

Estimação de Estado em um Sistema de Energia

Pedro Henrique de Souza Guimarães

DEEC

FEUP

Porto, Portugal

up201800161@edu.fe.up.pt

Nº de estudante 201800161

Turma: E1

Margarida Inês de Almeida Borges

Pereira

DEEC

FEUP

Porto, Portugal

up201806141@edu.fe.up.pt

Nº de estudante 201806141

Turma: E1

Resumo— Os sistemas de controlo recebem dados que são processados pelo EMS (Energy Management System) ou DMS (Distribution Management System). Uma das suas funcionalidades mais importantes é a Estimação de Estado, dado que as medidas chegam afetadas de erros. Este trabalho procura estimar o estado de uma pequena rede, através do método dos mínimos quadrados ponderados, resolvido tanto no Matlab como no Excel, de modo a criar alguma redundância.

Palavras-Chave—EMS, medidas, mínimos quadrados ponderados, teste do chi-quadrado, normalização dos resíduos.

I. INTRODUÇÃO: OS CENTROS DE CONTROLO

Um centro de controlo recebe dados em tempo real, que utiliza para tomar decisões que visem o aumento da fiabilidade do sistema, assim como a sua operação eficiente. A partir das medições que recebe, o SCADA consegue monitorizar e processar os eventos que ocorrem, adotando medidas preventivas caso exista alguma perturbação. Com base nas medições, o SCADA pode tomar algumas ações de controlo, como a modificação das tomadas de transformadores, ou a adição de condensadores à rede.

Apesar disso, devido às diferentes classes de precisão dos aparelhos de medição, às avarias dos equipamentos de transmissão de dados, e até aos protocolos de informação, as medidas vêm afetadas de erros. Por exemplo, os erros acontecem quando as RTU (microprocessadores que transmitem dados por telemetria aos centros de controlo) funcionam sequencialmente, e não sincronamente, levando a que as medidas não cheguem no mesmo instante ao SCADA.

Conhecer o estado do sistema equivale a termos parâmetros que permitam exprimir todos os outros parâmetros do sistema por meio de equações: neste caso, as variáveis de estado são as tensões, em módulo e fase. O objetivo do trabalho será determinar um estimador mais preciso para as tensões, tendo por base o seguinte sistema:

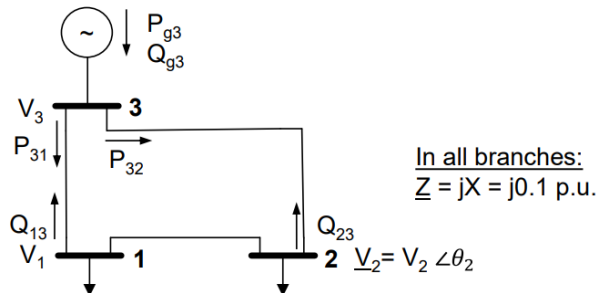


Figura 1. Sistema a analisar.

Como se pode ver, as linhas apenas têm reactância, o que prova que as perdas Joule são nulas. Isto leva a que,

por exemplo, o trânsito de potência ativa de 3 para 1 seja igual ao simétrico do trânsito de potência ativa de 1 para 3. No entanto, para a potência reativa, tal não sucede, porque, como a linha apresenta reactância, o sistema tem perdas reativas. Consideraremos, ainda, que o barramento 3 é o barramento de referência, o que leva a que a tensão neste tenha uma fase nula. Desprezamos, também, as admitâncias shunt das linhas. Sabendo disto, poderemos simplificar as equações do trânsito de potências:

Trânsito de potências no ramo $i - k$, no sentido de i para k :

$$\begin{cases} P_{ik} = \frac{R.V_i^2 - R.V_i.V_k \cdot \cos\theta_{ik} + X.V_i.V_k \cdot \sin\theta_{ik}}{R^2 + X^2} \\ Q_{ik} = \frac{X.V_i^2 - X.V_i.V_k \cdot \cos\theta_{ik} - R.V_i.V_k \cdot \sin\theta_{ik}}{R^2 + X^2} - V_i^2 \cdot \frac{\omega.C}{2} \end{cases}$$

Figura 2. Equações não simplificadas do trânsito de potências.

$$P_{ik} = \frac{V_i V_k \sin(\theta_i - \theta_k)}{X} \quad (1)$$

$$Q_{ik} = \frac{V_i^2 - V_i V_k \cos(\theta_i - \theta_k)}{X} \quad (2)$$

II. MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS

A. Construção do Método e Dados do Problema

O objetivo do método dos mínimos quadrados ponderados é a minimização da soma do quadrado dos erros das medidas, que é uma soma pesada pela respetiva variância. Pela fórmula da função objetivo, percebe-se que, quanto maior for a variância da medida, pior qualidade tem a medição e menos peso/importância esta vai ter. No fundo, este método atribui maior importância às medidas com menor variância:

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m (z_i - h_i(x_1, \dots, x_n))^2 \cdot \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3)$$

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m (z_i - h_i(x_1, \dots, x_n))^2 \cdot \frac{1}{\sigma_i^2} = \frac{1}{\sigma_i^2} \cdot \frac{[z - h(x)]^T \cdot W \cdot [z - h(x)]}{dx^T dx} \quad (4)$$

Primeiramente, definimos o vetor de variáveis de estado e o vetor de medidas:

Vetor de Estado	Vetor de Medidas Z	
V1	V1	1,02
V2	V2	0,9
V3	V3	1,06
theta1	P31	-1
theta2	P32	0,8
	Q13	-0,4
	Q23	-0,2
	Pg3	1,7
	Qg3	0,6
	theta2	-0,1

Figura 3. Vetor de estado e vetor de medidas (em pu).

Como temos 10 medidas e apenas 5 variáveis para identificar, percebemos que o sistema é observável, já que tem mais medições do que variáveis de estado.

A matriz $h(x)$ relaciona as medidas com as variáveis de estado, estabelecendo para elas equações (como as equações do trânsito de potências que vimos em (1) e (2)). Já $H(x)$ será, então, a matriz Jacobiana, que é a matriz das derivadas parciais de todas as funções $h(x)$, em ordem a cada variável de estado. W é a matriz dos pesos, e é uma matriz diagonal: os elementos da diagonal principal calculam-se a partir do inverso da variância de cada medida.

Neste caso, temos um problema não linear, pelo que devemos resolvê-lo através de métodos iterativos. Diz-se que o problema é não linear, porque a matriz H não é uma matriz de coeficientes constantes e porque $h(x)$ não é uma combinação linear de H . Usaremos, então, o método de Newton, que calculará o valor da variável de estado da próxima iteração a partir de incrementos, calculados através da expressão 4.

$$\Delta \hat{x} = [H(x)^T \cdot W \cdot H(x)]^{-1} \cdot H(x)^T \cdot W \cdot [z - h(x)] \quad (5)$$

O processo iterativo começa sempre com uma estimativa inicial, que pressupõe os módulos das tensões iguais a 1 e as fases iguais a zero. Para esta estimativa inicial, calcula-se $h(x^0)$, e $H(x^0)$.

```
while 1
    o1=x(1);
    o2=x(2);
    v1=x(3);
    v2=x(4);
    v3=x(5);
    % substitui-se os valores dos angulos e
    % tensões nos barramentos na
    % matrix do jacobiano
    H=subs(Hx,{O1,O2,V1,V2,V3},{o1,o2,v1,v2,v3});
    h=subs(hx,{O1,O2,V1,V2,V3},{o1,o2,v1,v2,v3});
    % O r aqui é o residuo
    r=z-h;
    r=vpa(double(r));
    deltaX=(inv(transpose(H)*W*H))*transpose(H)*W*r;
    %Atualiza-se o valor do vetor de
    %estado com os novos valores
    %calculados
    x=(x+transpose(deltaX));
    %Check constitui a minimização da função
    %objetivo com o objetivo de
    %ter um ideia se o método está a convergir
    %e se os valores estão a
    %ficar mais fiaveis.
    check=(double(transpose(r)*W*r));
    if abs(max(deltaX))<0.0001
        break;
    end
    i=i+1;
end
```

Figura 4. Implementação do método de Newton com o Matlab.

No entanto, antes de substituímos pelos valores, mostraremos as expressões genéricas das matrizes acima mencionadas, já previamente confirmadas com o Matlab:

Matriz h	
V1	V1
V2	V2
V3	V3
P31	$10V3V1\sin(\theta_3-\theta_1)$
P32	$10V3V2\sin(\theta_3-\theta_2)$
Q13	$10(V1^2-V1V3\cos(\theta_1-\theta_3))$
Q23	$10(V2^2-V2V3\cos(\theta_2-\theta_3))$
Pg3	$10(V3V1\sin(\theta_3-\theta_1)+V3V2\sin(\theta_3-\theta_2))$
Qg3	$10(V3^2-V3V1\cos(\theta_3-\theta_1)+V3^2-V3V2\cos(\theta_3-\theta_2))$
theta2	theta2

Figura 5. Matriz $h(x)$.

V1	V2	V3	theta1	theta2
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	1	0
$10V3\sin(\theta_3-\theta_1)$	$10V3\sin(\theta_3-\theta_2)$	$10V1\sin(\theta_1-\theta_3)$	$10V3V1^2\cos(\theta_1)$	$10V3V2^2\cos(\theta_2)$
$20V1-10V3\cos(\theta_3-\theta_1)$	$20V2-10V3\cos(\theta_3-\theta_2)$	$10V1^2\cos(\theta_3)$	$10V1^2V3^2\sin(\theta_1)$	$10V1^2V3^2\sin(\theta_2)$
$10^4-V3\sin(\theta_3-\theta_1)$	$10^4-V3\sin(\theta_3-\theta_2)$	$10V1\sin(\theta_1-\theta_3)+10V2\sin(\theta_2-\theta_3)$	$10^4V3^2-V1\cos(\theta_1)$	$10V3^2-V2\cos(\theta_2)$
$10^4-V3^2\cos(\theta_3-\theta_1)$	$10^4-V3^2\cos(\theta_3-\theta_2)$	$40V3-10V1\cos(\theta_3-\theta_1)-10V2\cos(\theta_3-\theta_2)$	$10V1V3\sin(\theta_1)$	$10V2V3\sin(\theta_2)$
0	0	0	0	1

Figura 6. Matriz $H(x)$, matriz Jacobiana.

[W]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000

Figura 7. Matriz W .

B. Resultados e Observações

Aplicando estas expressões, verificamos que o método convergiu à terceira iteração, porque o valor de Δx , a tolerância calculada, foi da ordem de grandeza de 10^{-4} . Os resultados de Δx para cada iteração podem ser visíveis na figura seguinte, sendo o resultado da iteração 3 o valor mais provável para os estimadores:

	Iteração 1	Iteração 2	Iteração 3
V1	0,979440559	1,001802907	1,001160015
V2	0,986713287	1,004515743	1,004116702
V3	1,013846154	1,031917058	1,031435111
theta1	0,028	0,027379722	0,027558414
theta2	-0,126	-0,122880793	-0,123317445

Figura 8. Resultados da estimação de estado.

De iteração para iteração, verifica-se que os valores dos resíduos diminuem, o que prova que nos aproximamos melhor da solução ótima. No entanto, para comparar os erros de cada medida, teremos de normalizar os resíduos, o que será feito mais à frente. Isto acontece porque as medidas não têm as mesmas unidades, logo, nada se pode concluir diretamente. Também se entende que, quanto mais nos aproximamos do ótimo, mais Δx se aproxima de zero. Isto sucede, porque as derivadas nos extremos das funções da

matriz [h] também tendem para zero. A partir dos resultados, observa-se que as medidas são diferentes dos valores estimados, provando, efetivamente, a existência de erros de medição.

Calculando o valor da função objetivo em cada iteração, verifica-se que a primeira iteração teve o maior valor da função objetivo: 623. Depois, para a segunda iteração, este valor diminuiu, passando a ser de, aproximadamente, 144.65262. Na terceira iteração, iteração para a qual o método converge, verificamos o menor valor da função objetivo, que passou a ser de 143.20359. Calcular o valor da função objetivo é útil para a secção seguinte, que incidirá sobre o teste do Chi-quadrado.

C. Implementação do Método com o Matlab

Para garantir a redundância, optou-se por implementar o método dos mínimos quadrados ponderados tanto no Excel como no Matlab. No Matlab, a primeira coisa a definir foi o vetor de estados, o vetor das medidas, Z, a matriz dos pesos, W, e a matriz h, já com as expressões indicadas na figura 4. Depois, procede-se ao cálculo da matriz Jacobiana, H, utilizando o comando “jacobian”.

De seguida, preparamo-nos para começar as iterações, definindo uma variável i que começa em zero. O ciclo acaba quando o método de Newton converge, isto é, quando Δx for inferior a 10^{-4} .

Será dentro do segundo while que implementaremos o resto das funcionalidades do código, funcionalidades referentes aos pontos II, III e IV do trabalho.

III. TESTE DO CHI-QUADRADO

A. Detecção de medidas com erros grosseiros

A função objetivo segue uma distribuição de probabilidade do tipo Chi-Quadrado com m-n graus de liberdade. É, então, possível aplicar o teste de hipóteses:

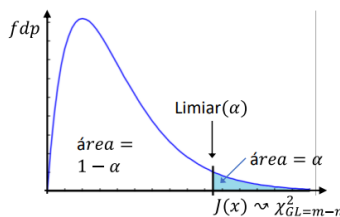


Figura 9. Distribuição de probabilidade de J(x).

Existem medidas com erros grosseiros se $J(x) \geq \alpha$, podendo-se observar que tal sucede com $(1-\alpha)*100\%$ de confiança. Se, por outro lado, $J(x) < \alpha$, não se pode afirmar, com $(1-\alpha)*100\%$ de confiança, que a hipótese seja verdadeira. α é, portanto, o nível de significância do teste e a probabilidade de $J(x) \geq \alpha$ é de $1-\alpha$. No fundo, a probabilidade de termos erros grosseiros diminui quanto maior for o valor de α .

Inicialmente, temos 10 medições e 5 variáveis de estado, o que prova que temos 5 graus de liberdade. Quando fazemos este teste para esta situação, ao colocar o valor da função objetivo obtido na terceira iteração no percentil, verificamos que α é um valor muito próximo de zero. Isto

porque a sua ordem de grandeza é de 10^{-29} . Com o Octave/Matlab, utilizando a função chi2cdf, temos:

$$\text{Chi2cdf}(143.2035959, 5) = 1 = 1 - \alpha \quad (6).$$

Como este valor é igual a 1, significa que α é igual a zero, tal como podemos ver na figura 9. Quer isto dizer que há uma grande probabilidade de ter medidas com erros grosseiros, e que esta probabilidade é de 100%. Para corrigir isso, é preciso normalizar os resíduos, calculando as covariâncias entre resíduos.

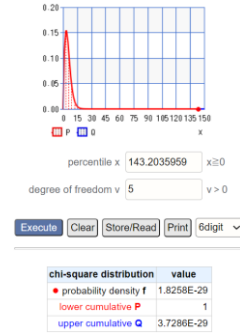


Figura 10. Resultado do teste do Chi-Quadrado.

B. Implementação do Teste de Hipóteses com o Matlab

Como vimos, o grau de liberdade é a diferença entre o número de linhas do vetor das medidas e o número de linhas do vetor de estado. Ou seja, temos m-n graus de liberdade, pelo que, com o Matlab, basta utilizar o comando “length” para sabermos quais as dimensões de cada um dos vetores, e subtrair-las. Após este passo, apenas precisamos de calcular o grau de confiança através do comando chi2cdf, como no ponto anterior.

```
%2)
%Os graus de liberdade existem para que
%saibamos se temos mais valores
%de medições do que icognitas na
%resolução do nosso sistema.
degree_of_freedom = length(Z)-length(x);
grau_confianca= chi2cdf(check,degree_of_freedom);
```

Figura 10. Implementação do teste do Chi-Quadrado com o Matlab.

IV. NORMALIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A. Eliminação de medidas com erros grosseiros através dos resíduos normalizados

Segundo o teste do Chi-Quadrado, estamos perante medidas com erros grosseiros. Sendo assim, podemos repetir uma nova estimação de estado eliminando a medida que está associada a um maior erro, mas sempre garantindo que o sistema continua a ser observável e redundante. Para identificar a medida com maior erro, é preciso comparar os resíduos entre medidas. No entanto, como as medidas não têm as mesmas unidades, é preciso primeiro normalizar os resíduos. Tal é conseguido através da equação:

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{c_{ii}}} \quad (7)$$

Esta distribuição tem média zero e desvio-padrão 1, o que é característico de uma distribuição normal.

c_{ii} é, ainda, o elemento ii da diagonal principal da matriz de covariâncias dos resíduos, calculada da seguinte forma:

$$C = R - H(H^T \cdot R^{-1} \cdot H)^{-1} \cdot H^T \quad (8)$$

Na equação 8, R é igual à inversa da matriz W . A medida com maior valor absoluto dentro dos resíduos normalizados será aquela que apresentará maior erro. Esta pode ser eliminada na próxima iteração, mas apenas se nenhuma outra medida depender dela (“só se a interação entre medidas for desprezável”).

B. Identificação da medida a retirar

Aplicando a equação 8, obtivemos a matriz das covariâncias, cujos valores absolutos da diagonal principal são utilizados para o cálculo dos resíduos normalizados.

C									
-294,8558	-297,2687424	-288,64146	4,171189967	-6,633024449	28,63871035	39,30916	-2,46183	33,77713	-70,4493
-297,2687	-301,8515748	-292,0571715	3,993775082	-5,969559953	39,4480908	29,53324	-1,97578	34,23731	-71,4862
-288,6415	-292,0571715	-283,2272187	3,880459552	-5,98950083	34,76627756	35,11306	-2,10904	29,91574	-69,2232
4,17119	3,993775082	3,880459552	-66,25530051	32,71458618	3,440491921	3,475004	-33,5507	3,277589	-2,22455
-6,633024	-5,969559953	-5,98950083	32,71458618	-65,70250024	-5,297138118	-5,35451	-32,9979	-5,04837	4,936753
28,63871	39,4480908	34,76627756	3,440491921	-5,297138118	-70,3360681	29,81992	-1,85665	28,17901	9,525898
39,30916	29,53323881	35,11305977	3,475004373	-5,354509337	29,81991627	-69,7892	-1,8795	28,43855	8,353969
-2,461834	-1,97578487	-2,109041278	-33,55071433	-32,99791406	-1,856646197	-1,8795	-66,5386	-1,77078	2,712205
33,77713	34,23731496	29,91573801	3,277588935	-5,048367974	28,17901208	28,43855	-1,77078	-73,149	8,280536
-70,4493	-71,48616388	-69,22322538	-2,224547898	4,936752867	9,525898316	8,353969	2,712205	8,280536	-17,5537

Figura 11. Matriz das covariâncias.

Aplicando, agora, a equação 6, conseguimos normalizar os resíduos, chegando aos seguintes resultados:

	Resíduo(2)	Normalizados
V1	0,018197093	0,001059735
V2	-0,104515743	0,006015684
V3	0,028082942	0,001668688
P31	-0,716989955	0,088085162
P32	-0,470550823	0,058051786
Q13	-0,10219017	0,012184847
Q23	-0,002910999	0,000348456
Pg3	0,712459222	0,087341992
Qg3	-0,075548037	0,00883322
theta2	0,022880793	0,005461184

Figura 12. Resíduos normalizados.

Perante os resíduos normalizados, podemos ver que a medida com maior valor absoluto de resíduo normalizado é P31. Este resultado já era previsível, porque, desde o início, se sabia que era uma medida com elevada variância. Além disso, o sinal está claramente trocado: P31=-1, o que não faz sentido tendo em conta que o trânsito de potências se faz da fonte para a carga. Este erro poderá ter sido causado por aparelhos de medição a medir com as polaridades trocadas.

C. Implementação da Normalização de Resíduos com o Matlab

Para normalizar os resíduos com o Matlab, basta apenas definir uma variável C e aplicar-lhe a equação 8. Depois, basta utilizar um ciclo `for` para percorrer o vetor dos resíduos obtidos após a convergência do método, e aplicar, para cada elemento j do vetor r , a fórmula dada pela equação 7.

```
%3)
% A normalização dos resíduos é uma forma de
% podermos comparar medidas
% que são de ordem de grandeza diferentes.
C= inv(W)- H *inv(transpose(H)*(W)*(H))*transpose(H);
C= double(transpose(diag(C)));
for j = 1:length(r)
    %Obtem-se o vetor dos residuos normalizados
    norm_r(j)=abs(r(j))/sqrt(abs(C(j)));
end
%4)
%O elemento cuja eliminação terá maior
%efeito na diminuição dos
%resíduos é o elemento que está na
%posição bad_element_position do
%vetor dos residuos normalizados
bad_element_position = find(norm_r == max(norm_r));
```

Figura 13. Implementação da normalização de resíduos no Matlab.

V. OBTENÇÃO DO MELHOR ESTADO PARA O SISTEMA

A. Eliminação da medida P31

O procedimento a realizar é em tudo semelhante ao que temos vindo a realizar: no fundo, vamos de novo calcular uma nova estimativa para o estado do sistema, e, a seguir, realizar de novo o teste do Chi-Quadrado, para detetar novas medidas grosseiras. Depois, realiza-se de novo o teste dos resíduos normalizados, para ver qual a próxima medida a eliminar.

Agora temos 9 medidas, pelo que eliminamos a linha e coluna correspondentes à medida 4 da matriz $[W]$, e a linha 4 da matriz Jacobiana.

Logo na primeira iteração, iteração 0, percebe-se que a função objetivo diminuiu em relação ao caso anterior: antes, tínhamos um valor de 623, e, com 9 medidas, temos um valor de 523. Na segunda iteração, iteração 1, o valor da função objetivo passou de 144.652 para 15.179, o que mostra que diminui consideravelmente. Ou seja, por aqui se vê que retirar medidas é algo que minimiza a função objetivo. Após convergência, o valor da função objetivo foi de 14.9327.

Por outro lado, fazendo o teste do Chi-Quadrado para a função de objetivo com 4 graus de liberdade, percebemos que a densidade de probabilidade aumentou, o que prova que a probabilidade de termos erros grosseiros diminuiu. Embora ainda seja uma probabilidade elevada, o seu valor já não é 100%, como no caso anterior: passámos poder afirmar com 99.52% de confiança que ainda temos erros grosseiros. No entanto, podemos dizer que retirar medidas com erros grosseiros diminuiu, ainda, o intervalo de confiança associado aos erros.

Com a eliminação de uma medição de potência ativa, percebemos que, em relação ao caso em que nenhuma medida foi eliminada, os valores do módulo da tensão não

se modificaram muito. Pelo contrário, o valor dos ângulos já tem uma diferença significativa. Isto vem ilustrar, no fundo, a influência da potência ativa nos ângulos das tensões.

De resto, os valores mantêm-se dentro da ordem de grandeza esperada, verificando-se as principais diferenças no trânsito de potências. Tal é expectável, tendo em conta que a medida eliminada é uma medida do trânsito de potências de 3 para 1.

Como ainda persistem erros, devemos proceder à eliminação de mais uma medida e, para sabermos qual eliminar, devemos fazer a normalização dos resíduos.

Como o valor absoluto do resíduo correspondente à tensão no barramento 2 é superior a todos os outros, devemos proceder à sua eliminação.

B. Implementação da eliminação de medidas com o Matlab

O algoritmo utilizado para eliminar medidas prendeu-se com a definição de uma variável que guarda a posição da medida com maior resíduo normalizado. Para sabermos qual é essa medida, utilizámos o comando “find”, que nos encontra o elemento do vetor de resíduos que é igual ao valor máximo desse vetor.

Se o grau de liberdade for exatamente igual a 1, o ciclo while é também quebrado, porque assim não é garantida a observabilidade do sistema. Se, por outro lado, os graus de liberdade forem superiores a 1, devemos remover de todos os vetores a medida com erros grosseiros: devemos, então, igualar o elemento na posição previamente encontrada a um espaço em branco:

```
if degree_of_freedom > 1
    n_remov = n_remov + 1;
    Z(bad_element_position) = [];
    Z_simb(bad_element_position) = [];
    r(bad_element_position) = [];
    norm_r(bad_element_position) = [];
    hx(bad_element_position) = [];
    W(bad_element_position,:) = [];
    W(:,bad_element_position) = [];
    H(bad_element_position,:) = [];
    Hx(bad_element_position,:) = [];
    prob_err = [];
```

Figura 14. Peça de código que implementa a eliminação de medidas com erros grosseiros.

hx	
V1	0,9758016
V2	0,980941
V3	1,00785
P32	0,9003252
Q13	0,2813581
Q23	-0,228763
Pg3	1,685153
Qg3	0,6666377
theta2	-0,0911933

Figura 15. Vetor hx após eliminação de 1 medida.

X	
V1	0,9758
V2	0,9809427
V3	1,007849
theta1	-0,07989145
theta2	-0,09119094
Resíduos Normalizados	
V1	1,778007
V2	3,212591
V3	1,987803
P32	1,44135
Q13	1,880152
Q23	0,3654408
Pg3	1,594161
Qg3	1,190882
theta2	1,294741

Figura 16. Vetor de estado e resíduos normalizados após a eliminação de 1 medida.

C. Eliminação da medida P31 e da medida V2

Retirar a medida V2 não significa retirar a variável de estado V2, tendo em conta que V2 é necessária para exprimir outras medições, nomeadamente as de potência. Assim, eliminou-se todas as linhas nas matrizes referentes a esta medida.

Com o Matlab, percebe-se que o método convergiu para a terceira iteração. Sem V2, a função objetivo volta a diminuir, obtendo-se um valor de 4.5533, muito menor que os anteriores. Observando o resultado da função $h(x)$, ainda se verifica que não haverá uma grande alteração das medidas do trânsito de potência ativa, e sim que há uma maior alteração das medidas do trânsito de potência reativa. Isto sucede porque o módulo da tensão e a potência reativa estão fortemente relacionados.

hx	
V1	1,011239
V3	1,047348
P32	0,9279717
Q13	-0,3375475
Q23	-0,1597884
Pg3	1,692046
Qg3	0,649486
theta2	-0,0863039

Figura 17. Vetor hx após eliminação de duas medidas.

X	
V1	1,01131
V2	1,027989
V3	1,047424
theta1	-0,07217344
theta2	-0,08629899

Figura 18. Vetor de estado após convergência do método.

Resíduos normalizados	
V1	0,39276
V3	0,54503
P32	1,9353
Q13	1,0225
Q23	0,68517
Pg3	0,95707
Qg3	0,88497
theta2	1,9582

Figura 19. Resíduos normalizados após remoção de 2 medidas.

Em relação ao caso em que tínhamos 3 medidas, podemos dizer que os resíduos normalizados diminuíram, o que mostra que estamos progressivamente a chegar ao melhor estado do sistema. Tal também é visível, porque o nível de confiança com que temos erros passou de 99.52% para 79.24%. Como se pode ver, houve uma medida com um resíduo normalizado superior a todas as outras, cujo valor foi 1.9582. Sendo assim, optou-se por se eliminar a medida θ_2 .

D. Eliminar as medidas P31, V2 e θ_2

Retirando, agora, a medida θ_2 , verificamos que a função objetivo diminuiu bastante em relação ao caso em que tínhamos todas as medidas no sistema. Atingiu um valor de. Apenas tendo em conta este valor, podemos dizer que atingimos uma boa estimacão de estado.

Em comparação com o ponto anterior, com duas medidas eliminadas, verifica-se que os valores presentes no vetor de estado não se modificaram significativamente. No entanto, a tensão V2 é a que surge mais alterada, passando de 1.027989 para 1.042412 p.u.

A função objetivo teve o menor resultado de todos, cujo valor foi de 0.7487, e o nível de confiança com que se pode afirmar que há erros também diminuiu consideravelmente, passando para cerca de 31.23%.

hx	
V1	1,021783
V3	1,05958
P32	0,8011146
Q13	-0,3495049
Q23	-0,1499056
Pg3	1,691792
Qg3	0,6482255

Figura 20. Vetor hx após eliminação de 3 medidas.

X	
V1	1,021781
V2	1,042412
V3	1,059581
theta1	-0,08237699
theta2	-0,07258363

Figura 21. Vetor de estado após a eliminação de 3 medidas.

Resíduos Normalizados	
V1	0,08242956
V3	0,01873103
P32	0,5395288
Q13	0,8290531
Q23	0,9625761
Pg3	0,8657129
Qg3	0,8628319

Figura 22. Resíduos normalizados após eliminação de 3 medidas.

Com três medidas eliminadas, verifica-se que os resíduos das medidas diminuíram. No entanto, ainda se pode retirar mais uma medida, Pg3, mas tal não foi feito porque nem sempre eliminar medidas diminui a probabilidade de erros ou o valor da função objetivo.

Mantivemos a decisão de eliminar a medida θ_2 , porque o seu valor de resíduo normalizado, como se pode ver pela figura 20, é o maior. No entanto, nota-se uma grande proximidade entre o resíduo normalizado de θ_2 e o de P32. Estas duas medidas estão relacionadas, uma vez que o trânsito de potências de 3 para 2 depende do ângulo das tensões. Para testar se eliminar θ_2 é realmente a melhor opção, procurámos eliminar P32 em vez de θ_2 . Os resultados obtidos ao nível do grau de confiança e da função objetivo foram muito semelhantes, pelo que mantivemos a eliminação de θ_2 .

VI. CONCLUSÃO

As medidas que chegam a um centro de controlo vêm afetadas de erros, mas, ao eliminar medidas (mantendo sempre a condição de observabilidade), conseguimos minimizar cada vez mais o quadrado dos erros. Consequentemente, baixar o quadrado dos erros leva-nos a baixar o nível de confiança com que afirmamos que as medidas têm erros.

Ao minimizar o quadrado dos erros, garantimos que as medidas se aproximam ao valor teoricamente calculado pela função h, o que nos leva a um estado mais próximo da realidade. Obter variáveis de estado (tensões em módulo e fase) mais próximas da realidade leva-nos a ter outras medidas calculadas com maior precisão, porque todas as medidas se podem exprimir em função das tensões.

REFERÊNCIAS

- [1] Maria Helena Vasconcelos, "Estimação do Estado em SEE," 30 de novembro de 2021.
- [2] <https://keisan.casio.com/exec/system/1180573196>
- [3] João Peças Lopes, Helder Leite, "Monitoring and Control Technology".
- [4] T.E Dy-Liacco, "Control Centers are here to stay," 1998-2002.

- [5] João Abel Peças Lopes, “Network State Estimation- Main Concepts”, setembro de 2017.