

AVALIANDO O EFEITO DA INCLUSÃO DE MEDIDAS FASORIAIS SINCRONIZADAS PARA PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS ATRAVÉS DO ÍNDICE DE NÃO-DETECÇÃO DE ERROS.

CAMILA SILVA VIEIRA*, JULIO AUGUSTO DRUZINA MASSIGNAN*, JOÃO BOSCO AUGUSTO LONDON
JUNIOR*

*Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São Carlense, 400
São Carlos, São Paulo, Brasil

Emails: svieiracamila@usp.br, julio.massignan@usp.br, jbalj@sc.usp.br

Abstract— Recently, from a geometric analysis of the Weighted Least Squares (WLS) State Estimator (SE), an index, called Undetectability Index (*UI*), was developed. This index classifies the SCADA measurements according to their characteristics of not reflecting their errors into the residuals of the WLS EE. Gross Errors (GEs) in measurements with higher *UI*s are very difficult to be detected by methods based on the WLS residual analysis, as the errors in those measurements are (*masked*), i.e., they are not reflected in the residuals. This paper proposes to extend that geometric analysis, based on the *UI* index, to metering system composed of both SCADA and PMU measurements. The idea is to verify the influence of inserting PMU measurements in the *UI* index of the measurements. If the *UI* index decreases, the inserting of PMU measurements contributes to increase the possibility of success of the process of GEs processing via the analysis of the WLS EE residuals.

Keywords— Power Systems, State Estimation, Bad Data Processing, Geometric Interpretation, Undetectability Index

Resumo— Recentemente, a partir da análise geométrica do Estimador de Estado (EE) por Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), desenvolveu-se um índice para classificação das medidas SCADA de acordo com as suas características de não refletirem grande parcela de seus erros nos resíduos desse EE. O índice proposto foi denominado Índice de Não-Detecção de Erros, ou apenas *UI* (*Undetectability Index*). As medidas com maiores *UI* são aquelas cujos Erros Grosseiros (EGs) são mais difíceis de serem detectados através de métodos que fazem uso da análise dos resíduos do EE por MQP. Isto porque os erros dessas medidas são, de certa forma, *maskados*, isto é, não são refletidos nos resíduos das mesmas. Neste trabalho propõe-se a extensão da visão geométrica dos resíduos do EE por MQP, baseada na obtenção e análise do índice *UI*, para sistemas de medição formados por medidas convencionais SCADA e por medidas fasoriais sincronizadas, obtidas pelas PMUs. A ideia é verificar a influência da inserção de medidas fasoriais sincronizadas no índice *UI* das medidas. Se essa inserção contribuir para diminuição desse índice, ela contribuirá positivamente para aumentar a possibilidade de sucesso do processamento de EGs através da análise dos resíduos do EE por MQP.

Palavras-chave— Sistemas Elétricos de Potência, Estimação de Estado, Processamento de Erros Grosseiros, Análise Geométrica, Índice de Não-Detecção

1 Introdução

Um dos principais atributos de um Estimador de Estado (EE) é possibilitar o processamento de Erros Grosseiros (EGs), isto é, detectar e identificar medidas portadoras de tais erros. O EE mais divulgado na literatura e mais utilizado na prática, em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), é o EE por Mínimo Quadrados Ponderados (MQP) associado ao teste do maior resíduo normalizado. Ele funciona muito bem na maioria das situações práticas, mas falha em algumas situações, como, por exemplo, na presença de Erros Grosseiros (EGs) associados a medidas com baixa redundância (medidas críticas e conjuntos críticos de medidas), EGs múltiplos interativos e EGs em medidas ponto de alavancamento (Benedito et al., 2013; Monticelli and Garcia, 1983).

Face ao exposto, outros EEs, mais robustos estaticamente que o EE por MQP, foram aplicados em SEP (Kotiuga and Vidyasagar, 1982; Irving et al., 1978), entretanto não se mostraram viáveis para operação em tempo real. Dessa forma, ao

longo dos últimos anos pesquisas têm sido desenvolvidas para tornar o EE por MQP, associado ao teste do maior resíduo normalizado, mais robusto para tratamento de EGs.

Outros métodos para processamento de EGs, também baseados na análise dos resíduos do EE por MQP, foram desenvolvidos com o objetivo de aprimorar ainda mais esse método. Como, por exemplo, o teste- $\hat{b}$, proposto em Monticelli and Garcia (1983), e o método proposto em Mili et al. (1984), conhecido como Identificação por Teste de Hipótese (HTI). No entanto, como esses métodos utilizam a análise dos resíduos normalizados do EE por MQP, eles podem falhar, pois em algumas situações práticas as medidas portadoras de EGs apresentam baixos resíduos normalizados.

A partir da análise geométrica dos resíduos do EE por MQP foi demonstrado em London Jr et al. (2004) que a dificuldade em detectar EGs, em medidas redundantes, é um problema estrutural do processo de detecção. Seguindo esse caminho, em Benedito et al. (2013) foi desenvolvido um índice que permite a classificação das medidas SCADA

de acordo com as suas características de não refletirem grande parcela de seus erros, nos resíduos do processo de estimação de estado por MQP. Esse índice foi denominado Índice de Não-Detecção de Erros, ou, simplesmente *UI*. As medidas com maiores *UI* são aquelas cujos EGs são mais difíceis de serem detectados, através da análise dos resíduos do estimador de estado MQP. Isso porque uma grande parcela dos erros dessas medidas não é refletida nos resíduos do EE por MQP. Em razão disso, o processamento de EGs através da utilização do teste do maior resíduo normalizado falha na ocorrência de EGs em medidas com alto índice *UI*.

Visando também melhorar o processamento de EGs a partir do EE por MQP, em Do Coutto Filho et al. (2014) foi proposta a utilização de medidas fasoriais sincronizadas, juntamente com medidas SCADA.

O objetivo principal deste trabalho é contribuir com o processo de processamento de EGs através da análise dos resíduos do EE por MQP. Para isso, propõe-se a extensão da visão geométrica dos resíduos do EE por MQP, baseada na obtenção e análise do índice *UI*, para sistemas de medição formados por medidas convencionais SCADA e por medidas fasoriais sincronizadas, obtidas através das PMUs. A ideia é verificar a influência da inserção de medidas fasoriais sincronizadas no índice *UI* das medidas. Se essa inserção contribuir para diminuição desse índice, ela contribuirá positivamente para aumentar a possibilidade de sucesso do processamento de EGs através da análise dos resíduos do EE por MQP.

Esse trabalho foi dividido da seguinte forma. Na seção 2 será apresentada a formulação do índice *UI*, utilizando a análise geométrica do EE por MQP conforme apresentado em Benedito et al. (2013). Na seção 3 será apresentado o EE por MQP híbrido, que possibilita o processamento simultâneo de medidas SCADA e medidas fasoriais sincronizadas. Finalmente, na seção 4, será apresentado alguns resultados numéricos e depois as conclusões são apresentadas na sessão 5.

2 Índice de Não-detecção de Erros

2.1 Interpretação Geométrica do Estimador de Estado por MQP

O modelo de medição geral para Estimação de Estado é dado por:

$$\underline{z} = h(\underline{x}) + \underline{w} \quad (1)$$

Onde $\underline{z} \in R^m$, $\underline{x} \in R^n$ e $h : R^n \rightarrow R^m$ é uma função não linear que relaciona as variáveis de estado com as medidas. Como o número de medidas m é, em geral, maior que o número de variáveis de estado n , há mais equações que variáveis de estado a serem estimadas. Desta forma, a

estimativa do vetor de variáveis de estado $\underline{x}$, pelo método MQP, é obtida através da minimização do índice (ou função) $J(\underline{x})$, dado por:

$$J(\underline{x}) = (\underline{z} - h(\underline{x}))^t \cdot R^{-1} \cdot (\underline{z} - h(\underline{x})) \quad (2)$$

Geometricamente, a função $J(\underline{x})$ é uma norma no espaço vetorial das medidas R^m , induzida pelo produto interno $\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle = \underline{u}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{v}$, ou seja:

$$\begin{aligned} J(\underline{x}) &= \|(\underline{z} - h(\underline{x}))\|_{R^{-1}}^2 = \langle \underline{z} - h(\underline{x}), \underline{z} - h(\underline{x}) \rangle \\ J(\underline{x}) &= (\underline{z} - h(\underline{x}))^t \cdot R^{-1} \cdot (\underline{z} - h(\underline{x})) \end{aligned} \quad (3)$$

Sendo $\hat{\underline{x}}$ o vetor de variáveis de estado estimadas, isto é, a solução do problema de minimização acima, $\hat{\underline{z}}$ o vetor de medidas estimadas, e o vetor dos resíduos é definido pela diferença entre $\underline{z}$ e $\hat{\underline{z}}$, ou seja $\underline{r} = \underline{z} - \hat{\underline{z}}$:

A linearização da equação 1 num certo ponto $\underline{x}^*$, resulta em:

$$\Delta \underline{z} = H \cdot \Delta \underline{x} + \underline{w} \quad (4)$$

Sendo $H = \frac{\partial h}{\partial \underline{x}}$ a matriz Jacobiana calculada em $\underline{x}^*$, $\Delta \underline{z} = \underline{z} - h(\underline{x}^*)$ o vetor de correção e $\Delta \underline{x} = \underline{x} - \underline{x}^*$.

Se o sistema representado pela equação 4 é observável ($\text{posto}(H) = n$), então o espaço vetorial das medidas R^m pode ser decomposto numa soma direta de dois subespaços vetoriais, $R^m = \mathcal{R}(H) \oplus \mathcal{R}(H)^\perp$, onde $\mathcal{R}(H)$ representa o subespaço vetorial de dimensão n em R^m , denominado imagem de H ; $\mathcal{R}(H)^\perp$ representa o complemento ortogonal de $\mathcal{R}(H)$, isto é, se $\underline{u} \in \mathcal{R}(H)$ e $\underline{v} \in \mathcal{R}(H)^\perp$, então $\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle = \underline{u}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{v} = 0$.

No modelo linearizado da formulação do estimador de estado, a equação 4 calculada em $\underline{x}$, que torna mínimo o índice $J(\underline{x})$, pode ser interpretada como uma projeção do vetor de correção $\Delta \underline{z}$ em $\mathcal{R}(H)$. Assim, considere K como um operador linear, que projeta o vetor $\Delta \underline{z}$ em $\mathcal{R}(H)$, ou seja, $\Delta \hat{\underline{z}} = K \cdot \Delta \underline{z}$, e $\underline{r} = \Delta \underline{z} - \Delta \hat{\underline{z}}$ seja o vetor de resíduos para o modelo linearizado. O operador de projeção K , que minimiza a norma de $J(\underline{x})$, é aquele que projeta $\Delta \underline{z}$ ortogonal ao plano $\mathcal{R}(H)$, em termos do produto interno $\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle = \underline{u}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{v}$, isto é, o vetor $\Delta \hat{\underline{z}} = H \cdot \Delta \hat{\underline{x}}$ é ortogonal ao vetor $\underline{r}$. Mais precisamente:

$$\langle \Delta \hat{\underline{z}}, \underline{r} \rangle = (H \cdot \Delta \hat{\underline{x}})^t \cdot R^{-1} \cdot (\Delta \underline{z} - H \cdot \Delta \hat{\underline{x}}) = 0 \quad (5)$$

Resolvendo-se a equação 5 para $\Delta \hat{\underline{x}}$, obtém-se, $\Delta \hat{\underline{x}} = (H^t \cdot R^{-1} \cdot H)^{-1} \cdot H^t \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{z}$.

Como $\Delta \hat{\underline{z}} = H \cdot \Delta \hat{\underline{x}}$, a matriz projeção K é:

$$K = H \cdot (H^t \cdot R^{-1} \cdot H)^{-1} \cdot H^t \cdot R^{-1} \quad (6)$$

Observação: Caso a matriz de ponderação R^{-1} seja dada por $R^{-1} = c \cdot I$, sendo c é um número real positivo e I é a matriz identidade de ordem $m \times m$, então $K = K^t$ e K será uma projeção ortogonal.

3 Estimador de Estado Híbrido por MQP

O EE por MQP híbrido (que processa medidas SCADA e medidas fasoriais sincronizadas) implementado neste trabalho baseia-se no EE proposto por Fantin et al. (2015). A diferença entre esse EE, e o EE por MQP baseado apenas em medidas SCADA, é basicamente a inclusão das medidas fasoriais sincronizadas no modelo de medição apresentado na equação (1). Além disto, considerando estas novas medidas, a referência do sistema passa a ser o sinal sincronizado de GPS, ao invés da escolha arbitrária de uma barra de referência angular.

Deixando de lado a interpretação geométrica do EE por MQP apresentada anteriormente, a partir do EE híbrido por MQP, a estimativa do vetor de variáveis de estado x_e , designado por $\hat{x}_e$, é obtida de forma recursiva, através do cálculo da matriz Jacobiana, e da solução do seguinte conjunto de equações (algoritmo iterativo de Gauss-Newton):

$$G(x_e^k) \cdot (x_e^{k+1} - x_e^k) = H^T(x_e^k) \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x_e^k)], \quad (19)$$

Onde, x_e^k é o valor de x_e na iteração k , e:

$$G(x_e^k) = H^T(x_e^k) \cdot R^{-1} \cdot H(x_e^k), \quad (20)$$

é a matriz Ganho.

A estrutura da matriz Jacobiana associada ao EE híbrido por MQP será a seguinte:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{km}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta} & \frac{\partial P_k}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_k}{\partial V} \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ \frac{\partial I_{PMU}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{PMU}}{\partial V} \\ \frac{\partial \delta_{PMU}}{\partial \theta} & \frac{\partial \delta_{PMU}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Onde:

P_{km} e Q_{km} representam as medidas SCADA de fluxo de potência ativa e reativa.

P_k e Q_k representam as medidas SCADA de injeção de potência ativa e reativas.

V_{PMU} e θ_{PMU} representam as magnitudes e ângulos de tensão medidas em PMUs.

I_{PMU} e δ_{PMU} representam as magnitudes e ângulos de correntes medidas em PMUs.

V e θ representam as variáveis de estado a serem estimadas.

3.1 Algoritmo para cálculo do UI para medidas SCADA e de PMU

Utilizando-se o EE híbrido por MQP, faça:

Passo 1: Determine o valor estimado das variáveis de estado ($\hat{x}$) através da solução iterativa da equação normal.

Passo 2: Calcule as matrizes K e $(I - K)$ para $\hat{x}$, ou apenas os elementos da diagonal principal dessas matrizes;

Passo 3: Para cada medida i , calcule o índice UI diretamente pela equação 18, isto é:

$$UI_i = \frac{\sqrt{K_{ii}}}{\sqrt{(1 - K_{ii})}} \quad (22)$$

4 Resultados Numéricos

Os valores de referência das medidas foram obtidos através de um programa de análise de fluxo de carga ANAREDE (CEPEL, 2014). Lembrando apenas que como o sistema era híbrido realizou-se um ajuste em todos os ângulos de fase de tensão obtidos pelo ANAREDE, para considerar o fato de a referência, neste caso, ser fornecida pelo sinal de GPS.

Os valores dos parâmetros, bem como outras informações pertinentes à execução do fluxo de carga, para o sistema de 14 barras do IEEE, estão disponíveis no endereço eletrônico “www.ee.washington.edu/research/pstca/”. Na tabela 4 apresentam-se as medidas utilizadas nos testes que serão analisados nesta seção.

Os desvios padrão para ponderação das medidas foram determinados a partir da seguinte equação:

$$\sigma_i = \frac{|z_i^{fc}| \cdot pr}{3} \quad (23)$$

Sendo pr a precisão do medidor (neste trabalho foi considerada uma precisão de 2% para medidas SCADA e de 0.5% para medidas de PMUs).

As medidas virtuais são aquelas com valor NULO, e por isso seus respectivos valores de desvio padrão e índices UIs não foram calculados. Para execução do estimador MQP atribuiu-se à elas a maior ponderação existente dentre todas as medidas desse sistema.

Para emular valores reais de medidas, isto é, medidas com ruído, foram adicionados ruídos gaussianos de média zero e desvio padrão calculado pela equação supracitada aos valores de referência.

4.1 Falha no teste do maior resíduo normalizado

Nesta simulação foram consideradas apenas as medidas SCADA apresentadas na Tabela 4 e foi adicionado um EG simples de magnitude dez vezes maior que o desvio padrão da medida de injeção de potência ativa na barra cinco (P_5), que é uma medida com índice UI alto igual a 11,393. Isso implica que a maior componente do erro dessa medida esta na componente não-detectável, logo o seu resíduo será baixo.

Através da tabela 1 foi observado que o teste do maior resíduo normalizado falha, pois existem outras medidas no plano de medição sem EG que

Tabela 1: Teste que mostra a falha no teste de maior resíduo normalizado com EG de $10 \cdot \sigma_i$

EG = $10 \cdot \sigma_i$		
Medidas	UI_i	R_i^N
P_5	11,393	0,304
P_5	6,476	1,758
P_9	0,755	-1,090
Q_5	9,418	1,098
V_1	0,149	-1,798

possuem um resíduo normalizado maior que a medida portadora de EG, mas nenhuma com resíduo normalizado superior em módulo a “3”, limiar usualmente utilizado nesse teste para detecção de EGs.

Depois foi adicionado um EG, na mesma medida (P_5), mas agora de magnitude de 20 vezes o valor do seu desvio padrão.

Tabela 2: Teste que mostra a falha no teste de maior resíduo normalizado com EG de $20 \cdot \sigma_i$

EG = $20 \cdot \sigma_i$		
Medidas	UI_i	R_i^N
P_5	11,392	1,178
P_{1-2}	0,289	1,859
P_{4-2}	0,321	1,801
P_2	6,477	1,783
V_1	0,149	-1,743

Na tabela 2 é apresentado algumas medidas que tiveram o resíduo normalizado maior que o da medida portadora de EG. Dessa forma o teste de maior resíduo normalizado também falha para esse caso.

4.2 Inserção de medidas fasoriais sincronizadas no plano de medição

Para verificar o efeito da inserção de medidas fasoriais sincronizadas no processamento de EGs, neste exemplo foi considerada a presença de uma PMU na barra 5, disponibilizando as seguintes medidas fasoriais: tensão complexa na barra 5 e fluxos de corrente complexa da barra 5 para todas as suas adjacências (conforme destacado na Tabela 4).

Na tabela 3 foi comparado valores de UI referentes aos planos de medição antes e depois de as medidas fasoriais sincronizadas serem inseridas. As faixas de valores de UI , qualificando as medidas como boas, aceitáveis e ruins, apresentadas na tabela 3, estão de acordo com as definidas em Benedito et al. (2013). Essa qualificação refere-se a dificuldade de processar EGs nessas medidas. Quanto maior o UI , mais difícil esse processamento.

Na tabela 3 podemos observar que o índice UI máximo melhorou (diminuiu) com a inserção de medidas de PMUs. Pode-se perceber também

Tabela 3: Tabela de comparação

Parâmetros de análise	Antes	Depois
Índice UI Máximo	11,401	4,397
Média do Índice UI	1,152	0,854
Redundância Global	2,500	2,857
Medidas Virtual ($UI=0$)	5	5
Medidas Boas ($UI < 1,2$)	51	63
Medidas Aceitáveis ($1,2 < UI < 2$)	5	3
Medidas Ruins ($UI > 2$)	9	9
Total de medidas	70	80

uma queda na média dos índices UI , observando uma melhora significativa no plano de medição em termos de processamento de EGs. Outros parâmetros a serem destacados são o aumento de medidas ditas como boas e aceitáveis. No caso da quantidade de medidas ruins, que possuem o índice UI muito elevado, não houve mudança.

Na tabela 4 são mostrados todos os índices UI s das medidas do plano de medição antes e depois da presença de medidas de PMUs. Em azul são destacadas as medidas que foram adicionadas no plano de medição. Destaca-se, em vermelho, a medida de injeção de potência ativa na barra 5 que antes tinha um índice UI muito elevado e depois da inserção das medidas de PMU teve seu valor reduzido.

5 Conclusões

Neste artigo, a visão geométrica dos resíduos do EE por MQP, baseada na obtenção e análise do índice UI , desenvolvida recentemente para sistemas de medição formados apenas por medidas SCADA, foi estendida para sistemas híbridos. Isto é, para sistemas contendo medidas SCADA e medidas fasoriais sincronizadas obtidas pelas PMUs.

Embora sejam ainda bastante preliminares, os resultados numéricos apresentados neste trabalho indicam que a inserção de medidas fasoriais sincronizadas pode contribuir para o processamento de EGs através da análise dos resíduos do EE por MQP. Isto em virtude de a inclusão dessas medidas ter contribuído para diminuição dos índices UI s das medidas disponíveis para estimação de estado. Dessa forma, vislumbra-se a possibilidade de desenvolvimento futuro de um procedimento para obtenção de sistemas de medição híbridos observáveis e isentos de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas, formados por medidas com índice UI menor que um valor pré-estabelecido, aumentando assim a possibilidade de sucesso no processamento de EGs através da análise dos resíduos do EE por MQP. Pretende-se, ainda, ampliar o estudo do índice UI para situações de EGs múltiplos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CNPq, CAPES e FAPESP pelo apoio financeiro.

Referências

- Benedito, R. A. d. S. (2011). *Índice de Não-Detecção de Erros Grosseiros no Processo de Estimacao de Estado em Sistemas Eletricos de Potência*, PhD thesis, Universidade de Sao Paulo.
- Benedito, R. A. S., Alberto, L. F. C., Bretas, N. G. and London Jr, J. B. A. (2013). Power system state estimation: Undetectable bad data, *International Transactions on Electrical Energy Systems* **10.1002**(1744).
- CEPEL (2014). ANAREDE - Análise de Redes Eléctricas. Available: <http://www.anarede.cepel.br/>.
- Do Coutto Filho, M. B., Souza, J. C. S. D. and Guimaraens, M. A. R. (2014). Enhanced Bad Data Processing by by Phasor-Aided State Estimation, *IEEE Transaction on Power Systems* **29**(5): 2200–2209.
- Fantin, C. A., Massignan, J. A. D., Castillo, M. R. and London, J. B. A. (2015). Observability, Redundancy and Gross Error Processing in State Estimation Using SCADA and Synchronized Phasor Measurements, *Power Tech*, Eindhoven.
- Irving, M. R., Owen, R. C. and Sterling, M. J. H. (1978). Power-system state estimation using linear programming, *Proceeding of the IEEE* **125**(9): 879 – 885.
- Kotiuga, W. W. and Vidyasagar, M. (1982). Bad data Rejection properties of Weighted Least Absolute Value Techniques Applied to Static State Estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-101**(4): 844–853.
- London Jr, J., Bretas, A. and Bretas, N. (2004). Algorithms to solve qualitative problems in power system state estimation, *Electrical Power & Energy Systems* **26**: 583–592.
- Mili, L., Cutsem, T. V. and Ribbens-Pavella, M. (1984). Hypothesis Testing Identification : A New Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation, *IEEE Power Engineering Review* **84 WM**(023-8): 3239–3252.
- Monticelli, A. and Garcia, A. (1983). Reliable Bad Data Processing for Real-Time State Estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-102**(5): 1126–1139.

Tabela 4: Valores de índices UI das medidas antes e depois da inserção de PMUs

Potências Ativas			Potências Reativas		
Medidas	Antes	Depois	Medidas	Antes	Depois
P_{1-2}	0,289	0,197	Q_{1-2}	0,580	0,536
P_{2-3}	0,243	0,222	Q_{2-3}	2,225	2,047
P_{3-4}	1,274	0,878	Q_{3-4}	2,137	1,847
P_{4-2}	0,321	0,171	Q_{4-2}	1,180	0,783
P_{4-5}	0,489	0,214	Q_{4-5}	0,361	0,231
P_{5-2}	0,292	0,173	Q_{5-2}	1,116	0,946
P_{5-6}	0,333	0,214	Q_{5-6}	0,452	0,325
P_{6-5}	0,333	0,214	Q_{6-5}	0,903	0,511
P_{6-5}	0,900	0,838	Q_{6-11}	0,838	0,807
P_{6-12}	0,613	0,612	Q_{6-12}	1,038	1,037
P_{6-13}	0,454	0,453	Q_{6-13}	0,435	0,434
P_{7-4}	0,422	0,266	Q_{7-4}	0,425	0,390
P_{7-8}	0,000	0,000	Q_{7-8}	0,421	0,416
P_{7-9}	0,422	0,267	Q_{7-9}	1,224	1,177
P_{8-7}	0,000	0,000	Q_{8-7}	0,432	0,428
P_{9-4}	0,421	0,265	Q_{9-4}	1,576	1,190
P_{9-10}	0,976	0,964	Q_{9-10}	0,925	0,913
P_{9-14}	0,756	0,734	Q_{9-14}	0,729	0,716
P_{10-9}	0,976	0,964	Q_{10-9}	0,927	0,914
P_{10-11}	4,230	3,286	Q_{10-11}	3,877	3,485
P_{11-6}	0,891	0,830	Q_{11-6}	0,868	0,840
P_{12-13}	3,308	3,305	Q_{12-13}	1,603	1,602
P_{13-6}	0,449	0,449	Q_{13-6}	0,461	0,460
P_{14-13}	0,908	0,900	Q_{14-13}	1,229	1,216
P_1	0,281	0,184	Q_1	1,402	1,047
P_2	6,478	3,685	Q_2	0,664	0,463
P_5	11,401	3,141	Q_5	9,504	4,397
P_7	0,000	0,000	Q_7	0,000	0,000
P_8	0,000	0,000	Q_8	0,432	0,428
P_9	0,756	0,521	Q_9	0,544	0,488
P_{13}	0,835	0,835	Q_{13}	0,810	0,810
P_{14}	0,665	0,661	Q_{14}	0,683	0,680

Fasores de Tensão e Corrente		
Medidas	Antes	Depois
V_1	0,149	0,129
V_2	0,150	0,129
V_3	0,155	0,134
V_{PMU}^5	-	0,134
V_6	0,156	0,134
V_8	0,149	0,128
V_{12}	0,160	0,138
θ_{PMU}^5	-	4,187
I_{PMU}^{5-4}	-	0,909
I_{PMU}^{5-2}	-	0,626
I_{PMU}^{5-1}	-	0,515
I_{PMU}^{5-6}	-	0,909
δ_{PMU}^{5-4}	-	2,054
δ_{PMU}^{5-2}	-	0,050
δ_{PMU}^{5-1}	-	0,054
δ_{PMU}^{5-6}	-	1,085