Aplicação de Fluxo de Potência Ótimo na Operação e Planejamento de Curto Prazo

José Henrique de Oliveira Vilela
Companhia Energética de Brasília – CEB
Brasília/DF – Brasil
josehenrique@ceb.com.br

PALAVRAS CHAVES
Fluxo de Potência, Planejamento da Operação, Otimização.

RESUMO

O trabalho apresenta o Fluxo de Potência Ótimo como ferramenta numérica que auxilia a tarefa de otimizar o estado da operação do sistema de potência em regime permanente. A otimização pode ser feita para a operação em tempo real e para o planejamento. São apresentados critérios de escolha das funções a serem otimizadas, para um cenário atual e para um cenário futuro de curto prazo. Neste processo são otimizadas as funções de perdas elétricas, de uso de shunt capacitivo, de controle de tensão e de menor corte de carga em contingências. Essas otimizações são depois analisadas e comparadas.

1 – INTRODUÇÃO

A diferença entre o fluxo de potência tradicional e o Fluxo de Potência Ótimo é que o primeiro se destina a calcular as tensões e ângulos nas barras e os carregamentos, e o segundo serve para mostrar o desempenho do sistema sem as violações de carga, limites ou quaisquer outras restrições. Pois essas restrições são atendidas no processo.

Vários problemas podem ser matematicamente colocados na forma de uma função objetivo, que deve ser minimizada ou maximizada, atendendo determinadas restrições. Para isso são criadas variáveis de controle, que fazem parte de funções objetivos e funções de restrição.

No processo, a solução do Fluxo de Potência Ótimo é aquela na qual uma função objetivo, ou índice de desempenho, é otimizada. O objetivo pode ser medido por índices.

A aplicação do Fluxo de Potência Ótimo ocorre no Planejamento e na Operação.

No Planejamento podem ocorrer os seguintes objetivos:
Despacho econômico de usinas;
Controle de intercâmbio de potência (este item adquire maior importância com a entrada de novas fontes na CEB, como SE-Samambaia e Corumbá IV);
Quantidade ótima de compensação reativa (shunt) no sistema;
Redução do fluxo de potência reativa e de perdas de potência ativa na sub-transmissão da CEB.

No tempo real, o programa pode ser um instrumento de decisão nas situações:
- Determinação de correções, para cenários de contingência ou crescimento de carga inesperado;
- Determinação do mínimo corte de carga, para obter as soluções das equações da rede sem violações de restrições;
- Determinação do despacho de segurança;
- Controle de tensão;
- Minimização de perdas.

2 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Os problemas de fluxo de potência em regime permanente buscam a maximização ou minimização de funções. Isso ocorre trabalhando-se nas variáveis de controle.

Em termos matemáticos, o problema pode ser representado como:

Minimizar	$f(x,y)$
Sujeito a	$g(x,y) = 0$
	$h(x,y) > 0$

Acima, x representa as variáveis controláveis e y representa as variáveis dependentes.
As variáveis de controle são aquelas que podemos monitorar diretamente de forma a atingir a otimalidade, ou condição ótima.
Exemplos de variáveis de controle são:
- Geração de potência ativa;
- Taps de transformadores;
- Geração de potência reativa;
- Tensões nas barras de geração;
- Inserção de capacitores.

As variáveis dependentes são aquelas que dependem das variáveis de controle.
Exemplos de variáveis dependentes são:
- Ângulo de tensão nas barras;
- Geração de potência reativa;
- Fluxo nas linhas e nos transformadores.

No problema também existem vários valores ou parâmetros fixos como topologia da rede, demandas ativa e reativa.

3 - FUNÇÕES OBJETIVOS

A escolha da função a ser otimizada é o passo mais importante no processo. Várias são as opções disponíveis. A escolha da função objetivo deve ser feita de acordo com o estudo a ser conduzido. Diferentes funções objetivos podem ser processadas e comparadas para escolha do melhor ponto de operação.

As Distribuidoras normalmente não tem controle sobre despachos de usinas, pois são normalmente usuárias da energia produzida pelos agentes geradores e transmitida pelos agentes de transmissão. Por isso algumas otimizações são úteis aos geradores e transmissores, mas de pouca utilidade para as Distribuidoras, como:
- Custo de Geração de Potência Ativa;
- Custo de Geração de Potência Reativa;
- Minimização de desvio de intercâmbio;
- Custo de Injeção de Potência Ativa;
- Custo de Injeção de Potência Reativa;
- Menor custo de geração.

As funções objetivos abaixo tem maior praticidade para as Distribuidoras.

Desvio de Potência Ativa

Novos valores de geração de potência ativa são calculados de tal forma a minimizar o somatório dos quadrados dos desvios em relação aos valores de geração de potência
ativa fornecidos nos dados da rede elétrica.

Perdas

Novos valores para os controles são calculados de tal forma a minimizar as perdas de potência ativa na rede. Opção normalmente usada mantendo-se o despacho de
potência ativa fixo nas barras de geração (exceto na de referência) e o programa ajusta os controles de reativo de tal forma a minimizar as perdas elétricas.

Custo de Corte de Carga

Minimiza o custo de corte de carga de tal forma a corrigir violações operativas como sobrecargas em circuitos, problemas de tensão, etc.
Com a especificação desta função objetivo o programa define automaticamente variáveis que representam os fatores de rejeição de carga nas barras. O corte de carga pode ser especificado para todas as barras ou para um subconjunto de barras da rede e é feito de tal forma a preservar o fator de potência. Além disso ele pode ser aplicado independentemente nas barras candidatas ou de tal forma que o mesmo percentual de carga seja cortado nestas barras.

Controle de Tensão

Nesta opção o programa determina um ajuste nos controles de reativo de tal forma a manter as tensões nos limites especificados pelo usuário. Caso não seja possível, os limites de tensão serão relaxados em um conjunto reduzido de barras escolhidas automaticamente pelo programa. Na especificação dos limites de tensão o usuário pode indicar aquelas barras em que não será permitida a relaxação dos seus respectivos limites.

Aplicação para Máximo Carregamento
A determinação da máxima demanda que pode ser suprida por uma rede elétrica. Neste caso são determinadas quais barras serão maximizadas. Pode-se ainda determinar fatores diferentes de crescimento para cada barra.

Custo de instalação de shunt reativo
Para redes com deficiência de reativo. O custo do investimento é uma função linear passando pela origem.

4 - METODOLOGIAS E PROCESSAMENTOS

A CEB possui uma rede de sub-transmissão nas tensões 138, 69 e 34.5kV. Hoje é uma rede predominantemente radial. No horizonte de curto e médio prazo estarão entrando obras de geração, de nova conexão com a rede básica e de novas subestações.

Por isso além do planejamento usual feito com fluxo de potência convencional e previsões de carga, pode-se utilizar otimizações para obtenção de resultados mais detalhados.

Nas mudanças de configuração ou de operação surgem novos desafios:
- Otimização da nova configuração;
- Otimização dos procedimentos operativos, incluindo restabelecimento.

Antes de fazer uma otimização, é necessário preparar os casos bases que serão analisados. Esses casos bases contêm as informações de cargas previstas e de configurações. Pode-se usar em um primeiro momento o fluxo de potencia convencional para fazer uma pré-análise.

O CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, disponibiliza aos agentes softwares de análise de redes, de transitórios, de curto-circuito, fluxo de potência ótimo, etc. Este trabalho foi feito utilizando os softwares Anarede e Flupot do CEPEL, devido à facilidade de uso, disponibilidade dos softwares e compatibilidade entre os dois.

Os casos bases são preparados a partir dos casos do Sistema Interligado, casos do ONS. Destes são gerados arquivos em formato de texto contendo os parâmetros da rede, as cargas previstas e os ajustes usados. Para simplificação, nos casos eram feitos equivalentes para as áreas que não interessavam para o estudo. Ou seja, as barras a serem monitoradas eram preservadas e todas as barras e áreas não monitoradas eram equivalentadas em um sistema externo.

Esses passos acima são feitos no programa Anarede, que gera para cada caso um arquivo em formato texto com todos os dados necessários da área monitorada. Esses casos servem de base para os diferentes processamentos das otimizações.

Para cada processamento devem ser definidos as funções objetivos, as restrições a serem atendidas e as variáveis de controle que serão utilizadas. Para essas variáveis de controle também devem ser definidos limites mínimos e máximos. Estes limites entram no programa como restrições de desigualdade.

As funções objetivos, limites, variáveis de controle e outras opções de processamento são inseridas no programa dentro de um mesmo arquivo texto de entrada. Os dados de carga e configuração são inseridos em outro arquivo de entrada. E alguns nomes de relatórios de saída são especificados.

5 - RESULTADOS

Para melhor comparação entre as funções objetivos, são mostrados alguns resultados referentes ao mesmo caso base, de um patamar pesado, com uma demanda máxima da CEB em 890 MW. Esse caso se refere a uma configuração de 2007, pois engloba uma nova usina geradora conectada radialmente à sub-transmissão e um novo ponto de conexão com a transmissão.

Controle de tensão.
Abaixo seguem alguns resultados processados com a função objetivo controle de tensão.
Neste caso as tensões foram especificadas para determinada faixa. Isso representa restrições de desigualdade. Os recursos utilizados para manter as tensões dentro das faixas foram taps de transformadores, shunt capacitivo, gerações nas usinas da Distribuidora e tensões nas conexões com Furnas. Dentre todos esses controles acima, a minimização do shunt capacitivo foi a função objetivo.

As perdas na sub-transmissão para esse caso processado foram de 15,4MW.

Uma vez que o chaveamento excessivo de bancos capacitores diminui a vida útil dos mesmos e gera transitórios de tensão, é salutar a minimização do chaveamento. A tabela abaixo (tabela 1) mostra os valores menores de shunt capacitivo por SE de modo a manter as tensões dentro de determinada faixa. Os valores na tabela indicam uma quantidade mínima de potencia reativa capacitiva que pode ser disponibilizada de modo continuo para atender a todos os patamares.

Tabela 1.

SE	Tensão	Shunt alocado
TG	13,8	6,1
CN	13,8	6
CS	13,8	6,1
AC	13,8	1,2
GR	13,8	2,4
BZ	13,8	1,2
NB	13,8	3
1	13,8	4,6
2	13,8	5,1
3	13,8	6
4	13,8	2,4
5	13,8	2,4
6	13,8	2,4
7	13,8	1,2
8	13,8	2,4
9	13,8	2,6
10	13,8	2,4
BN	13,8	2,4
BC	13,8	9,1
CT	13,8	3
SB	13,8	2,4
PL	13,8	2,4
PD	13,8	1,2
SJ	13,8	1,2
BD	13,8	3
VA	13,8	1,2
MJ	13,8	2,4
SM	13,8	1,2
SS	13,8	1,2

Perdas elétricas.
Neste caso os valores de controle são alterados de modo a minimizar as perdas na rede. A tabela 2 mostra os casos originais nos três patamares e os ca sos otimizados, com alteração das variáveis de controle disponíveis. Percebe-se um grande ganho nos resultados finais de perdas elétricas.

Tabela 2

Patamar de carga	Perdas (MW) Caso Base	Perdas (MW) Rede otimizada
Leve	**6,1**	**4,8**
Média	**10,5**	**9,5**
Pesada	**15,7**	**13,5**

A tabela 3 abaixo mostra diferentes valores de potência reativa capacitiva alocada de modo a diminuir as perdas e a manter para cada patamar as tensões nas subestações dentro de determinadas faixas.

Tabela 3 – Valores dos bancos capacitores em Mvar.

SE	PESADA	MÉDIA	LEVE	Valor escolhido
SE TG	9,385	9,09	9,084	12
SE CN	9,738	8,841	8,709	12
SE CS	10,839	10,544	10,667	12
SE AC	1,835	1,842	1,82	2,4
SE GR	2,831	2,727	2,654	4,8
SE BZ	2,476	2,422	2,375	2,4
SE NB	6,595	6,897	5,849	6
SE TN	3,122	3,041	2,983	2,4
SE GD	3,211	3,311	3,085	4,8
SE 01	10,635	10,125	9,814	9,2
SE 02	10,077	10,629	7,792	10,2
SE 03	10,184	10,418	7,262	12
SE 04	5,933	5,901	4,948	4,8
SE 05	3,804	4,011	3,459	4,8
SE 06	5,011	5,226	4,191	4,8
SE 07	3,513		2,616	2,4
SE 08	5,674	5,815	4,377	4,8
SE 09	3,61	3,273	2,827	4,8
SE 10			4,208	4,8
SE BN	3,261	3,301	2,98	4,8
SE BC	12,61	14,801	9,945	18
SE CT	3,338	3,663	3,377	6
SE SB	5,343	5,017	3,845	4,8
SE PL	4,257	4,487	4,123	4,8
SE PD	1,075		1,109	2,4
SE SJ	1,004		1,069	2,4
SE MJ	3,379	3,166	3,075	4,8
SE SM	2,571	2,608	2,483	2,4
SE SS	1,194	1,214	1,163	2,4

Em geral os resultados das otimizações são em números contínuos com várias casas decimais. Mas no caso dos bancos capacitores, os valores em Mvar dependem dos valores nominais de cada estágio. Por isso a última coluna da tabela acima foi preenchida com valores nominais de estágios de bancos existentes em cada SE.

Quando se processa o fluxo de potência, alguns resultados levam a novos ajustes e novos processamentos. No caso abaixo, foi feita uma otimização da função objetivo perdas elétricas, mas mantendo-se fixos os bancos capacitores.
O resultado na tabela abaixo (tabela 4) mostra que as perdas atingiram um valor intermediário entre o caso base e a rede otimizada sem a restrição de fixar os estágios de bancos capacitores.

Tabela 4

Patamar de carga	Caso Base	Rede otimizada	Rede com bancos fixos
Leve	6,1	4,8	5.0
Média	10,5	9,5	10.0
Pesada	15,7	13,5	13.9

Máximo Carregamento.
Utilizando-se os controles disponíveis de taps de transformadores, carregamentos máximos nos pontos de conexão, bancos capacitores e geração, o processamento resultou em um máximo carregamento possível. Neste caso o processamento parou quando uma restrição de fluxo foi atingida.

Tabela 5

Subestação	Carregamento base		Carregamento aumentado	
Nome	MW	Mvar	MW	Mvar
SE-TG---13,8	48	19,1	56,72	22,57
SE-CN---13,8	42	17	49,63	20,09
SE-CS---13,8	49	21	57,9	24,81
SE-AC---13,8	23,8	7,7	28,12	9,1
SE-GR---13,8	16	6,5	18,91	7,68
SE-BZ---13,8	12	4	14,18	4,73
SE-NB---13,8	26,5	12,3	31,31	14,53
SE-01---13,8	28	7	33,09	8,27
SE-02---13,8	34	12,5	40,17	14,77
SE-03---13,8	37	14,6	43,72	17,25
SE-04---13,8	35	10	41,36	11,82
SE-05---13,8	23	6,1	27,18	7,21
SE-06---13,8	9,1	3,5	10,75	4,14
SE-07---13,8	9,9	4,7	11,7	5,55
SE-08---13,8	16,6	5,9	19,61	6,97
SE-09---13,8	14,1	5,8	16,66	6,85
SE-10---13,8	17,9	7	21,15	8,27
SE-BN---13,8	20,6	7,9	24,34	9,33
SE-BC---13,8	34	14,1	40,17	16,66
SE-CT---13,8	13,3	5,7	15,72	6,74
SE-SB---13,8	18,3	8,7	21,62	10,28
SE-PL---13,8	25,2	4,6	29,78	5,44
SE-PD---13,8	3,5	2,7	4,14	3,19
SE VA 13	5	2	5,91	2,36
SE-MJ---13,8	25	10,1	29,54	11,93
SE-SM---13,8	16,7	5,5	19,73	6,5
SE-SS---13,8	8,8	5,8	10,4	6,85

Para todos os casos as grandezas no limite indicam pontos fracos ou vulneráveis do sistema, onde é necessário investimento num curto prazo ou uma atenção maior da engenharia.

As grandezas no limite neste caso são mostradas na tabela abaixo (tabela 6)

Tabela 6

LOCALIZACAO	GRANDEZA	VALOR LIMITE
SE BG	Tensao em barra PV	1,2
SE-02	Tensao em barra de carga	1,2
B,GERAL-34,5	Potencia ativa gerada	150
2573 -> 2591	Fluxo em circuitos (MVA)	13
3639 -> 2524	Fluxo em circuitos (MVA)	32
2523 -> 3638	Fluxo em circuitos (MVA)	32
2541 -> 2543	Fluxo em circuitos (MVA)	17
2541 -> 3613	Fluxo em circuitos (MVA)	25
SE-GR---13,8	Capacitor/Reator Chaveavel	4,8
SE-02---13,8	Capacitor/Reator Chaveavel	10,2
SE-05---13,8	Capacitor/Reator Chaveavel	4,8
SE-08---13,8	Capacitor/Reator Chaveavel	4,8
SE-MJ---13,8	Capacitor/Reator Chaveavel	4,8
SE-SM---13,8	Capacitor/Reator Chaveavel	0

6 - CONCLUSÕES

Vários problemas elétricos podem ser analisados e solucionados com ajuda de ferramentas como o programa Flupot do CEPEL. Matematicamente o problema é representado por uma função que se deseja otimizar e por funções de restrição.

As principais vantagens em se utilizar um programa de Fluxo de Potência Ótimo são: a rapidez na detecção da viabilidade de uma solução, a facilidade de implementação e a facilidade de inclusão de restrições.

Os relatórios de saída contêm informações detalhadas a respeito do processo de otimização e contém os seguintes itens:

Reprodução parcial ou total dos dados de rede;
Descrição da função objetivo e restrições funcionais especificadas pelo usuário;
Relatório de convergência do algoritmo;
Sumário da solução ótima obtida;
Relatórios de barras, geradores, circuitos, transformadores e variação de controles.

Os resultados de algumas funções objetivos podem ser conflitantes. Por exemplo, para uma otimização do perfil de tensão pode ser necessários ajustes e controles conflitantes com a minimização de perdas elétricas. Por isso diferentes funções objetivos devem ser usadas para uma análise mais completa da rede de distribuição.

A função máximo carregamento pode ser muito útil para estudos econômicos financeiros de investimentos para atendimento à carga.

O Fluxo de Potência Ótimo pode gerar instruções para a Operação, melhorando o desempenho em regime permanente. Também pode dar mais subsídios para tomadas de decisões de investimentos ou de configurações para planejamento de curto ou médio prazo.

Configurações em regime normal e em contingências podem ser processadas para a mesma função objetivo, resultando em pontos de operação ótimos distintos ou procedimentos para restabelecimento da configuração original.

Os cálculos acima mostram que é possível combinar resultados de maximização de carregamento, diminuição de perdas elétricas, melhoria do perfil de tensão e melhor controle dos recursos de injeção de potência reativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 – CEPEL, Manual do Flupot, Rio de Janeiro, novembro 2000.
2 - J., KAGAN, N. Dimensionamento e alocação
da compensação reativa para correção do nível
de tensão - Metodologia e experiência de
aplicação. CIER, São Paulo, 1985.
3 - PRETELT, A.M. Automatic Allocation of Network Capacitors. IEEE PAS 90, 1971
RAMOS, D. S., ETRUSCO, W. M., ROBBA, E.
4 - Artigo GOP 22 do XVII SNPTEE
Otimização do processo de recomposição para o sistema interligado brasileiro
5 – Análise de Fechamento de anel via fluxo de potência ótimo e estabilidade dinâmica. Trabalho do IX SEPOPE.