

# Capítulo 9

## Representação do Sistema Externo

### 9.1 Introdução

Uma adequada representação do sistema externo (SE) em estudos de análise de segurança permite se determinar com precisão razoável a reação externa a contingências simuladas no sistema interno (SI). É importante deixar claro, antes de mais nada, o que significa neste contexto o termo “Sistema Externo”. Esta expressão refere-se a partes não-monitoradas do sistema interconectado cuja reação a uma contingência no SI se deseja avaliar. Isto se aplica em geral às redes elétricas de outras empresas adjacentes àquela sob cuja jurisdição está o SI. Contudo, o SE pode também incluir partes do sistema desta última empresa que não são monitoradas. Em suma, o termo “sistema interno” refere-se à parte monitorada da rede elétrica de uma dada empresa, enquanto o “sistema externo” inclui tanto as redes das companhias vizinhas quanto as partes não-monitoradas da rede da empresa em questão.

Por vários anos, a reação do SE foi representada exclusivamente através dos chamados *equivalentes externos*, isto é, de modelos reduzidos do SE conectados às barras da fronteira entre o SI e o SE. Recentemente, entretanto, a crescente disponibilidade de memória dos computadores digitais utilizados nos Centros de Operação vem viabilizando o uso das chamadas *representações explícitas ou não reduzidas* para o SE. As seções seguintes tratam destes dois tipos de representação.

### 9.2 Equivalentes Externos

A modelagem dos sistemas externos (não-monitorados) conectados ao sistema em estudo (sistema Interno) é muito importante em análise de segurança. Um equivalente externo deve ser capaz de representar convenientemente as reações do SE a contingências no Sistema Interno (SI).

Em estudos *on-line*, a dificuldade para a determinação do equivalente externo é a limitação na quantidade de informação disponível a cerca do SE. As pesquisas realizadas sobre Equivalentes Externos seguem basicamente duas linhas:

- Equivalentes Topológicos - Calculados para uma condição *off-line* para a qual se dispõe de dados sobre o sistema global, sendo posteriormente acoplados com o SI. A redução é baseada em técnicas topológicas.

- Equivalentes Não-Topológicos - Não fazem uso de informação prévia sobre o SE e são calculados por técnicas de identificação.

Aqui, serão estudados apenas os equivalentes do tipo topológico.

### Histórico:

O primeiro equivalente utilizado para a representação do sistema externo em Sistemas de Potência foi o Equivalente de Ward, proposto para uso em estudos que utilizavam os antigos Analisadores de Rede analógicos. Nestes estudos, os equivalentes se faziam necessários dada a limitação de dimensão dos problemas que poderiam ser estudados nos Analisadores de Rede. Mais tarde, o equivalente de Ward foi empregado em estudos *off-line* de fluxo de potência em computador digital. O equivalente era então restrito a partes do sistema com pouco efeito sobre os resultados finais.

O advento das funções de análise de segurança e uso de mini-computadores implicaram no aumento das restrições quanto ao tempo de computação e uso de memória. Os equivalentes começaram então a ter mais influência nos resultados, evidenciando as limitações do equivalente clássico. Em conseqüência, os esforços de pesquisa sobre Equivalentes Externos foram intensificados no final da década de 70 e nos anos 80, resultando em modificações no método de Ward e proposição de novos equivalentes, como por exemplo o equivalente REI, os métodos baseados em identificação, etc.

### 9.2.1 Equivalente Ward Linear

Considere que o sistema global formado pelo SI, SE e as barras de fronteira (ver Fig. 9.1) é representado de acordo com a formulação nodal das equações da rede elétrica por:

$$\mathbf{Y}\mathbf{E} = \mathbf{J} \quad (9.1)$$

onde,  $\mathbf{Y}$  é matriz de admitância nodal,  $\mathbf{E}$  é o vetor de tensões nodais e  $\mathbf{J}$  é o vetor das injeções de corrente nas barras. Particionando a Eq. (9.1) de acordo com a pertinência das barras ao SE, à fronteira e ao SI, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} & 0 \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_E \\ E_F \\ E_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_E \\ J_F \\ J_I \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

Da equação contida em (9.2) relativa ao SE, tem-se que:

$$Y_{EE}E_E + Y_{EF}E_F = J_E$$

de onde

$$E_E = Y_{EE}^{-1}(J_E - Y_{EF}E_F) \quad (9.3)$$

Substituindo a Eq. (9.3) na equação contida em (9.2) referente às barras de fronteira, obtém-se:

$$Y_{FE}Y_{EE}^{-1}(J_E - Y_{EF}E_F) + Y_{FF}E_F + Y_{FI}E_I = J_F$$

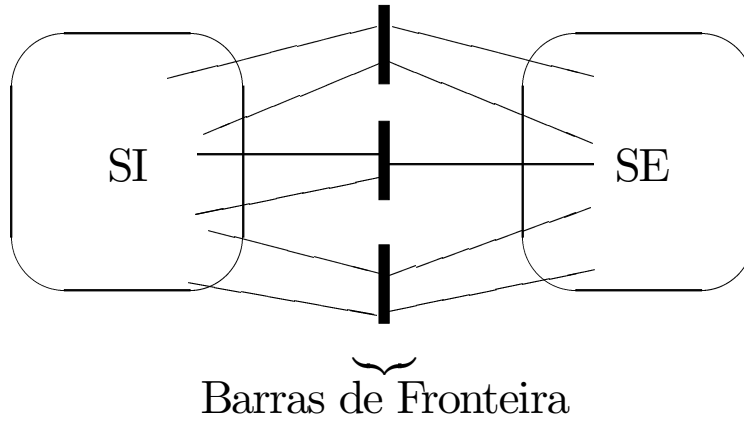


Figura 9.1: Partição do Sistema de Potência em Sistema Interno, Sistema Externo e Fronteira

ou

$$(Y_{FF} - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF})E_F + Y_{FI}E_I = J_F - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}J_E$$

Definindo:

$$Y_{FF}^{Eq} \triangleq (Y_{FF} - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF}) \quad (9.4)$$

$$J_F^{Eq} \triangleq J_F - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}J_E \quad (9.5)$$

resulta a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} Y_{FF}^{Eq} & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_F \\ E_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_F^{Eq} \\ J_I \end{bmatrix} \quad (9.6)$$

ou

Verifica-se portanto que a matriz  $Y_{FE}Y_{EE}^{-1}$  distribui as injeções originais do SE sobre as barras de fronteira. das Eqs. (9.4) e (9.5), observa-se também que somente as barras de fronteira são afetadas pelo equivalente. Em geral, estas barras tornam-se completamente interconectadas quando o SE é substituído por seu equivalente. Além disso, as injeções de corrente nas barras de fronteira serão modificadas para refletir o efeito das injeções nas barras do SE, que deixam de ser representadas com o uso do equivalente.

A redução descrita acima independe do ponto de operação, já que Ward considerou geradores e cargas como dispositivos de injeção de corrente constante. Entretanto, as injeções variam com as condições de carregamento, e portanto com o ponto de operação. Para levar em conta esta variação, as injeções de corrente devem ser transformadas em injeções de potência nas barras de fronteira, gerando o Equivalente de Ward na forma não-linear, que será visto em seguida.

As cargas podem ser representadas por admitâncias constantes, calculadas para um dado ponto de operação. Isto transforma em zero o elemento correspondente do vetor das injeções de corrente e adiciona um elemento  $\Delta Y$  ao elemento diagonal correspondente de  $Y_{FF}$ . Desta forma  $Y$  torna-se também dependente do ponto de operação.

### 9.2.2 Equivalente de Ward Através de Eliminação de Gauss

Uma abordagem alternativa para a dedução do equivalente de Ward baseia-se no emprego do método de eliminação de Gauss. Considere novamente a equação do sistema global:

$$\begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} & 0 \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_E \\ E_F \\ E_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_E \\ J_F \\ J_I \end{bmatrix}$$

Através de operações elementares por linha, podemos eliminar o bloco (2, 1), correspondente à matriz  $Y_{FE}$ , como segue:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} & 0 & J_E \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} & J_F \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} & J_I \end{bmatrix} &\Rightarrow \begin{bmatrix} I & Y_{EE}^{-1}Y_{EF} & 0 & Y_{EE}^{-1}J_E \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} & J_F \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} & J_I \end{bmatrix} \\ &\Rightarrow \begin{bmatrix} -Y_{FE} & -Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF} & 0 & -Y_{FE}Y_{EE}^{-1}J_E \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} & J_F \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} & J_I \end{bmatrix} \\ &\Rightarrow \begin{bmatrix} -Y_{FE} & -Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF} & 0 & -Y_{FE}Y_{EE}^{-1}J_E \\ 0 & Y_{FF} - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF} & Y_{FI} & J_F - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}J_E \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} & J_I \end{bmatrix} \\ &\Rightarrow \begin{bmatrix} -Y_{FE} & -Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF} & 0 & -Y_{FE}Y_{EE}^{-1}J_E \\ 0 & Y_{FF} - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF} & Y_{FI} & J_F - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}J_E \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} & J_I \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Tendo desacoplado as variáveis de fronteira e do SI das variáveis do SE, estas últimas podem ser agora eliminadas, resultando em:

$$\begin{bmatrix} Y_{FF} - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}Y_{EF} & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_F \\ E_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_F - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}J_E \\ J_I \end{bmatrix}$$

que corresponde à Eq. (9.6) deduzida anteriormente. O método baseado na eliminação de Gauss é frequentemente o preferido na prática.

### 9.2.3 Cálculo das Injeções Equivalentes em Tempo Real

A expressão para as injeções equivalentes nas barras de fronteira é

$$J_F^{Eq} = J_F - Y_{FE}Y_{EE}^{-1}J_E$$

Portanto,  $J_F^{Eq}$  depende de  $J_E$ , que em geral não é conhecida em tempo real. Contudo, o estimador de estados fornece o vetor de estados corrente, de modo que é possível, após a redução da rede externa, se calcular o fluxo nas linhas que incidem nas barras de fronteira.

Assim, para um nó de fronteira  $k$  qualquer,

$$J_k^{Eq} = \sum_{l \in \Omega_k} J_{kl}$$

onde  $\Omega_k$  é o conjunto de barras adjacentes à barra de fronteira  $k$ .

### 9.2.4 Equivalente de Ward na Forma Não-Linear

Se as injeções nodais forem representadas por potências complexas ao invés de correntes, obtém-se o Equivalente de Ward na forma não-linear. Neste caso, as injeções equivalentes nas barras de fronteira são calculadas como:

$$\begin{aligned} P_k^{Eq} &= V_k^0 \sum_{l \in \Omega_k} (G_{kl}^{Eq} \cos \delta_{kl} + B_{kl}^{Eq} \sen \delta_{kl}) V_l^0 \\ Q_k^{Eq} &= V_k^0 \sum_{l \in \Omega_k} (G_{kl}^{Eq} \sen \delta_{kl} - B_{kl}^{Eq} \cos \delta_{kl}) V_l^0 \end{aligned}$$

onde  $G_{kl}^{Eq} + jB_{kl}^{Eq}$  é o elemento  $(k, l)$  da matriz admitância reduzida,  $\delta_{ik} \triangleq \delta_i - \delta_k$ ,  $V_k^0 \angle \delta_k$  é a tensão na barra  $k$  para o caso base fornecida pelo estimador de estados, e  $\Omega_k$  é o conjunto de barras adjacentes às barras de fronteira.

Esta forma do modelo equivalente é conveniente para ser usada com estudos de fluxo de potência.

### 9.2.5 Algoritmo Para a Obtenção do Equivalente de Ward

1. Desconectar todos os elementos ligados a terra existentes na rede externa (cargas, geradores, reatores, capacitores, elementos em derivação de linhas e transformadores, etc.);
2. Formar  $\mathbf{Y}_{barra}$  para o sistema formado pela rede externa + fronteira:

$$\begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} \\ Y_{FE} & Y_{FF}^{Eq} \end{bmatrix}$$

onde  $Y_{FF}^{Eq}$  é uma matriz diagonal;

3. Reduzir o sistema externo através do método de eliminação de Gauss. As equações resultantes indicam que as barras de fronteira ficarão completamente interconectadas;
4. Acoplar o equivalente externo à rede interna:

(a) Matriz de admitância:

$$Y^{Eq} = \begin{bmatrix} Y_{II} & Y_{IF} \\ Y_{FI} & Y_{FF}^I + Y^{red} \end{bmatrix}$$

onde  $Y_{FF}^I$  contém as ligações do tipo  $F - I$  e ligações do tipo  $F - F$  originais.

- (b) Injeções Equivalentes:  $P_k^{Eq} + jQ_k^{Eq}$ , calculadas a partir do estado corrente e da matriz  $Y^{Eq}$  do item 4a acima.

### 9.2.6 Equivalente de Ward × Representação da Potência Reativa

Na aplicação prática do Equivalente de Ward, verifica-se que é possível se obter resultados muito bons para potência ativa, mas a representação da reação do sistema externo quanto à potência reativa (e conseqüentemente os resultados para as tensões) não apresentam precisão aceitável. Isto se prende ao fato de que o equivalente não distingue as barras do tipo PV do SE.

### 9.2.7 Equivalente de Ward com retenção de Barras PV

Na redução da rede, não são eliminadas as barras PV que possam afetar a rede interna quando da análise de contingências. Assim, obtém-se um equivalente constituído das barras internas, barras de fronteira e barras PV do sistema externo, conforme mostrado na Fig. 9.2.

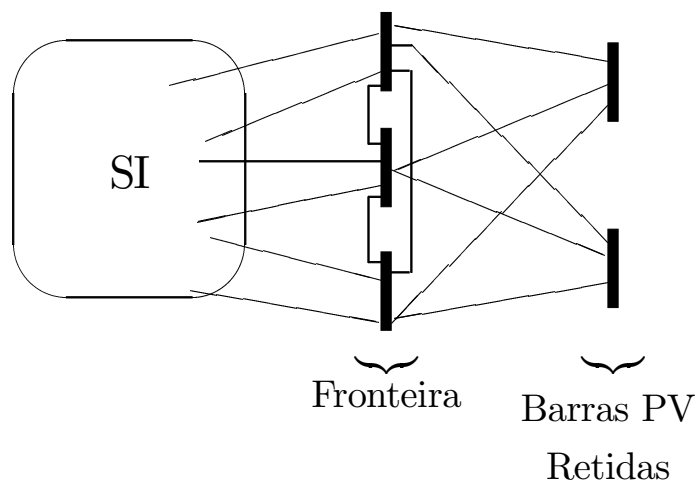


Figura 9.2: Equivalente de Ward com barras PV retidas

O método sofre entretanto de limitações quanto ao número de barras PV retidas. O aumento do número destas barras implica em um aumento significativo da dimensão do problema, uma vez que a rede formada pelas barras de fronteira e barras PV retidas forma um grafo completo, isto é, é inteiramente malhada. Em conseqüência, a matriz de admitância equivalente correspondente é inteiramente densa. O problema pode ser aliviado se um número relativamente baixo de barras PV retidas for suficiente para representar a resposta de potência reativa do SE a contingências no SI. Alternativamente, os equivalentes Ward estendidos descritos abaixo constituem-se em opção computacionalmente mais atraente para contornar o problema.

O cálculo das injeções equivalentes sofre as seguintes modificações:

1. Determinar o estado da rede equivalente. Para isso, resolve-se um fluxo de carga para os sistema *barras de fronteira + barras PV externas retidas*;

As barras de fronteira são consideradas barras de folga ( $V$  e  $\delta$  especificados, conforme o estado corrente), e as barras PV são consideradas como tal ( $P$  e  $V$  são *estimados*; na falta de boas estimativas, os valores  $P = 0$ ,  $V = 1,0 pu$  podem ser utilizados);

2. De posse dos estados do SI e da fronteira (fornecidos pelo estimador de estados) e dos estados das barras PV retidas (obtidos através do passo 1 acima), as injeções  $P_k^{Eq}$  e  $Q_k^{Eq}$  podem ser calculadas.

### 9.2.8 Equivalente de Ward Estendido

Este método de construção do equivalente externo não preserva as barras PV do SE. Ao invés disto, utiliza um dispositivo de ajuste das injeções de potência reativa nas barras da fronteira na tentativa de representar o efeito das barras PV do SE que foram eliminadas na redução. Há duas versões para o Equivalente de Ward Estendido.

#### Versão (a)

Nesta versão, as linhas que interconectam as barras de fronteira e as injeções equivalentes são determinadas como no Equivalente de Ward Clássico. As diferenças com o método convencional residem na presença de linhas fictícias conectando as barras da fronteira a barras PV fictícias radiais com respeito às barras de fronteira, conforme indicado na Fig. 9.3. Para estas barras, considera-se que  $P_k = 0$  e  $V = V_k$ , onde  $V_k$  é a tensão na barra de fronteira conectada à barra PV de calibração. Portanto, os fluxos nas linhas fictícias para o caso base são nulos.

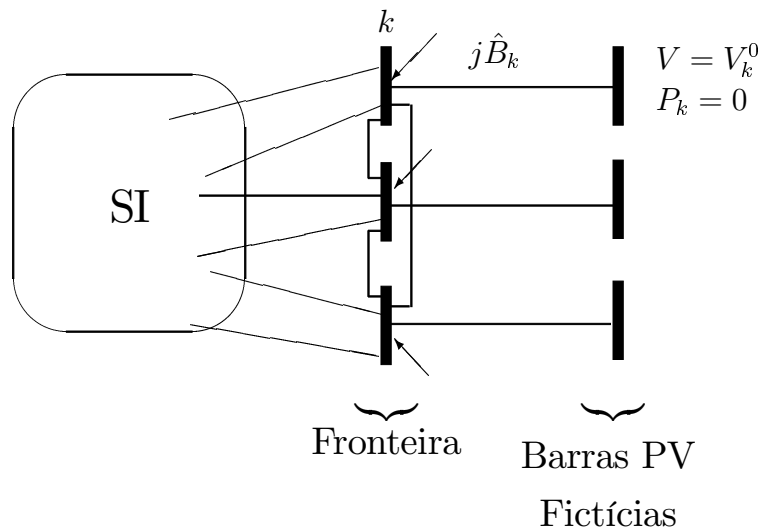


Figura 9.3: Equivalente de Ward Estendido, versão (a).

Quando  $V_k \neq V_k^0$  (o que acontece, por exemplo, como consequência de uma contingência no SI), a barra PV fictícia injeta ou retira reativos que representam aproximadamente o efeito das barras PV externas que foram eliminadas na redução do SE. As injeções de potência reativa neste caso são dadas por:

$$\Delta Q_k = V_k \widehat{B}_k \Delta V_k$$

onde  $\Delta V_k = V_k^0 - V_k$ .

As barras PV fictícias não necessitam ser introduzidas explicitamente na rede: a cada iteração do fluxo de carga, as correções podem ser usadas para re-especificar as injeções de potência reativa nas barras da fronteira, e os elementos  $\hat{B}_k$  devem ser adicionados à diagonal principal de  $B''$ .

### Versão (b)

Na versão (b), os ramos de calibração são ramos em derivação para a terra conectados às barras de fronteira, sendo a admitância do ramo de calibração igual a  $j\hat{B}_k/2$  (ver Fig. 9.4).

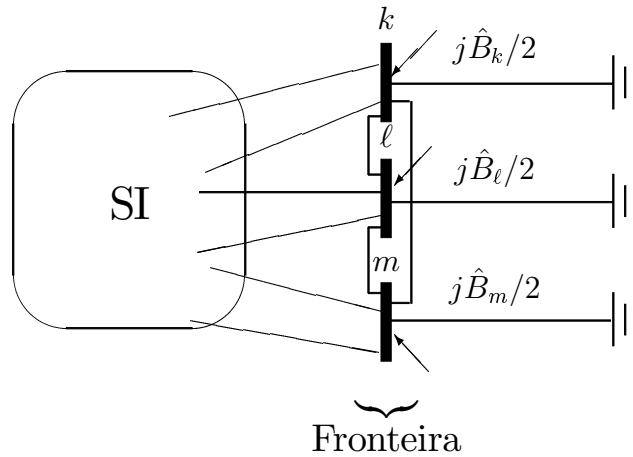


Figura 9.4: Equivalente de Ward Estendido, versão (b).

Neste caso, a variação de injeção de potência reativa  $Q$  na barra  $k$  por efeito de uma variação de tensão  $\Delta V_k$  é dada por:

$$\Delta Q_k = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} \Delta V_k = \left[ \frac{\partial}{\partial V_k} \left( V_k^2 \frac{\hat{B}_k}{2} \right) \right]$$

ou

$$\Delta Q_k = V_k \hat{B}_k \Delta V_k$$

e portanto

$$[\Delta Q_k]_{\text{versão (a)}} = [\Delta Q_k]_{\text{versão (b)}}$$

Na versão (b) o elemento adicionado à diagonal de  $B''$  é igual a:

$$\frac{1}{V_k} \left[ \frac{\partial}{\partial V_k} (Q_k^{sh}) \right] = \frac{1}{V_k} \times 2V_k \times \frac{B_k}{2} = B_k$$

que é o mesmo valor adicionado à diagonal na versão (a).



### Obtenção de $\widehat{B}_k$

A reação reativa do SE incluindo barras PV, é dada por:

$$\left[ \frac{\Delta Q^{red}}{V} \right] = B''_{red} \Delta V$$

onde,  $\Delta Q^{red}$  é o vetor das alterações nas injeções de potência reativa na fronteira provenientes do SE;  $\Delta V$  é o vetor dos desvios nas magnitudes de tensão das barras de fronteira;  $B''_{red}$  é a matriz  $B''$  do SE reduzido, do SE até à fronteira. (notar que as barras PV não aparecem explicitamente como linhas e colunas de  $B''$ ).

$\Delta Q^{red}$  tem duas componentes:

- Devido às susceptâncias equivalentes entre as barras da fronteira, que são conhecidas;
- Devida à parcela  $\widehat{B}_k$  dos elementos da diagonal principal, que corresponde às barras PV do SE, que é desconhecida

a partir destas observações e considerando as propriedades das matrizes de admitância, conclui-se que

$$\widehat{B}_k = \sum_l \left( B''_{red} \right)_{kl}$$

### 9.2.9 Mudanças na Topologia do Sistema Externo

Mudanças na configuração do SE próximas à fronteira podem afetar significativamente o desempenho do equivalente de Ward. É portanto aconselhável recalculá-lo sempre que tais mudanças forem detectadas.

### 9.2.10 Equivalente REI

A Fig.(9.5a) ilustra os princípios do Equivalente REI<sup>1</sup>. Nela aparece uma rede elétrica conectada a vários nós externos  $\{1, 2, \dots, n\}$ , cujas injeções de potência são  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , respectivamente. Na Fig.(9.5b), os nós  $1, 2, \dots, n$  são transformados em nós passivos e uma injeção equivalente  $S_R$ , igual à soma algébrica das injeções  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , é aplicada ao nó de referência  $R$ . O circuito REI deve distribuir  $S_R$  pelos nós originais. Para fazer isto mantendo invariante a potência líquida da rede, é exigido que o circuito REI tenha perdas ativas e reativas ambas nulas. Além disso, a estrutura do circuito REI deve assegurar que a potência líquida injetada no nó  $i$  seja igual à injeção original  $S_i$ .

Depois da transformação, os nós  $1, 2, \dots, n$  e outros nós possivelmente existentes no circuito REI podem ser eliminados, já que são agora nós passivos, sem que isto afete as condições dos nós restantes. A Fig.(9.5c) apresenta o resultado final da redução, após todos os nós passivos terem sido eliminados.

O circuito REI da Fig.(9.5b) é normalmente considerado como um circuito estrela, de forma mostrada na Fig.(9.6). As admitâncias indicadas são todas funções do ponto de operação e são calculadas de modo a garantir a exigência de perdas nulas.

<sup>1</sup> "Radial, Equivalent and Independent"

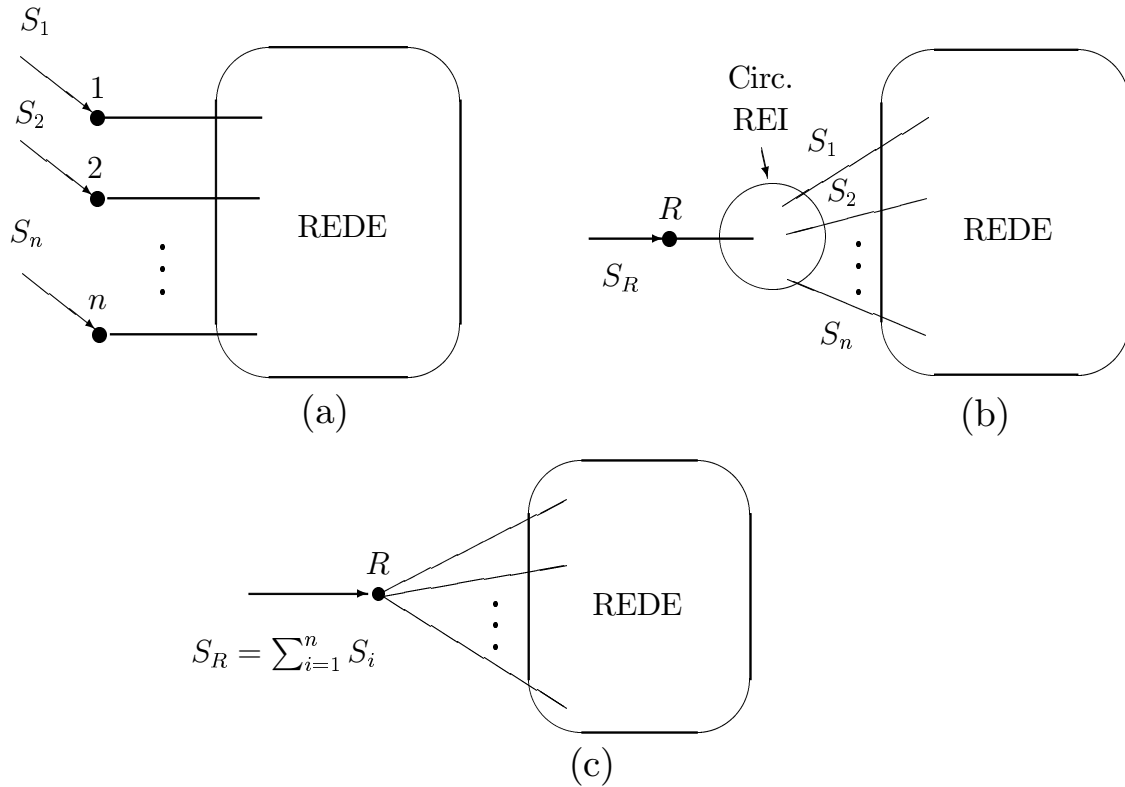


Figura 9.5: Equivalente REI

A eliminação dos nós  $1, 2, \dots, n$  e do nó  $G$  do circuito REI resulta em uma rede completamente malhada interconectando os nós de fronteira e o nó  $R$ .

Um ponto positivo do equivalente REI é a flexibilidade para agregação de diferentes tipos de nós externos em diferentes equivalentes. Por exemplo, as barras de geração do SE podem ser agregadas em um único equivalente, de modo que a geração de potência reativa do SE é adequadamente representada. As barras de carga, por outro lado, podem ser agregadas em outro equivalente.

Como desvantagem da abordagem REI, podemos citar a criação de ramos fictícios com valores de admitâncias, anormais, o que pode causar problemas numéricos para as rotinas de fluxo de potência. Além disso, a proliferação de nós equivalentes tende a causar um impacto negativo sobre a esparsidade.

O cálculo dos equivalentes é normalmente realizado “off-line”, para uma condição de operação pré-selecionada. Para uso “on-line”, em diferentes condições de operação, o equivalente deve ser calibrado para a nova condição. Vários métodos de calibração diferentes com esta finalidade foram propostos na literatura.

### 9.3 Representação Explícita do Sistema Externo

Os avanços da informática e a maior disponibilidade de memória dos computadores atuais tem conduzido a uma tendência para o uso de modelos não-reduzidos para os sistemas externos, em substituição aos modelos equivalentes. Atualmente, várias limitações são atribuídas aos equivalentes externos. Algumas das críticas são antigas, como por exemplo a sua incapacidade em refletir adequadamente as mudanças nas condições de operação,

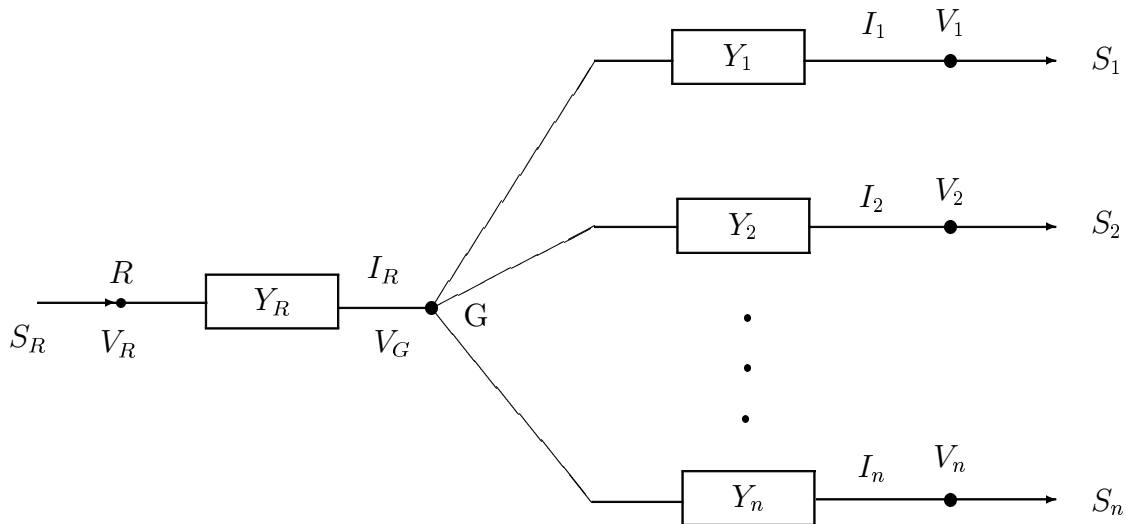


Figura 9.6: Circuito REI para o Equivalente da figura anterior

o que exige freqüentes atualizações dos equivalentes. Outras dificuldades tem sido apontados mais recentemente. Uma delas diz respeito à impossibilidade de se utilizar, nas atualizações dos equivalentes, dados oriundos do sistema de telemetria do SE ou dados de previsão sobre o SE disponíveis no SI. Tais dados são cada vez mais intercambiados entre empresas vizinhas. Outra crítica recente está relacionada às dificuldades de modelar eventos importantes no SE (por exemplo, saída de linhas, transformadores, unidades geradoras, etc.) e assim poder avaliar o impacto desses eventos sobre o SI. Isto é particularmente preocupante nos casos em que a dimensão do SE é comparável ou maior que a do SI. Estes problemas todos, aliados às maiores facilidades de processamento e armazenamento de dados, levaram à crescente adoção de modelos não-reduzidos para o SE.

Um modelo não-reduzido, ou *explícito*, para o SE nada mais é do que um modelo do tipo fluxo de potência, definido pela topologia e parâmetros de linhas e transformadores do SE, além de dados de previsões de carga, de tensões, de geração, “taps” de transformadores, etc. Informações sobre saídas de quaisquer dos equipamentos do SE são repassadas ao SI através de telefone ou de intercâmbio de dados “on-line” entre as empresas. A grande vantagem da representação explícita é a possibilidade de se modelar com fidelidade eventos importantes que ocorrem no SE e que podem ter grande impacto sobre o SI. Como desvantagens, podem ser citados: o maior tempo de processamento, resultante do aumento da dimensão do problema de estimação de estados (que agora inclui  $SI + SE$ ), e a necessidade de manutenção do modelo não-reduzido, que requer um nível razoável de interação entre empresas vizinhas.

Há basicamente duas classes de métodos para síntese de modelos não-reduzidos do SE:

- Métodos que utilizam o Fluxo de Potência;
- Métodos baseados na Estimação de Estados.

Estas duas classes de métodos serão descritas nas subseções seguintes.

### 9.3.1 Métodos Baseados no Fluxo de Potência

- **Etapas:**

1. Fluxo de Potência para o SE: barras de fronteira tratadas como barras de folga, com  $V$  e  $\theta$  obtidos da estimação de estados do SI. para o SI;
2. Fluxo de Potência para o SE: barras de fronteira tratadas como barras de folga, com  $V$  e  $\theta$  obtidos da estimação

- **Ponto Positivo:**

- Opções de controle convencionais do Fluxo de Potência (limites de  $V$  e  $Q$ ) podem ser considerados.

- **Problemas:**

- Barras de fronteira absorvem erros no SE (topologia, injeções)  $\Rightarrow$  discrepâncias significativas na fronteira;
- Incorporação de telemidas de fluxo do SE inviável.

### 9.3.2 Métodos Baseados na Estimação de Estados

Neste caso, há diversas variantes do método, que serão descritas a seguir.

#### Estimação de Estados em Um Passo com Dados Redundantes

- **Etapas:**

1. Cargas, gerações e tensões ajustadas e usadas como pseudomedidas;
2. Pseudomedidas de injeção usadas para tornar o SE observável;
3. Pesos das pseudomedidas ajustados para dispersar erros sobre o SE.

- **Ponto Positivo:**

- Quaisquer telemidas no SE podem ser utilizadas.

- **Problemas:**

- Requer uso de ponderação adequada para dispersar erros sobre o SE;
- Uso intenso de pseudomedidas de injeção  $\Rightarrow$  maior carga computacional;
- Diversidade de pesos  $\Rightarrow$  problemas numéricos;
- Contaminação do SI.

## Estimação de Estados em Um Passo com Dados Não-Redundantes

- **Etapas:**

1. Selecionar meds. críticas para SE;
2. Estimação de Estados para SI + SE.

- **Pontos Positivos:**

- Não requer diversidade de pesos;
- Qualquer informação disponível sobre o SE pode ser usada;
- Não necessariamente se baseia em pseudomedidas de injeção;
- Não há contaminação do SI.

- **Ponto Fraco:**

- Meds. críticas do SE têm que ser confiáveis.

## Estimação de Estados em Dois Passos

- **Etapas:**

1. Estimação de Estados para SI;
2. Dois passos para solução do SE:
  - (a) Fluxo de Potência para SE, barras de fronteira como barras de folga;
  - (b) Estimação de Estados para SI + SE, tal que:
    - *Dados p/. SI:* tensões e fluxos estimados, injeções nulas e injeções programadas na fronteira;
    - *Dados p/. SE:* fluxos obtidos do FP no passo (a), injeções nulas e telemidas.
3. Pesos diferentes para “medidas” do SI e SE.

- **Problemas:**

- Manipulação de pesos  $\Rightarrow$  riscos de probs. numéricos;
- Dificuldades para tratar mais do que um SE.