada usina hidrelétrica em uma dada semana é denominado a sua meta energética. Esta meta será uma importante referência para o planejamento de curto prazo.

A última etapa é o planejamento de curto prazo, que ainda é subdividido em um planejamento semanal e uma programação da operação diária. O planejamento semanal já considera uma representação mais detalhada da operação do sistema, considerando, por exemplo, uma curva de carga horária ou por patamar; uma representação mais detalhada da operação do sistema hidrelétrico considerando o tempo de viagem da água entre reservatórios, restrições ambientais e de usos múltiplos da água; e nesta etapa é importante também as restrições de transmissão, em geral representadas através de um modelo DC. Finalmente, na programação diária a operação é representada com mais detalhe. Por exemplo, a carga é representada com discretização de meia hora; as usinas hidrelétricas são representadas ao nível de unidades geradoras (conjunto turbina-gerador), pois é importante estabelecer um planejamento de entrada e saída de unidades geradoras devido à variação da carga diária. Em relação ao sistema de transmissão, é considerada ainda as restrições de segurança, as quais levam em conta a ocorrência de contingências nos sistemas de transmissão e de geração. Em resumo, a programação diária estabelece o nível de geração média em cada intervalo de tempo do próximo dia, bem como uma escala de entrada e saída de unidades geradoras. Esta programação deve atender a todos os requisitos operativos dos sistemas de geração, transmissão e de segurança. Esta programação é repassada para a área de operação do sistema

---

T. Ohishi trabalha na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP. (e-mail: [taka@densis.fee.unicamp.br](mailto:taka@densis.fee.unicamp.br)).

P.V. Pereira é engenheiro da CTEEP. (e-mail: [ppereira@ctEEP.com.br](mailto:ppereira@ctEEP.com.br)).

e será uma referência operativa para a operação em tempo real do sistema.

Na cadeia de planejamento acima referenciado nota-se que a representação da operação do sistema vai sendo mais detalhada na medida em que o horizonte de estudo vai encurtando. Nesse sentido, a programação da operação diária é a que utiliza a representação mais detalhada do sistema de transmissão, que na prática se resume a um modelo DC da rede transmissão. Para a operação em tempo real, no entanto, esta representação de rede é demasiado simplificada, pois não são levados em conta vários parâmetros e variáveis importantes, como é o caso da representação dos tap's dos transformadores e da parte de potência reativa. Nesse sentido, a programação da operação diária não fornece parâmetros para a operação em tempo real em aspectos importantes da operação do sistema de transmissão.

Finalmente, para a operação em tempo real o enfoque principal é sobre a operação do sistema elétrico e neste nível tanto as unidades de geração como de transmissão devem ser considerados de forma detalhada, em muitos casos chegando ao nível de cada equipamento. Neste nível, a questão da segurança operativa passa a ser preponderante, visando o atendimento continuado e com qualidade dos consumidores de energia elétrica. Um outro ponto importante é a capacidade do sistema de rapidamente detectar alterações importantes nas condições operativas e prontamente determinar e executar ações corretivas, quando necessárias.

É importante destacar que para a operação em tempo real, o conjunto de variáveis de controle do sistema são maiores do que os considerados na elaboração da programação diária, pois nesta última o enfoque é basicamente sobre a geração de potência ativa; enquanto que para a operação em tempo real, além da geração de potência ativa, tem-se a geração de potência reativa, alteração de tap's de transformadores, reatores, banco de capacitores, etc... Em resumo, a programação da operação dá uma referência operativa para a parte ativa, mas quase nada é definido em relação à potência reativa e para as variáveis de controle da rede de transmissão.

O objetivo deste projeto foi primeiramente desenvolver uma abordagem visando a análise da operação diária, procurando detalhar a operação diária mais do ponto de vista da operação da rede, dando um indicativo do possível estado da rede e dos valores das variáveis da rede de transmissão. A idéia aqui é dar uma referência para a operação em tempo real também de outras variáveis além das tratadas na programação diária. O segundo objetivo foi desenvolver um sistema de suporte à operação frente a situações de alteração imprevistas no sistema, com o objetivo de fornecer ao operador alternativas de ação para esta situação.

## II. MODELOS PROPOSTOS

Foram propostos dois modelos. O primeiro visa a análise da operação diária, enquanto o segundo visa mais dar suporte à operação em tempo real do sistema.

### A - Análise da Operação Diária

A curva de carga diária típica apresenta uma grande variação, com a carga mínima ocorrendo de madrugada e o perí-

odo de ponta ocorrendo no início da noite. Para acompanhar esta variação na demanda de carga, tanto a geração como o despacho de máquinas também deve variar. Em princípio, a operação em tempo real tentará seguir esta programação.

A programação da operação diária fornece apenas a geração de potência ativa em cada unidade geradora e em cada intervalo de tempo. Outras variáveis tais como a parte de potência reativa e variáveis de controle da rede de transmissão não são consideradas. As variáveis não consideradas na programação da operação, no entanto, são muito importantes para a operação em tempo real do sistema e estas são fortemente influenciadas pelas condições de carga e despacho de geração. Assim, primeiramente é importante fazer um diagnóstico da situação prevista pela programação da operação diária, e em função deste diagnóstico redefinir ações de controle visando uma operação mais adequada ao longo do dia.

### A.1 – Fase de Diagnóstico

A programação da operação diária discretiza o período de um dia em intervalos horários, ou de intervalos de meia hora. Para cada intervalo de tempo é feito uma previsão de carga e a programação da operação aloca uma geração para este intervalo de tempo para cada fonte produtora de energia elétrica de forma que esta demanda seja atendida, além de outras restrições tais como limites operativos, restrições de rampa, de reserva girante, e restrições elétricas. A geração determinada por unidade geradora para este intervalo de tempo é um indicativo da geração média, e a geração instantânea também deve oscilar em torno desse valor. De modo que quando resolve-se um fluxo de carga para este intervalo de tempo considerando estes valores médios, o resultado que se obtém em termos do estado da rede (ângulo de fase e tensão), dará um indicativo dos valores instantâneos destas variáveis ao longo deste intervalo de tempo. Assim, a fase de diagnóstico é realizada considerando as condições e a solução proposta pela programação diária para este intervalo de tempo.

O processo de diagnóstico é baseado na resolução de fluxos de carga. Para cada intervalo é resolvido um fluxo de carga dado pelas equações (1) e (2) a seguir apresentadas.

$$P_k^t = V_k^t \sum_{m \in K} V_k^t (G_{km} \cos \theta_{km}^t + B_{km} \text{sen} \theta_{km}^t) \quad (1)$$

Onde:

$P_k^t$  – Injeção líquida de potência ativa na barra k no intervalo t;

$V_k^t$  – Magnitude de tensão na barra k no intervalo t;

K – Conjunto das barras interligadas diretamente à barra k;

$B_{km}, G_{km}$  – Parâmetros da linha de transmissão que interliga as barras k-m;

$\theta_{km}$  – Abertura angular da linha de transmissão que interliga as barras k-m no intervalo t;

$$Q_k^t = V_k^t \sum_{m \in K} V_k^t (G_{km} \text{sen} \theta_{km}^t - B_{km} \cos \theta_{km}^t) \quad (2)$$

O termo à esquerda na equação (1) representa a injeção líquida de potência ativa na barra k no intervalo de tempo t.

Em particular para o intervalo de tempo  $t$  esta injeção líquida é dada pela equação a seguir, onde  $PG_k^t$  é a potência gerada na barra  $k$  no intervalo de tempo  $t$ , e  $PC_k^t$  é a demanda de carga ativa nesta barra neste intervalo de tempo. Para realizar a fase de diagnóstico do intervalo de tempo  $t$ , a  $PG_k^t$  será igual à potência ativa alocada para esta barra (usina) para este intervalo de tempo pela programação da operação diária. Com isso estabelece-se uma relação entre o estado da rede de transmissão neste intervalo de tempo com a solução proposta pela programação.

$$P_k^t = PG_k^t - PC_k^t$$

As equações (1) e (2) serão genericamente referenciadas através da equação (3) a seguir. Nesta equação a variável  $T^t$  representa os tap's dos transformadores.

$$g^t(V^t, \theta^t, P^t, Q^t, T^t) = 0 \quad (3)$$

### Diagnóstico

Neste projeto o diagnóstico visou unicamente a manutenção das tensões dentro de seus limites operativos usuais. Outros aspectos podem ser incluídos neste diagnóstico, tais como perdas e carregamento nas linhas.

Baseado nestas características da operação diária, a fase de diagnóstico pode ser dividido nas etapas a seguir:

- i) Verificação dos limites de tensão: Após a resolução dos fluxos de carga para todos os intervalos de tempo baseada na programação da operação diária, verifica-se não há violações de limites de tensão. Se em nenhum intervalo é identificado violações, então encerra-se o processo, pois a programação da operação diária é segura do ponto de vista da operação do sistema de transmissão. Se em algum intervalo de tempo for identificado alguma violação de limite, então passa-se para a etapa seguinte, que é a etapa de reprogramação.
- ii) Etapa de reprogramação: o objetivo desta etapa é identificar os intervalos de tempo e as respectivas barras que estão mais próximos ou com violações de seus limites operativos e buscar um novo ponto de operação mais adequado. Por exemplo, no período de ponta, como as tensões tendem a baixar, as barras de maior interesse são aquelas com a tensão mais próxima de seu limite inferior. Como resultado desta etapa tem-se identificadas as barras com as tensões mais próximas de seus limites. Se todas essas barras apresentarem ainda uma distância mínima (pré-estabelecida) de seus limites, então isto indica que a programação da operação diária propõe uma solução ao longo do dia sem violações e com folga operativa capaz de absorver variações usuais nas condições operativas. Por outro lado, se em algum intervalo de tempo alguma barra não apresentar uma folga mínima em relação à sua tensão limite, é reco-

mendável que se re programe a operação deste intervalo de tempo.

### A.2 – Modelo de Redespacho

A operação do sistema de transmissão em cada intervalo de tempo depende de uma série de parâmetros, tais como os níveis de geração ativa e reativa, a posição dos tap's, a ligação de banco de capacitores, etc... O objetivo do modelo de redespacho é alterar estes parâmetros de modo a obter um novo e mais adequado ponto de operação. Em princípio é possível considerar a alteração de todos esses parâmetros simultaneamente, ou apenas de um subconjunto deles. No modelo a seguir considerou-se somente a alteração dos tap's dos transformadores para inicialmente analisar a influência desta variável na operação do sistema. Futuramente, pretende-se incluir outros parâmetros, tais como banco de capacitores, reatores, e o nível de geração.

O modelo de redespacho implementado neste projeto pode ser representado como a seguir.

$$\text{Minimizar } f(V(T)) \quad (4)$$

$$\text{Sujeito a: } g^t(V^t, \theta^t, P^t, Q^t, T^t) = 0 \quad (5)$$

$$T^t \in T \quad (6)$$

Onde  $f(.)$  é a função objetivo que direcionará a alteração desejada nas tensões; no caso as tensões são funções dos valores dos tap's no intervalo  $t$ , representados genericamente por  $T^t$ . Os tap's só podem assumir valores discretos representados pelo conjunto  $T$ .

O problema (4)-(6) representa a tensão unicamente em função dos tap's, pois é o parâmetro que se pretende recalcular de modo a obter um perfil de tensão mais adequado. Os demais parâmetros como as potências ativa e reativa,  $P^t$  e  $Q^t$ , injetadas nas barras são as mesmas consideradas inicialmente, e de acordo com a programação da operação diária.

A função objetivo  $f(V(T))$  pode representar objetivos específicos dependendo de cada caso. Por exemplo, se o objetivo é aumentar a tensão na barra  $k$ , então pode-se adotar a seguinte função:

$$\text{Minimizar } (V_k^{\max} - V_k^t) \quad (7)$$

Genericamente, a função objetivo pode ser representada por:

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in S} |V_k^{\text{ref}} - V_k^t| \quad (8)$$

Onde  $V_k^{\text{ref}}$  pode ser a tensão máxima, a mínima, ou qualquer outro valor, como, por exemplo, a tensão igual a 1,0 p.u. e  $S$  é um sub-conjunto de barras.

O problema (4)-(6) é de difícil resolução via algoritmos de otimização exata, principalmente devido à natureza discreta do problema. Neste projeto foram implementadas três abordagens, a primeira baseada em Algoritmos Genéticos, a segunda em Busca Tabu, e a terceira baseada em Algoritmos Evolutivos. A metodologia baseada em algoritmos evoluti-

vos foi a que apresentou melhor, e por isso foi adotada em todos os modelos.

### A.3 - Algoritmos Evolutivos

A computação evolutiva é o termo padrão que incorpora os algoritmos inspirados na teoria de evolução natural de Darwin. As técnicas baseadas em computação evolutiva compõem um conjunto de algoritmos que apresentam muitas similaridades com um ambiente biológico, tais como: manutenção de uma população de soluções que são evoluídas através de alterações aleatórias e de seleção.

Os primeiros trabalhos envolvendo programação evolutiva foram desenvolvidos por FOGEL [1], [2]. O originalmente foi aplicado como uma técnica capaz de produzir inteligência artificial pela evolução de máquinas de estado finito. Nos últimos anos, a programação evolutiva foi empregada a vários problemas de otimização, sendo aplicada, neste caso, de forma análoga às estratégias evolutivas.

A versão implementada neste projeto foi a (1+1)-EE, a qual utiliza um único pai e com ele se gera um único filho. Ambos os indivíduos são confrontados numa competição por sobrevivência, onde a seleção elimina a solução mais pobre.

Um indivíduo  $v$  é representado como um par de vetores reais, ou seja,  $v = (x, \sigma)$ , e um indivíduo novo é gerado conforme segue :

$$x_{t+1} = x_t + N(0, \sigma) \quad (9)$$

em que  $t$  se refere à geração corrente, e  $N(0, \sigma)$  é um vetor de números gaussianos independentes com média zero e desvio padrão  $\sigma$ , que para a estratégia evolutiva é um parâmetro estratégico. O novo indivíduo  $x_{t+1}$  é aceito como um membro da população, substituindo ao seu pai se e somente se tem uma função objetivo melhor e satisfaz às restrições do problema.

O desvio padrão é ajustado durante o processo de busca motivado de forma determinística, de tal maneira que o procedimento apresenta convergência. Para isso utiliza-se a regra conhecida como a “regra de sucesso 1/5”, que diz: “A razão entre mutações com sucesso e o total de mutações deve ser 1/5. Se a razão é maior, então deve-se incrementar o desvio padrão. Se a razão é menor, então deve-se diminuir o desvio padrão.”

Formalmente:

$$\sigma^{t+1} = \begin{cases} c_i \sigma^t & \text{se } \varphi(k) > 1/5 \\ c_d \sigma^t & \text{se } \varphi(k) < 1/5 \\ \sigma^t & \text{se } \varphi(k) = 1/5 \end{cases}$$

Onde  $t$  é o número da geração,  $\varphi(k)$  é a taxa de sucesso do operador de mutações durante as últimas  $k$  gerações. Os parâmetros  $c_i$  e  $c_d$  assumem os valores 1.22 e 0.82, respectivamente.

No caso específico do problema (4)-(6), a estratégia evolutiva implementada pode ser resumido nos seguintes passos:

- i) Escolha de uma solução inicial: Para o problema (4)-(6) é fácil determinar uma solução inicial, pois basta escolher valores discretos factíveis para os tap's. Inicializa-se também o valor do desvio padrão.

- ii) Geração do filho: Através da equação (9) determina-se um filho.
- iii) Avaliação dos indivíduos: Tanto para o pai como para o filho, calcula-se o correspondente fluxo de carga e o valor da função objetivo (4). Elimina-se a pior solução.
- iv) Critério de parada: O critério mais utilizado é o número de gerações pré-fixado. Caso o critério de parada não seja satisfeito, volta-se ao passo (ii).

### A.4 – Estudos de Caso

#### A.4.1 – Estudos com o modelo de redespacho

A seguir serão apresentados dois estudos de caso para o modelo de redespacho (4)-(6). Ambos os estudos consideram apenas um intervalo de tempo, e o objetivo é mostrar o desempenho do modelo numa aplicação sobre o sistema teste IEEE30. O Caso 1 adota como função objetivo que todas as tensões de todas as barras busquem uma tensão de 1,0 p.u.. Já o Caso 2 busca aumentar a tensão em uma barra específica.

#### Caso 1:

**Função objetivo considera todas as barras.**

**Tensão de referência: 1.0 p.u.**

**Função objetivo é dada pelo somatório da diferença entre as tensões obtidas e 1.0 p.u.**

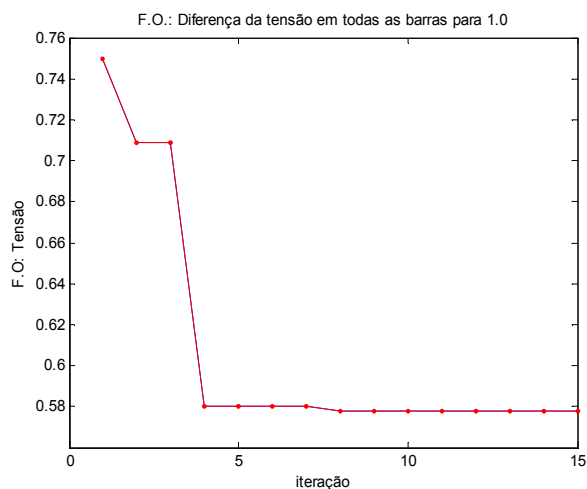


Figura 1 – Valor da função objetivo por iteração

A função objetivo é dada pela soma das diferenças das tensões em todas as barras em relação à tensão de referência de 1 p.u.. Da Figura 1 observa-se que a função objetivo reduz rapidamente nas primeiras quatro iterações e mais uma pequena redução na oitava iteração; após isso não houve mais redução. A Figura só mostra as primeiras quinze iterações, mas na realidade foram testadas trezentas gerações. Em todos os casos estudados o comportamento foi similar, indi-

cando que poucas iterações são suficientes para se determinar uma boa solução.

A seguir serão apresentados alguns resultados obtidos em termos de tap's e tensões. No sistema IEEE30 os tap's estão situados nos seguintes ramos: 11, 12, 15, e 36. Estes tap's serão chamados de tap11, tap12, tap15, e tap36.

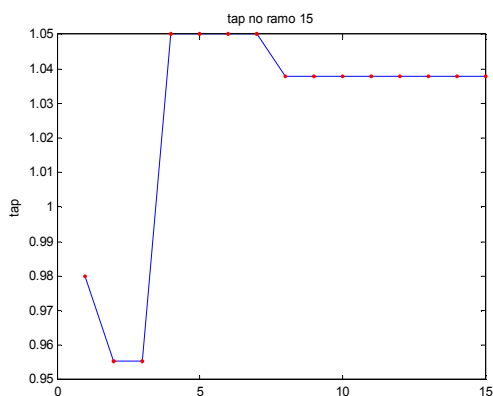


Figura 2 – Valor do tap do ramo 15 por iteração

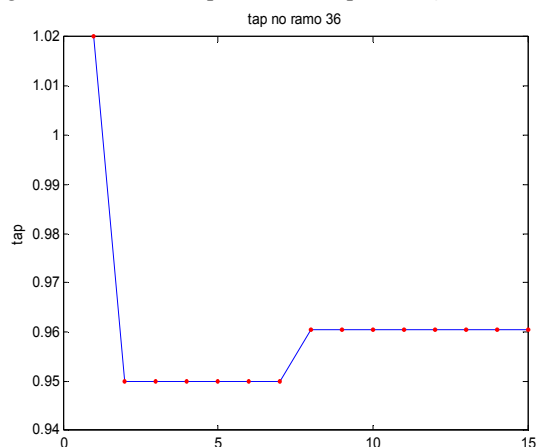


Figura 3 – Valor do tap do ramo 36 por iteração

Os tap's não apresentaram todos o mesmo comportamento. O tap11 se manteve constante, enquanto o tap12 e o tap15 aumentaram os seus valores, e o tap36 diminuiu o seu valor.

### Tensões

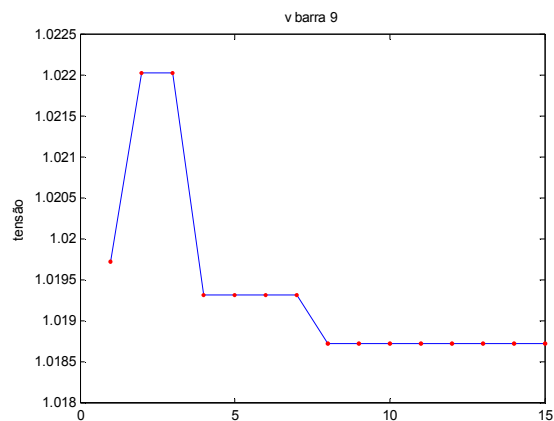


Figura 4 – Valor da tensão na barra 9 por iteração

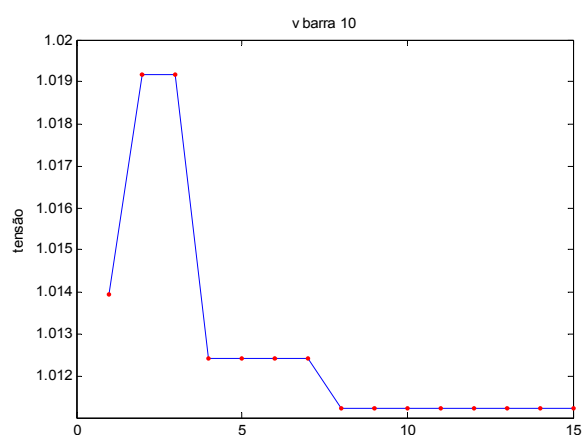


Figura 5 – Valor da tensão na barra 10 por iteração

As tensões nas barras 1, 2, 5, 8, 11 e 13 se mantiveram constantes em todas as iterações, pois estas são barras de geração e por isso as suas tensões são controladas. As tensões nas barras 3, 4, 6 e 7 aumentaram, enquanto nas demais barras a tensão se aproximou mais da tensão de referência 1,0 p.u..

### Caso 2:

**Função objetivo considera só a tensão da barra 4.**

**Tensão de referência: 1.05 pu.**

**Função objetivo é dada pela diferença entre a tensão obtida na barra 4 e 1.05 pu.**

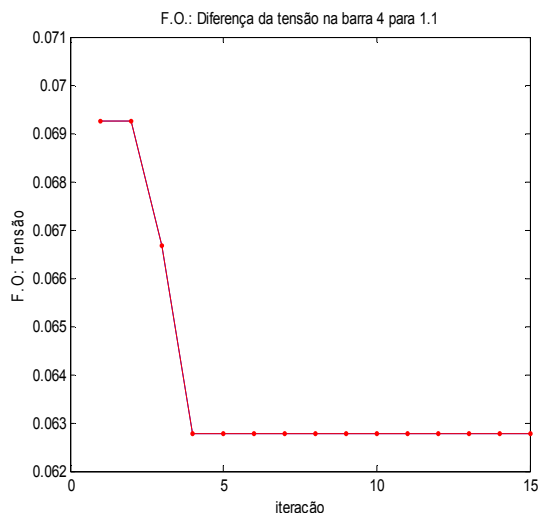


Figura 6 – Valor da função objetivo por iteração

Aqui também se observa o mesmo comportamento da função objetivo já constatado no Caso 1, onde o seu valor diminuiu rapidamente nas primeiras iterações e depois se estabiliza. A Figura 7 mostra a tensão na barra 4. Nota-se que esta tensão vai aumentando nas primeiras iterações procurando atingir o valor de 1,05 p.u..

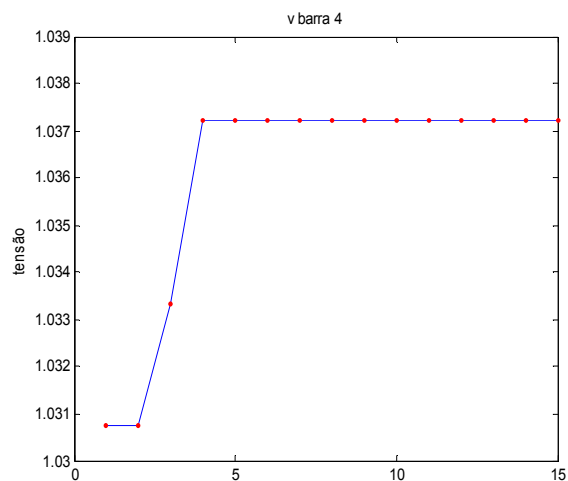


Figura 7 – Valor da tensão na barra 4 por iteração

Em relação aos tap's observou-se um comportamento similar ao Caso 1. Aqui também o tap11 permaneceu no mesmo valor, o tap12 e o tap15 aumentaram os seus valores, e o tap36 diminuiu o seu valor. A diferença é que eles estabilizaram em valores um pouco diferentes do Caso 1.

As tensões das demais barras não fizeram parte na função objetivo, e mesmo assim as tensões nas demais barras permaneceram dentro de seus limites operativos. Caso alguma tensão violasse os seus limites, então neste caso poderia-se incluir também esta tensão na função objetivo procurando eliminar esta violação.

#### A.4.2 – Estudos de análise da operação diária

A seguir será apresentado um estudo de caso de análise da operação diária sobre o sistema teste IEEE30 barras. Neste estudo são considerados três intervalos de tempo, um de carga leve, outro de carga média e um de carga pesada. Este estudo faz inicialmente um diagnóstico, no qual são levantados os perfis de tensão para cada intervalo de tempo. A partir destes perfis de tensão é possível ter uma idéia da tensão média em cada intervalo de tempo e detectar se em algum intervalo de tempo há pontos críticos em relação ao seu nível de tensão.

Para simular diferentes níveis de carga, variaram-se tanto as gerações como as demandas ativas e reativas. Estas variações foram obtidas multiplicando-se as gerações e demandas contidas no caso base do sistema IEEE30 segundo os fatores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Fator de carga

Carga leve	Carga média	Carga pesada
0,78	1,00	1,30

#### Fase de Diagnóstico

Para cada um dos intervalos de tempo foi executado um fluxo de carga, considerando as condições de geração e carga do respectivo intervalo. A Figura 8 (no final do texto) mostra a tensão por barra nos três intervalos de tempo. As barras 1, 2, 5, 8, 11 e 13 são barras de geração, e por isso as suas tensões foram mantidas constantes em todos os intervalos de tempo. Em particular, as tensões controladas nas barras de geração 1, 11 e 13 foram fixadas em valores acima de 1,05 p.u.. As demais barras em todos os intervalos de tempo têm as suas tensões dentro de seus limites. Observa-se também que à medida que a carga aumenta, de um modo geral as tensões nas barras diminuem. Assim, neste diagnóstico do ponto de vista das tensões, a solução inicialmente proposta é viável.

#### Fase de reprogramação:

Embora do ponto de vista das tensões, a operação prevista neste estudo de caso em todos os intervalos de tempo não apresente violações, mesmo assim muitas vezes é possível reprogramar a operação visando melhorar o perfil de tensão. Baseado nesta idéia, esta solução inicial foi alterada em termos dos seus tap's. As gerações e demandas foram mantidas as mesmas do caso inicial (fase de diagnóstico).

Nesta etapa foi realizada uma reprogramação em todos os intervalos de tempo, baseado no modelo de reprogramação (4)-(6). Em todos os intervalos de tempo foi adotada uma mesma função objetivo e no caso igual à função adotado no Caso 1 (Todas as barras com a tensão de referência de 1,0 p.u.). A Figura 9 mostra os perfis de tensão reprogramados obtidos para os três intervalos de tempo.

As Figuras 10, 11 e 12 mostram uma comparação entre as tensões obtidas inicialmente (na fase de diagnóstico) e as tensões obtidas através do modelo de redespacho. Em todos os três intervalos observa-se que a tensão final de grande parte das barras se aproxima mais de 1,0 p.u. do que a solução inicial, obtendo-se assim um melhor perfil de tensão. Outras estratégias poderiam ser adotadas, como por

exemplo procurar aumentar as tensões nos períodos de carga pesada e diminuir a tensão nos períodos de carga leve.

#### B – Suporte à Operação em Tempo Real

Uma outra aplicação do modelo desenvolvido é no suporte à operação em tempo real. Muitas vezes ocorrem eventos não programados, como a saída forçada de equipamentos ou um comportamento atípico da carga, e isto pode levar o sistema a um ponto de operação inadequado, como, por exemplo, violações de tensão. Este caso requer uma resposta rápida e para isso o modelo de redespacho pode apoiar o operador sugerindo possíveis alternativas.

A idéia aqui é ter este modelo integrado a um estimador de estado, no qual o estimador de estado fornece as informações sobre o atual estado do sistema e o modelo de redespacho (4)-(6) determina as possíveis ações para a um novo ponto de operação mais adequado. Neste contexto em geral as violações ocorrem em pontos específicos, como por exemplo a violação da tensão em dada barra. Neste caso a reprogramação poderia ser similar ao Caso 2, no qual procurou-se alterar o tensão em uma barra específica. Uma outra vantagem desta abordagem é a rápida solução do modelo de reprogramação.

### III. CONCLUSÕES

Neste projeto foi desenvolvido um sistema de suporte para a análise da operação diária de um sistema de energia elétrica, com ênfase no sistema de transmissão. O objetivo deste sistema foi primeiramente avaliar do ponto de vista da operação do sistema de transmissão a programação da operação diária proposto para o corrente dia. A partir desta ava-

liação é possível detectar os possíveis intervalos de tempo críticos, onde se identificam violações. A partir destas violações é possível buscar uma reprogramação visando melhorar o perfil de tensão.

Durante o projeto foram implementadas três metodologias, baseadas em Busca Tabu, Algoritmos Genéticos e Algoritmos Evolutivos, sendo este último o que apresentou melhor desempenho. O modelo desenvolvido é bastante flexível e bastante rápido, pois requer a execução de poucos fluxos de carga.

As metodologias desenvolvidas mostraram-se adequadas aos objetivos especificados, e os resultados obtidos seguem que estes modelos podem ser aplicados tanto na análise diária como na operação em tempo real.

### IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FOGEL D.B., *Evolutionary Computation, Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*, New York, IEEE Press, 1995.
- [2] FOGEL D.B.; OWENS A.J.; WALSH M.J., *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*, New York, IEEE Press, 1996.

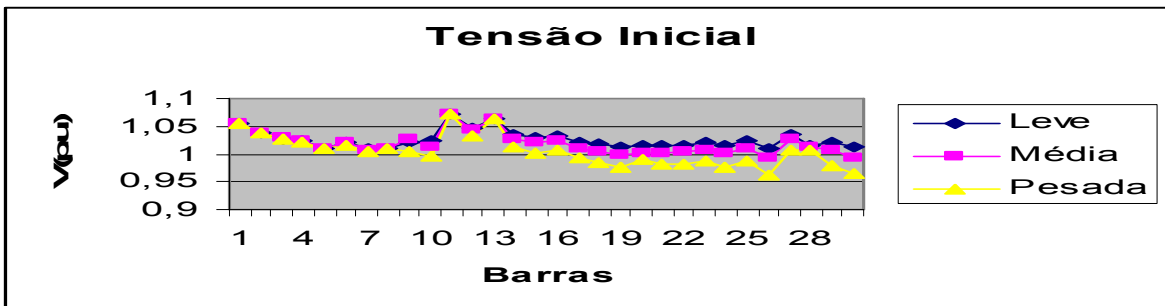


Figura 8 – Valor das tensões por barra e por intervalo de tempo

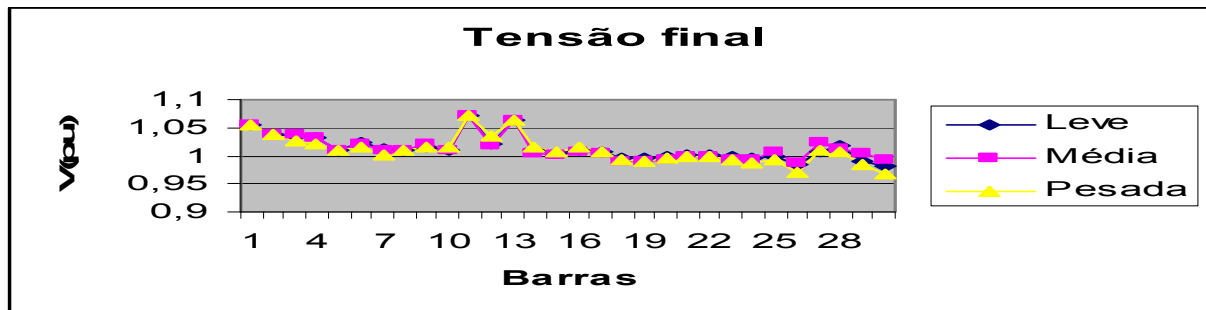


Figura 9 – Valor das tensões por barra e por intervalo de tempo

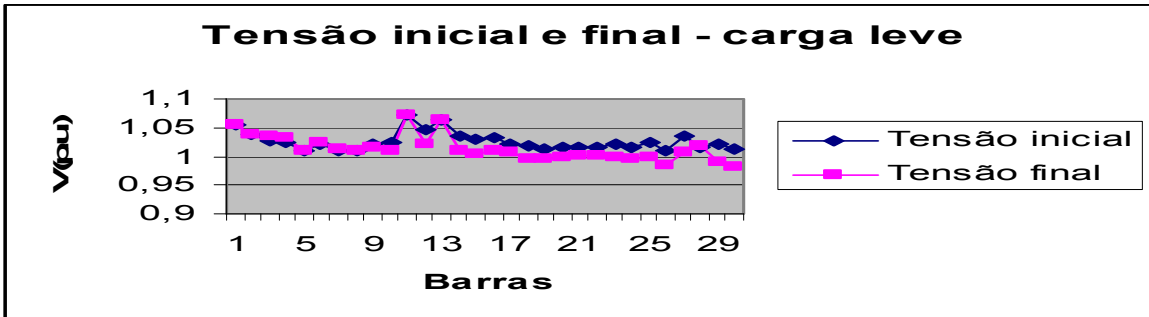


Figura 10 – Valor das tensões por barra e por intervalo de tempo

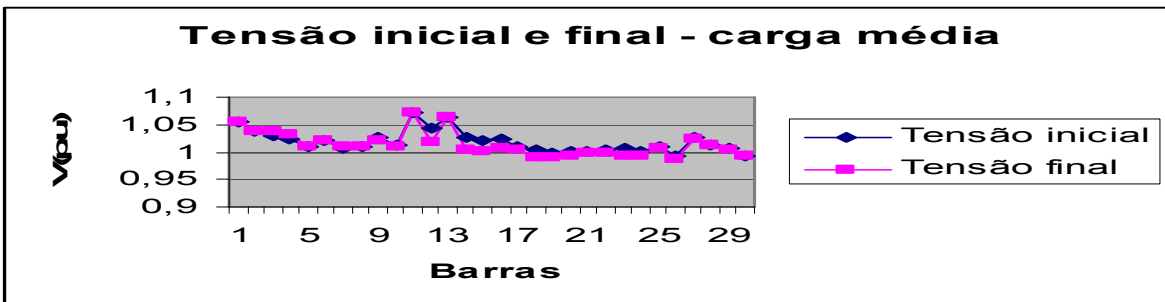


Figura 11 – Valor das tensões por barra e por intervalo de tempo

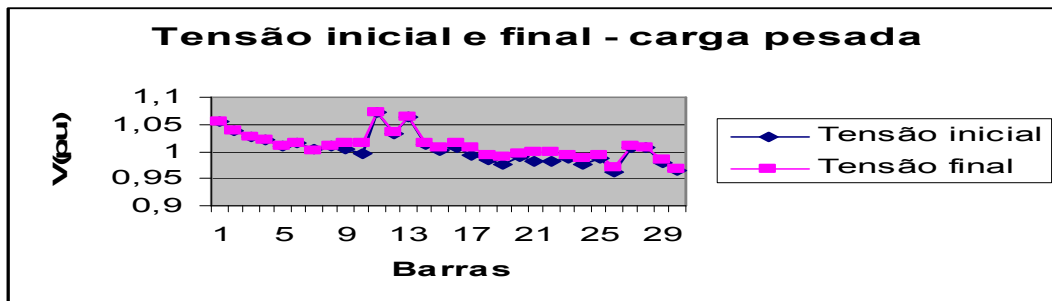


Figura 12 – Valor das tensões por barra e por intervalo de tempo