

QED: Programa de Fluxo de Potência Ótimo Baseado no Método Primal-Dual de Pontos Interiores

Antonio Simões Costa

Agosto, 2001

1. Introdução

QED é um programa computacional escrito em FORTRAN para determinar soluções de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) considerando um modelo “DC” para a rede elétrica e funções custo lineares ou quadráticas. Através do **QED** é possível resolver o *problema de minimização dos custos da geração* e o *problema de maximização do bem-estar social* (isto é, um problema de otimização que busca simultaneamente minimizar os custos de geração e maximizar os benefícios para os consumidores).

QED é na verdade composto de três programas e cada um emprega um conjunto de sub-rotinas. Estes programas e sub-rotinas respectivas são:

1. **IPED** - Este programa executa as seguintes tarefas:

- Entrada de dados, usando um arquivo de dados similar àqueles empregadas em análises de fluxo de potência padrão;
- Construção da matriz de restrições e o correspondente vetor do lado direito (vetor de termos independentes), vetor com os coeficientes da função de custo, etc., para serem usados pelo programa de otimização via método de pontos interiores;
- Cálculo dos coeficientes da matriz F para cálculo dos fluxos nas linhas após a solução do FPO.

IPED emprega as seguintes sub-rotinas:

- INCADJ -Determina a lista de adjacências das barras e a lista de incidência dos ramos para a rede elétrica;
- BMATRIX -Calcula a matriz B para a rede elétrica.

2. **IPQUAD** -Executa a otimização via método de pontos interiores baseado no algoritmo Primal/Dual e empregando um método de solução ortogonal para o problema dos mínimos quadrados. **IPQUAD** chama as seguintes sub-rotinas:

- GIVSOL - Sub-rotina principal da solução ortogonal, baseada no uso de rotações de Givens, que chama por sua vez as sub-rotinas abaixo:

- GIVENS -Aplica rotações de Givens a uma matriz retangular. As rotações individuais são aplicadas na sub-rotina ROTN;
 - SBSTINV -Executa a substituição inversa para resolver uma matriz triangular superior.
 - TUVCOMP - Calcula os vetores do erro nos cálculos que são usados para avaliar a viabilidade primal e dual das soluções intermediárias e finais obtidas via método de pontos interiores;
 - SIMNORM - Função para calcular a norma infinita de um vetor dado.
3. **FLOW** - lê os resultados de **IPED** e de **IPQUAD** e imprime-os, usando um formato similar às saídas do fluxo de potência. Imprime também os índices de desempenho relacionados à solução do método de pontos interiores.

A comunicação entre **IPED** e **IPQUAD** e entre **IPQUAD** e **FLOW** é feita através de arquivos intermediários, **IPED.IP**, **IPED.FLW** e **IPQUAD.FLW**. Além destes arquivos, são criados arquivos para leitura das variáveis em cada etapa da solução. **IPED** gera um arquivo *fname.lst* e **IPQUAD** gera um arquivo *fname.ip*, sendo que *fname* pode ser qualquer nome utilizado para identificar o arquivo de dados contendo no máximo 9 caracteres, excluindo caracteres especiais (caracteres “_” e “-” são porém permitidos). O arquivo *fname.lst* apresenta como as variáveis do sistema foram lidas, os elementos não nulos da matriz B e a matriz F para cálculo dos fluxos nas linhas. O arquivo *fname.ip* apresenta a leitura da matriz de restrições, do vetor independente, do valor inicial para as variáveis, a norma do vetor solução de cada iteração até a convergência ou até atingir o número máximo de iterações, e o vetor final das variáveis primais e duais.

A versão atual de **QED** não emprega técnicas de esparsidade. Conseqüentemente, a versão atual do programa não é apropriada para a aplicação em redes elétricas de grande porte.

A figura 1 representa a interconexão entre os programas **IPED**, **IPQUAD** e **FLOW**, como também os arquivos intermediários e arquivos de saída que são criados durante a execução. O programa **QED** simplesmente concatena a execução dos três programas acima.

2. Dados de entrada para o programa QED

Os dados de entrada para **QED** são lidos pelo programa **IPED** e devem fazer parte de um arquivo denominado *fname.dat*, onde o *fname* é um nome especificado pelo usuário contendo no máximo 9 caracteres, excluindo caracteres especiais (caracteres “_” e “-” são porém permitidos). As linhas do arquivo *fname.dat* que contém os dados de entrada devem ser organizadas conforme descrito abaixo:

1. Título para o problema que está sendo resolvido, a ser especificado em no máximo 80 posições da primeira linha do arquivo;
2. Número de barras, n , número de ramos da rede, nl , e potência-base, Sb , em MVA, lidos da seguinte forma:

Colunas	Parâmetro	Tipo	Formato
08 – 10	Número de barras, n	Inteiro	I3
18 – 20	Número de ramos da rede, nl	Inteiro	I3
27 – 30	Potência-base (MVA)	Real	F6.2

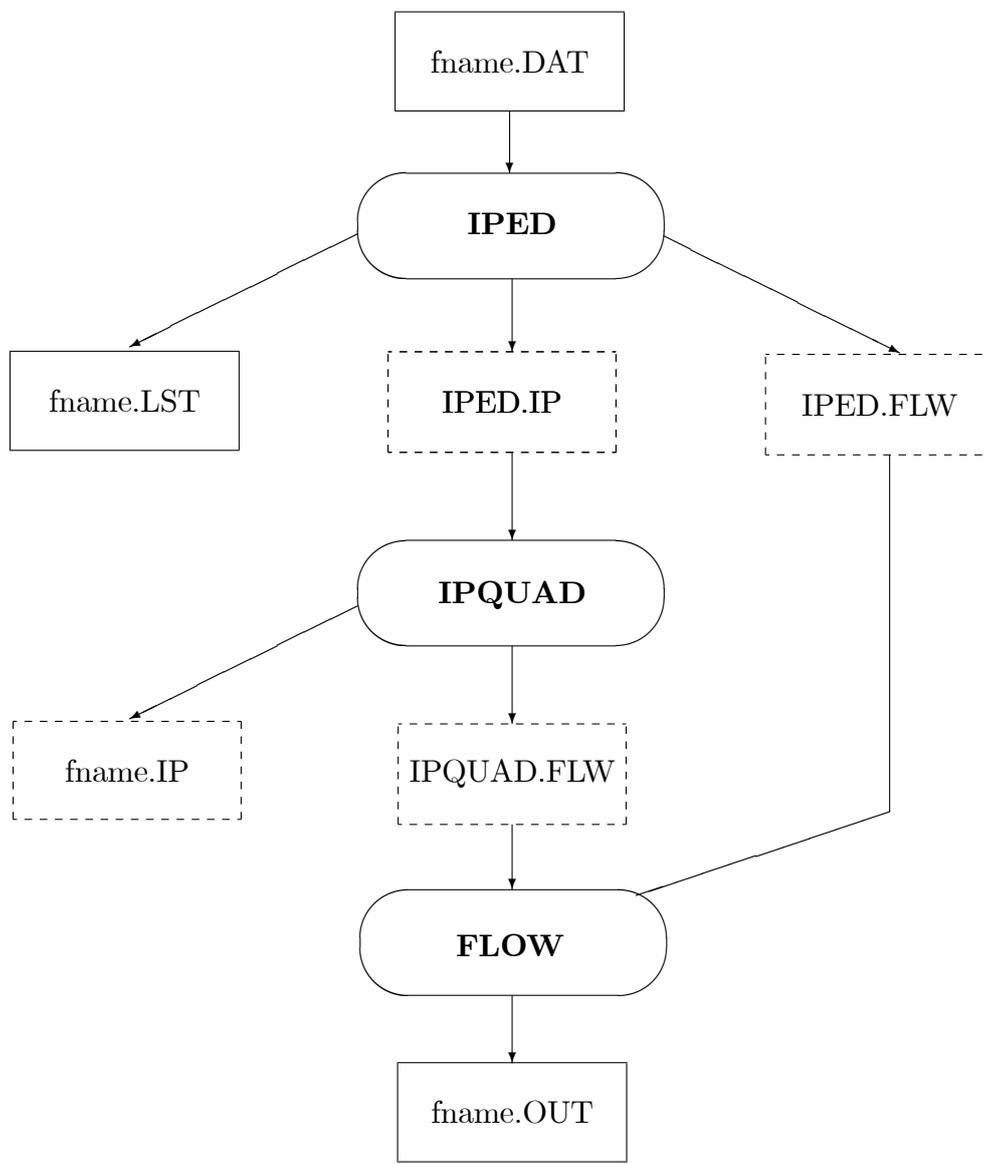


Figura 1: Estrutura do programa **QED**. Linhas pontilhadas representam os arquivos intermediários durante a execução.

Nota 1. Os números inteiros (formato **I**), diferentemente dos reais (formato **F**), devem ser especificados sem ponto. Além disso, os dados devem sempre estar alinhados **à direita** nas respectivas células. Como exemplo, os dados de um sistema de 20 barras e 35 ramos, cuja potência base é de 100 MVA, seriam especificados como:

colunas → 1 9 10 19 20 25 26 27 28 29 30
dados →

	...	2	0	...	3	5	...	1	0	0	.	0	0
--	-----	---	---	-----	---	---	-----	---	---	---	---	---	---

No formato “**In**”, n representa o número de colunas a ser utilizado par a especificação do parâmetro inteiro. No formato “**Fn.d**”, n tem a mesma definição usada em “**In**” e d é o número de casas decimais do valor a ser especificado. Regras semelhantes se aplicam para todos os itens abaixo.

3. Dados de ramo - um conjunto de nl linhas de dados de ramo, sendo uma linha de dados para cada ramo da rede, contendo os seguintes dados: *barra de origem*, *barra de destino*, *reatância série (pu)*, *limite superior para o fluxo de potência na linha (MW)*, *limite inferior para o fluxo de potência na linha (MW)*, com o seguinte formato:

Colunas	Parâmetro	Tipo	Formato
08 – 10	<i>Barra de origem</i>	Inteiro	I4
18 – 20	<i>Barra de destino</i>	Inteiro	I4
24 – 30	<i>Reatância série (pu)</i>	Real	F6.2
34 – 40	<i>Limite superior para o fluxo de potência (MW)</i>	Real	F6.2
44 – 50	<i>Limite inferior para o fluxo de potência (MW)</i>	Real	F7.2

4. Tipo da barra - vetor *bustype* de tamanho n com os identificadores inteiros dos tipos de barra. $bustype(i) = 0$, se a barra i for uma barra da carga; $bustype(i) = 1$, se a barra i for uma barra da geração; $bustype(i)=2$, se a barra i for a barra da referência e $bustype(i)=3$, se a barra i for a barra de geração negativa. As colunas onde aparecem os identificadores devem ser múltiplas de 10. Portanto, o identificador de tipo da barra i deve ser especificado na coluna $10 * i$;
5. Dados das barras - os dados das barras são lidos *em ordem de numeração ascendente* das barras. Os dados de entrada variam de acordo com o tipo da barra:

- Se a barra i for uma barra da carga, especifique somente a carga correspondente da barra (em MW) (campos a e b da Tabela 2);
- Se a barra i for uma barra de geração, entre com: *carga da barra (MW)*, *termo constante da função custo*, *coeficiente linear da função custo*, *coeficiente quadrático da função custo*, *limite da geração superior (MW)*, *limite de geração inferior (MW)* (campos a a f da Tabela 2);
- Se a barra i for a barra da referência, especifique os mesmos dados de uma barra de geração (campos a a f da Tabela 2);
- Se a barra i for uma "barra de geração negativa", entre com: *carga da barra (MW)*, *termo constante da função-custo*, *coeficiente li-near da função-custo*, *coeficiente quadrático da função-custo* (campos a a d da Tabela 2).

A Tabela 2 apresenta o formato de entrada dos dados de barra:

Tabela 2 - Dados de barra

Campo	Colunas	Parâmetro	Tipo	Formato
<i>a</i>	05 – 10	<i>Carga da barra (MW)</i>	Real	F6.2
<i>b</i>	15 – 20	<i>Termo constante da função-custo (\$/h)</i>	Real	F6.2
<i>c</i>	25 – 30	<i>Coefficiente linear da função-custo (\$/MWh)</i>	Real	F6.2
<i>d</i>	33 – 40	<i>Coefficiente quadrático da função custo (\$/MW²h)</i>	Real	F8.6
<i>e</i>	45 – 50	<i>Limite da geração superior (MW)</i>	Real	F6.2
<i>f</i>	55 – 60	<i>Limite de geração inferior (MW)</i>	Real	F6.2

Nota 2. A forma padrão das funções-custo de geração para o problema de otimização resolvido por **QED** é:

$$F(p) = c_0 + c^T + \frac{1}{2} p^T \cdot Q \cdot p$$

A definição acima é usada para definir os coeficientes de custos das barras de geração e das barras de "geração negativa". Observe que: **(1)** a presença do fator 1/2 na definição pode exigir ajuste do valor de *Q* nas funções-custo dos problemas a serem submetidos a **QED**; **(2)** Os sinais de ambos coeficientes *c* e *Q* devem ser sempre positivos, independente do tipo de barra (a distinção entre as barras de geração e as barras de "geração negativa" é feita internamente durante a execução do programa).

- Número máximo de barras, *nbmax* (= 100), e número máximo de linhas, *nlmax* (= 150), para dimensionamento de variáveis usadas nas rotinas. Ambos os parâmetros são inteiros, sendo que *nbmax* deve ser declarado colunas 8 a 10 e *nlmax* nas colunas 18 a 20.;
- Parâmetros inteiros para dimensionamento da matriz de restrições, *ndc* (dimensão para o número dos restrições, igual a 500) e *ndp* (dimensão para o número de variáveis primais, também igual a 500). Usar mesmos formatos de entrada do item anterior;
- Parâmetros de especificação de limites, controles e tolerâncias: *maxit* (número máximo de iterações para o método de pontos interiores), *iprint* (parâmetro inteiro > 0 para controle do nível de detalhes da saída), *epsln* (tolerância para convergência do programa de otimização via método de pontos interiores), *epslgiv* (definição de zero para a rotina de rotações de Givens), *epslnp* (definição de zero para impressão), *epslim* (tolerância para verificação dos limites em **FLOW**). Sugestão de valores a serem especificados: respectivamente, 20, 0, 1×10^{-08} , 1×10^{-35} , 1×10^{-6} , 1×10^{-10} . Formatos de entrada:

Colunas	Parâmetro	Valor a ser especificado	Tipo	Formato
09 – 10	<i>maxit</i>	20	Inteiro	I2
20	<i>iprint</i>	0	Inteiro	I1
24 – 30	<i>epsln</i>	1.0D – 08	Real	D7.1
34 – 40	<i>epslgiv</i>	1.0D – 35	Real	D7.1
44 – 50	<i>epslnp</i>	1.0D – 06	Real	D7.1
54 – 60	<i>epslnp</i>	1.0D – 10	Real	D7.1

Nota 3. O formato “ $Dn.d$ ” é utilizado para precisão dupla e notação de Engenharia. O parâmetro n representa o número de colunas do campo e d é o número de casas decimais do valor a ser especificado.

9. Parâmetros adicionais para método de otimização: ρ , $bigM$, e σ . Valores sugeridos: 0.99, 1×10^5 , e 0.1, respectivamente. Formatos de entrada:

Colunas	Parâmetro	Valor a ser especificado	Tipo	Formato
07 – 10	ρ	0.99	Real	F4.2
14 – 20	$bigM$	$1.0D + 05$	Real	D7.1
24 – 30	σ	$1.0D - 01$	Real	D7.1

3. Descrição da saída

A saída gerada pelo **QED** estará contida no arquivo *fname.out*, onde *fname* é o mesmo nome dado pelo usuário ao arquivo de dados de entrada. A saída é composta de:

1. Título do problema que está sendo resolvido;
2. Componentes da função-custo para os geradores conectados à barra de referência, às barras de geração e às barras de “geração negativa” (se existirem);
3. Variáveis das barras - para cada barra, os seguintes dados são impressos: número da barra, tipo de barra, valor da tensão (= 1,0 pu) e respectivo ângulo de fase, custo marginal da barra λ_i (\$/MWh), geração atual para atendimento da carga (MW), limites superior e inferior do gerador conectado à barra (em MW), multiplicador de Lagrange correspondente, π_g , (impresso somente se um dos limites é atingido), e carga da barra (em MW);
4. Fluxo nas linhas - para cada linha da rede, os seguintes dados são relatados: número da linha, barra de origem, barra de destino, fluxo de potência ativa (em MW), limites superior e inferior de fluxo de potência da linha (em MW), e multiplicador de Lagrange correspondente, π_t (impresso somente se um dos limite é atingido);
5. Valor final da Função Custo;
6. Índices de desempenho para o método de pontos interiores: número das iterações necessários à convergência, valor final do parâmetro de barreira μ , *gap* complementar e índices de factibilidade primal e dual.