

USP SÃO CARLOS

Índice *UI*

Autora: Camila Silva Vieira
Orientador: Prof. João Bosco Augusto London Jr.

USP SÃO CARLOS

Estimador de Estado WLS

Modelo de medição:

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

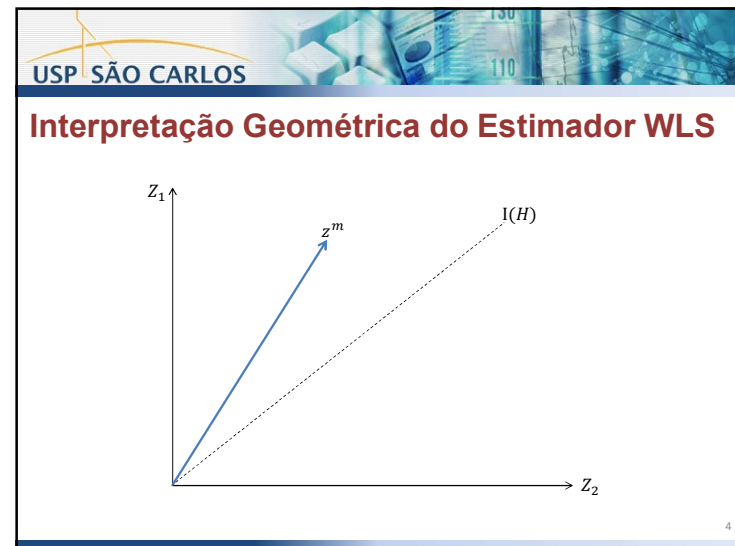
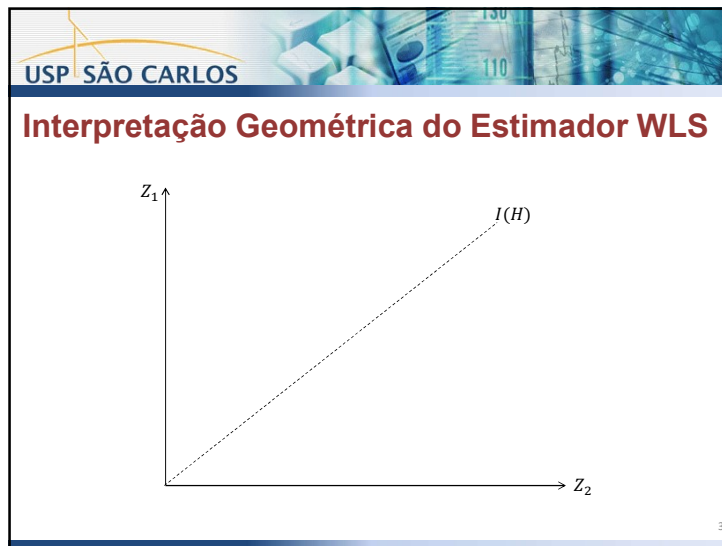
O método WLS consiste da minimização do índice $J(\underline{x})$:

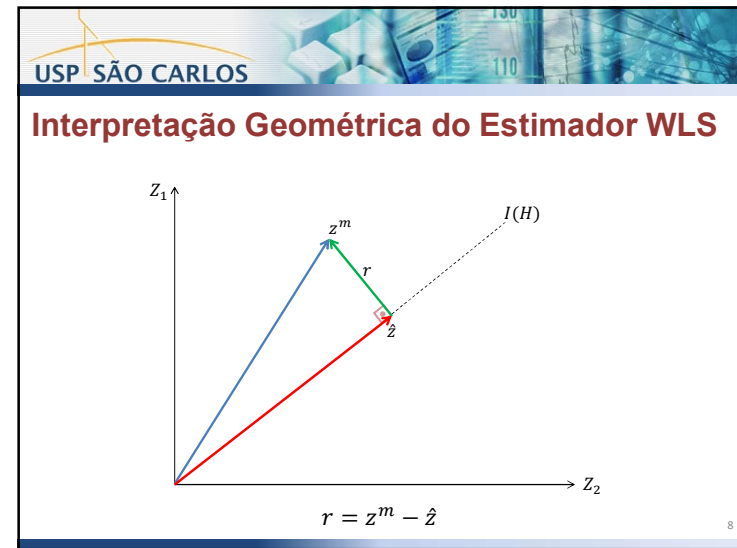
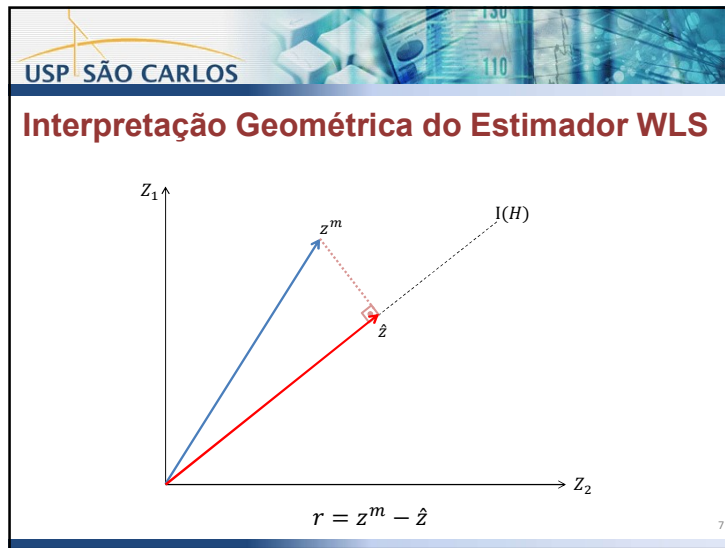
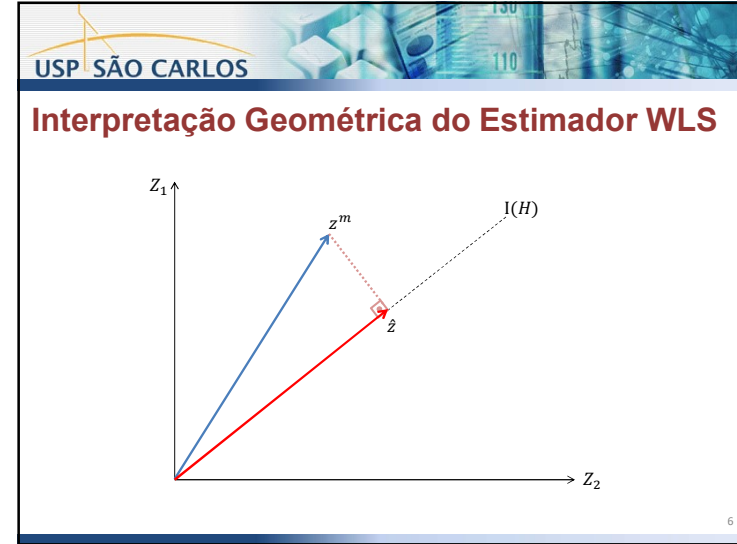
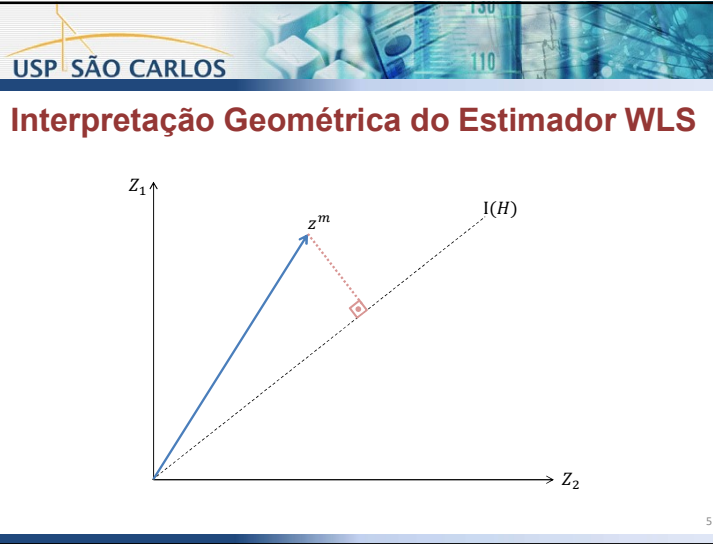
$$J(\underline{x}) = (\underline{z} - h(\underline{x}))^T \cdot R^{-1} \cdot (\underline{z} - h(\underline{x}))$$

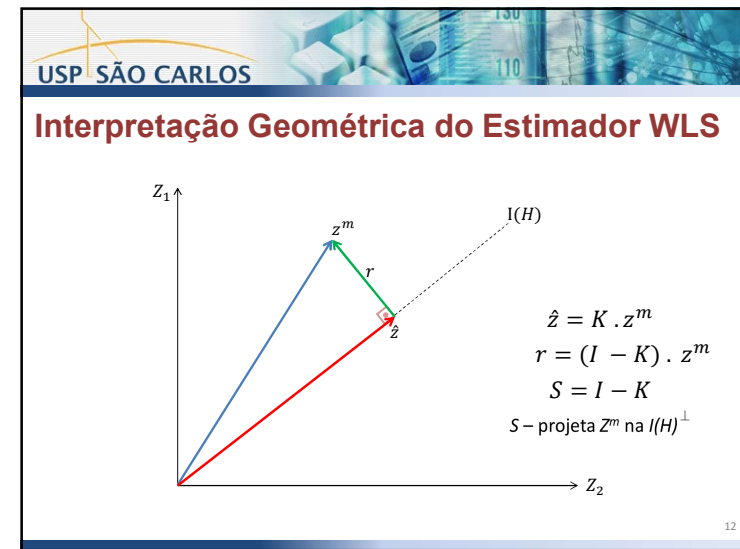
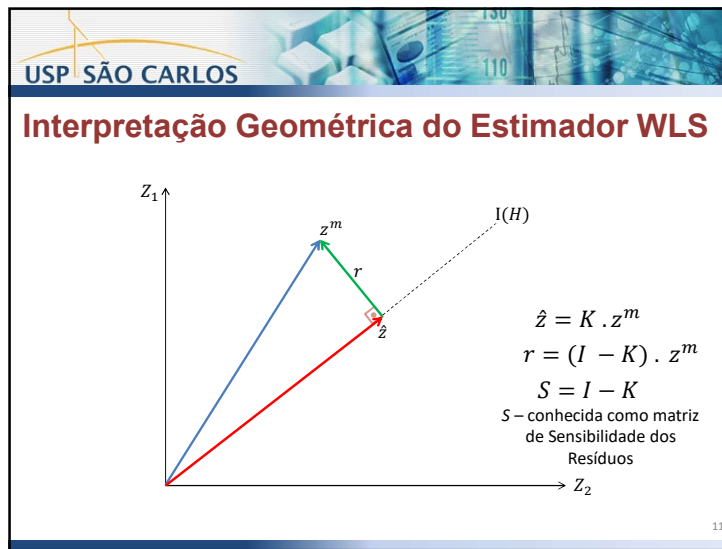
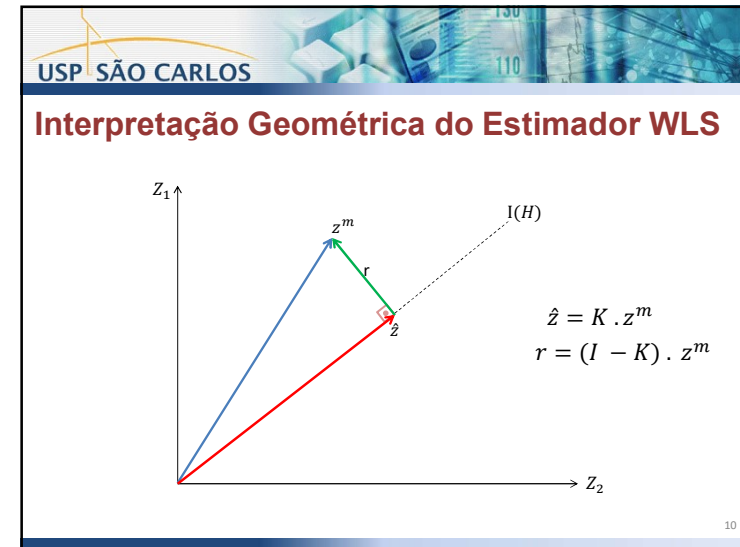
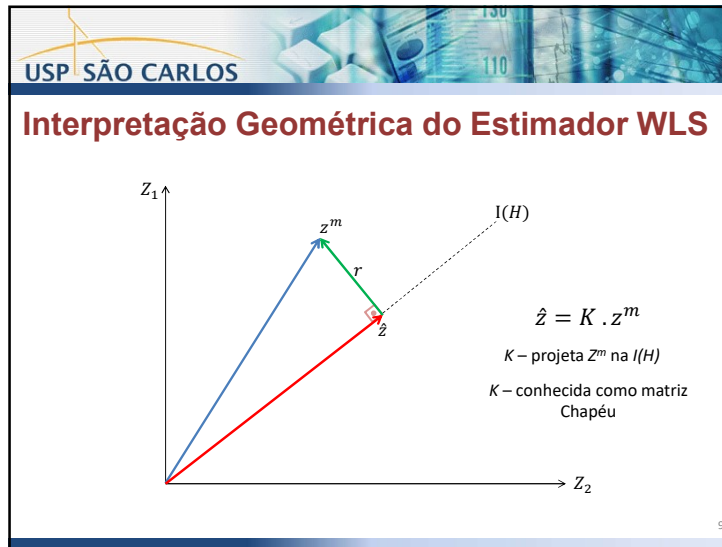
Sendo $J(\underline{x})$ uma norma no espaço vetorial das medidas \Re^m induzida pelo produto interno $\langle u, v \rangle = u^t \cdot R^{-1} \cdot v$

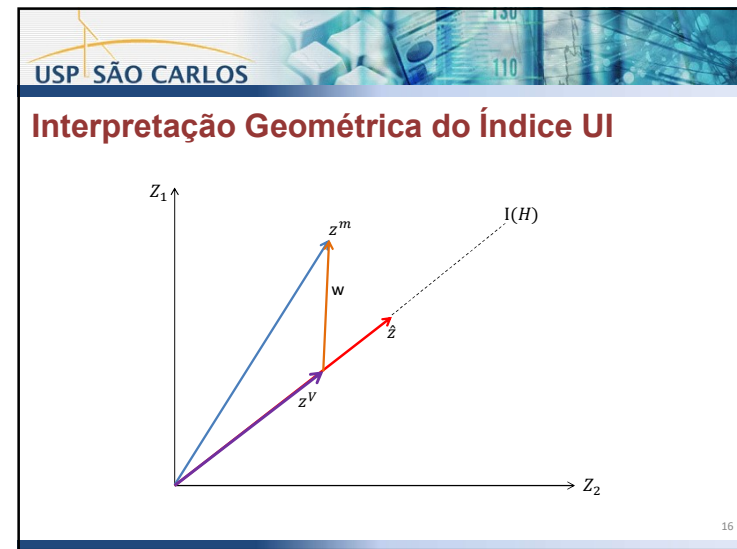
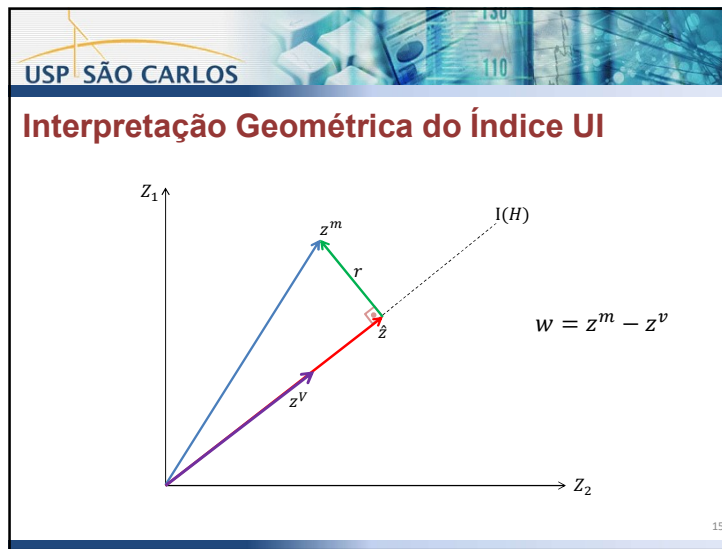
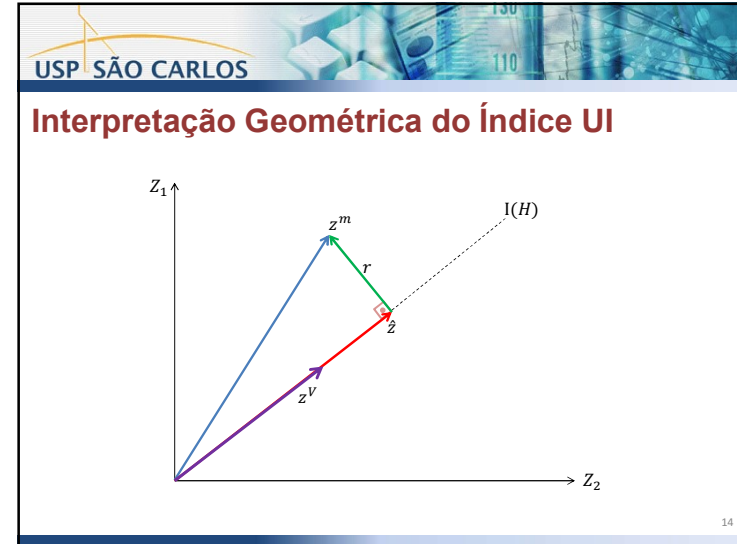
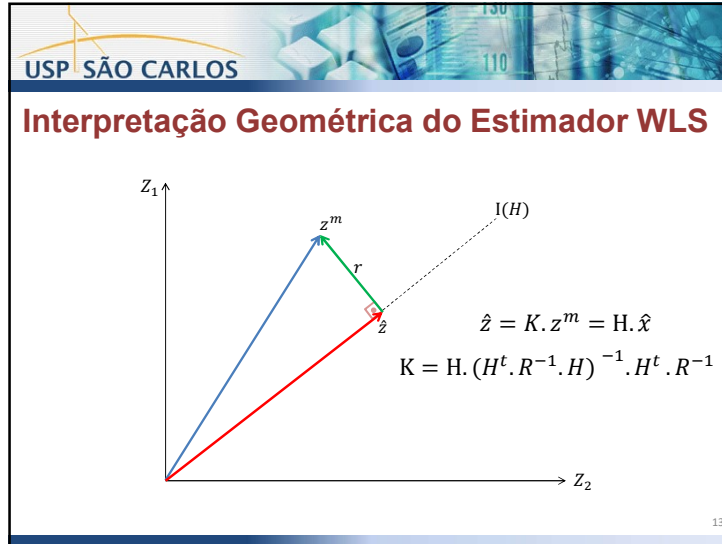
$$J(\underline{x}) = \|(\underline{z} - h(\underline{x}))\|_{R^{-1}}^2 = \langle \underline{z} - h(\underline{x}), \underline{z} - h(\underline{x}) \rangle$$

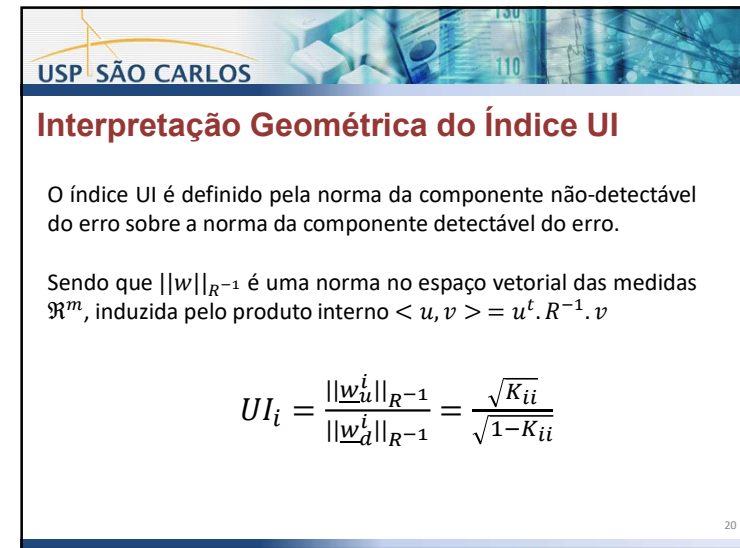
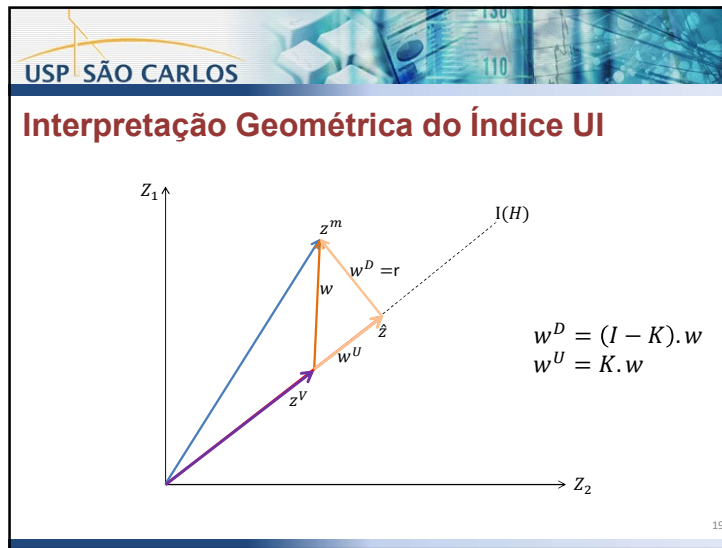
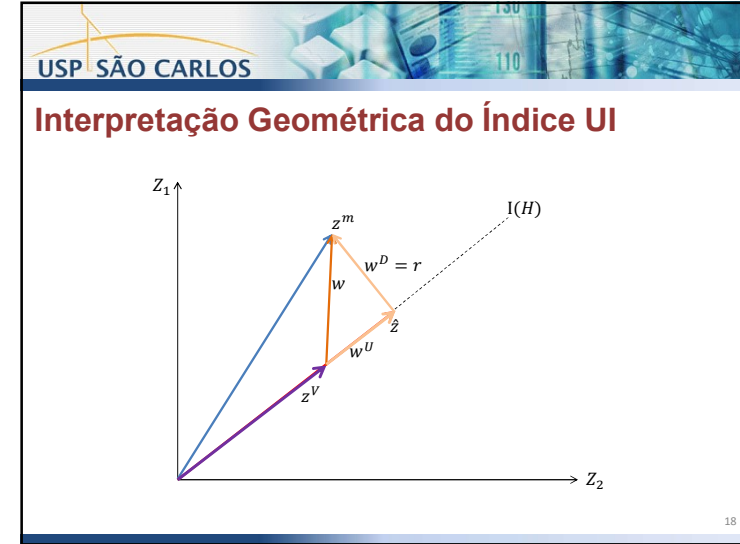
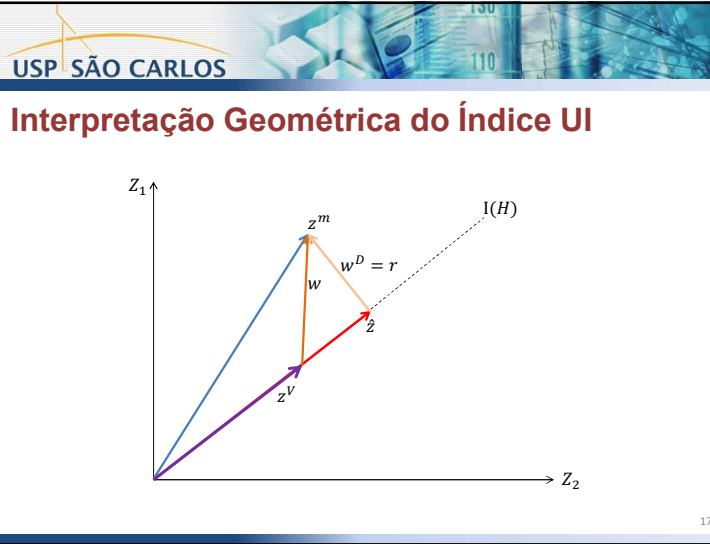
2

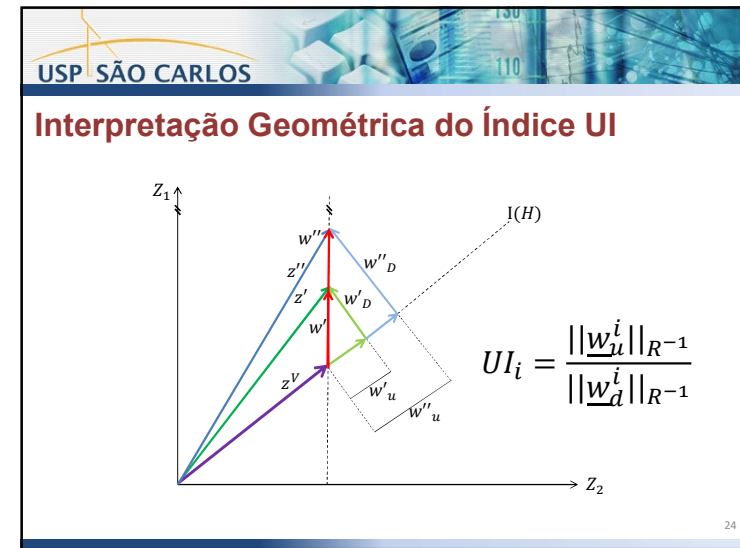
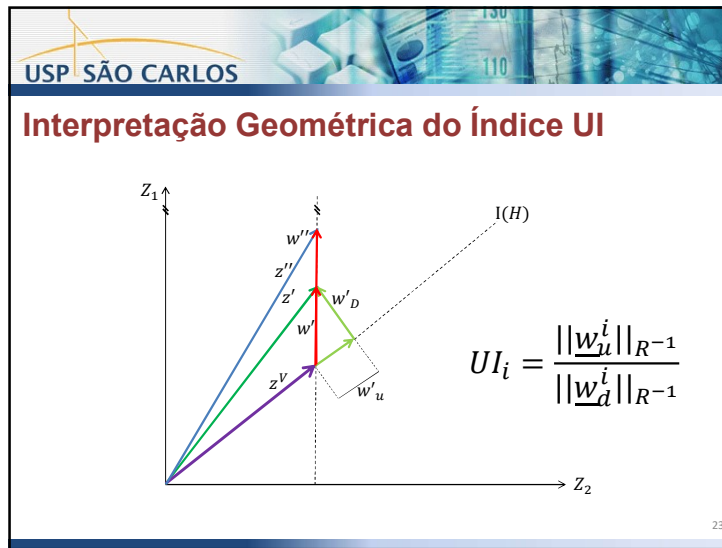
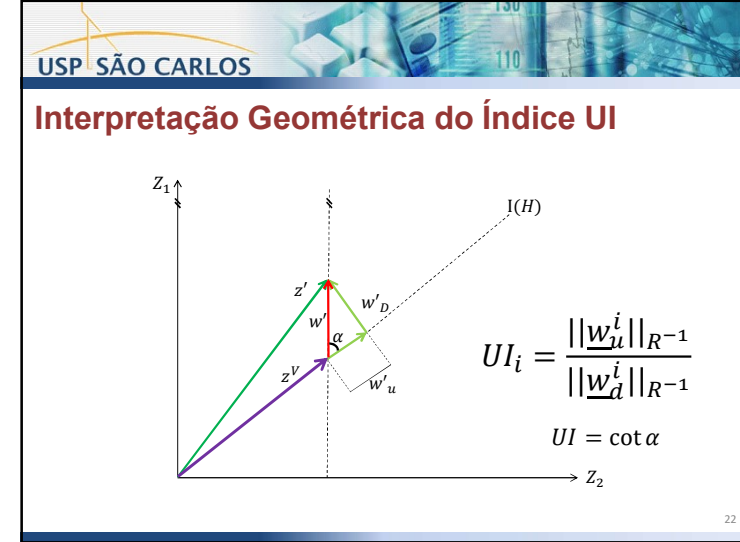
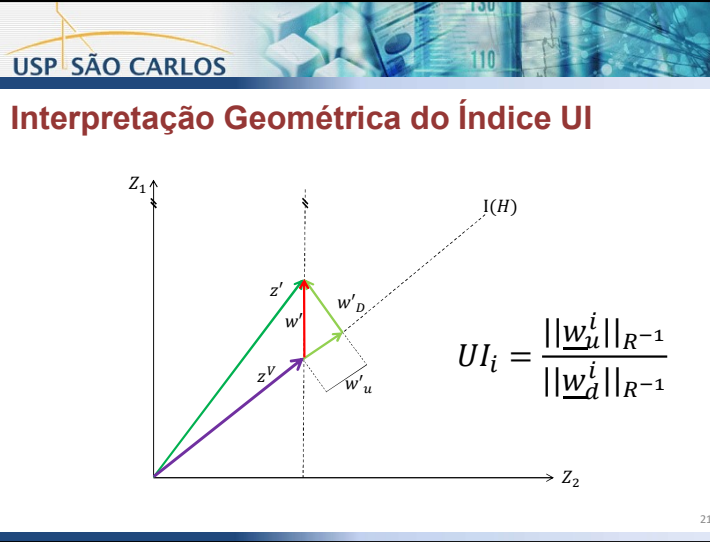












[illegible][illegible]

USP SÃO CARLOS

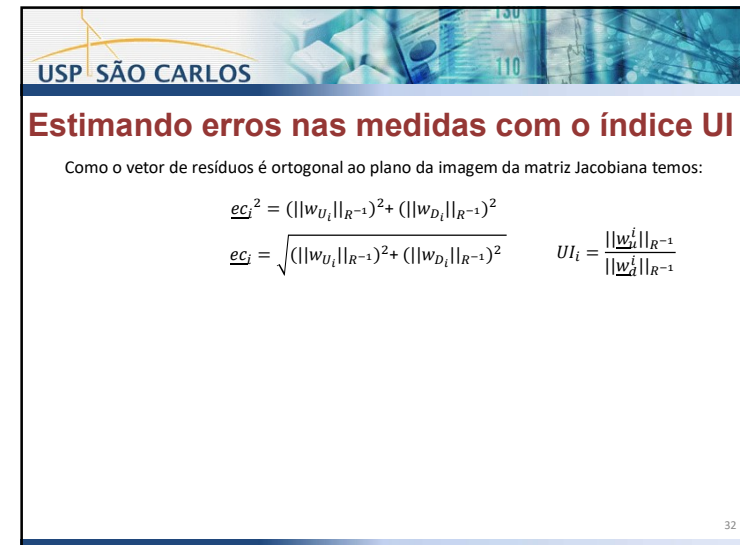
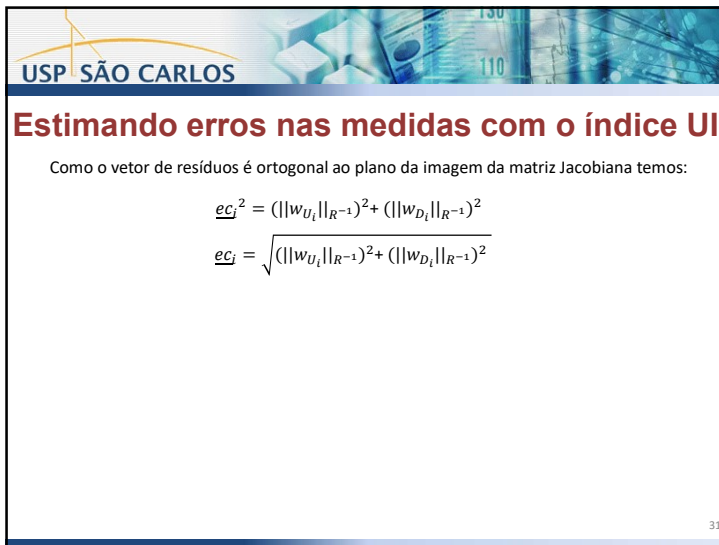
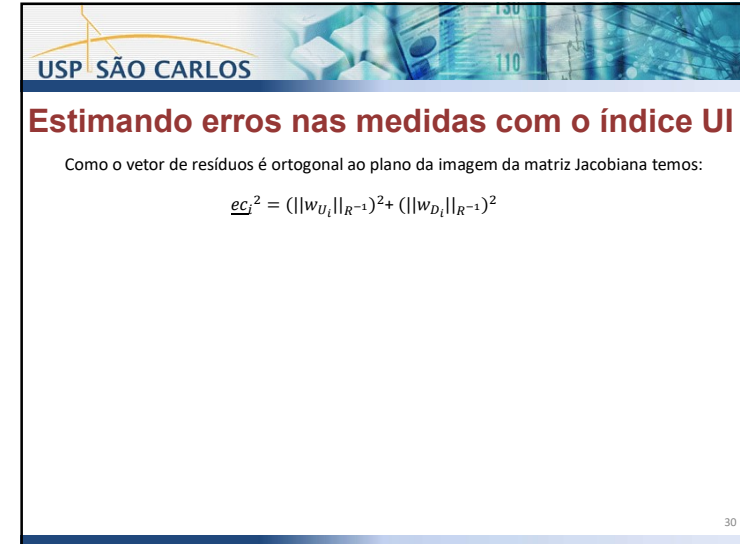
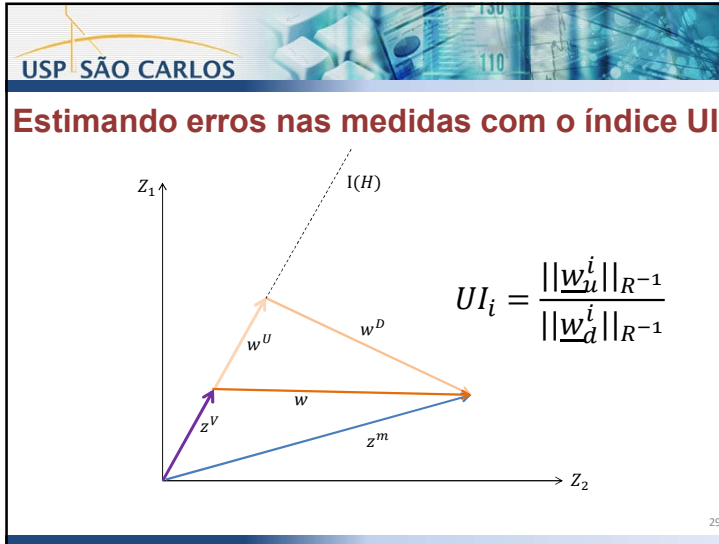
Exemplo de medida com alto Índice UI

Diagram illustrating a 2D coordinate system with axes Z_1 and Z_2 . The Z_1 axis is circled in red. A vector $w^D = r$ (blue) is shown. A vector w^m (orange) is shown. A vector w^U (light orange) is shown. A vector w^V (purple) is shown. A dashed line $l(H)$ is shown, perpendicular to w^U .

$$UI_i = \frac{\|\underline{w}_u^i\|_{R^{-1}}}{\|\underline{w}_d^i\|_{R^{-1}}}$$

27

[illegible]



USP SÃO CARLOS

Estimando erros nas medidas com o índice UI

Como o vetor de resíduos é ortogonal ao plano da imagem da matriz Jacobiana temos:

$$\begin{aligned} \underline{eC}_j^2 &= (\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2 \\ \underline{eC}_j &= \sqrt{(\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2} \quad UI_i = \frac{\|w_{U_i}\|_{R^{-1}}}{\|w_{D_i}\|_{R^{-1}}} \\ \underline{eC}_i &= \sqrt{(UI_i \|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2} \end{aligned}$$

33

USP SÃO CARLOS

Estimando erros nas medidas com o índice UI

Como o vetor de resíduos é ortogonal ao plano da imagem da matriz Jacobiana temos:

$$\begin{aligned} \underline{eC}_j^2 &= (\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2 \\ \underline{eC}_j &= \sqrt{(\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2} \quad UI_i = \frac{\|w_{U_i}\|_{R^{-1}}}{\|w_{D_i}\|_{R^{-1}}} \\ \underline{eC}_i &= \sqrt{(UI_i \|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2} \rightarrow \|w_{D_i}\|_{R^{-1}} = r_i \end{aligned}$$

34

USP SÃO CARLOS

Estimando erros nas medidas com o índice UI

Como o vetor de resíduos é ortogonal ao plano da imagem da matriz Jacobiana temos:

$$\begin{aligned} \underline{eC}_j^2 &= (\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2 \\ \underline{eC}_j &= \sqrt{(\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2} \\ \underline{eC}_i &= \sqrt{(UI_i \|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2} \\ \underline{eC}_i &= \sqrt{(UI_i \cdot r_i)^2 + r_i^2} \end{aligned}$$

35

USP SÃO CARLOS

Estimando erros nas medidas com o índice UI

Como o vetor de resíduos é ortogonal ao plano da imagem da matriz Jacobiana temos:

$$\begin{aligned} \underline{eC}_j^2 &= (\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2 \\ \underline{eC}_j &= \sqrt{(\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2} \\ \underline{eC}_i &= \sqrt{(UI_i \|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2} \\ \underline{eC}_j &= \sqrt{(UI_i \cdot r_i)^2 + r_i^2} \\ \underline{eC}_i &= \sqrt{(UI_i^2 + 1) \cdot r_i^2} \end{aligned}$$

36

USP SÃO CARLOS

Estimando erros nas medidas com o índice UI

Como o vetor de resíduos é ortogonal ao plano da imagem da matriz Jacobiana temos:

$$\underline{e}_{C_j}^2 = (\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2$$

$$\underline{e}_{C_j} = \sqrt{(\|w_{U_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2}$$

$$\underline{e}_{C_j} = \sqrt{(UI_i \|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2 + (\|w_{D_i}\|_{R^{-1}})^2}$$

$$\underline{e}_{C_j} = \sqrt{(UI_i \cdot r_j)^2 + r_i^2}$$

$$\underline{e}_{C_j} = \sqrt{(UI_i^2 + 1) \cdot r_i^2}$$

$$\underline{e}_{C_j} = r_j \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}$$

37

USP SÃO CARLOS

Estimando erros nas medidas com o índice UI

Torna-se então possível obter o erro composto em desvio padrão:

$$\underline{e}_{\sigma_i} = r_j^N \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}$$

38

USP SÃO CARLOS

Estimando erros nas medidas com o índice UI

Torna-se então possível obter o erro composto em desvio padrão:

$$\underline{e}_{\sigma_i} = r_j^N \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}$$

Logo com o \underline{e}_{σ_i} torna-se possível estimar o erro de uma medida:

$$\underline{\hat{w}}_i = \underline{e}_{\sigma_i} \cdot \sigma_i$$

39

USP SÃO CARLOS

Estimando erros nas medidas com o índice UI

Torna-se então possível obter o erro composto em desvio padrão:

$$\underline{e}_{\sigma_i} = r_j^N \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}$$

Logo com o \underline{e}_{σ_i} torna-se possível estimar o erro de uma medida:

$$\underline{\hat{w}}_i = \underline{e}_{\sigma_i} \cdot \sigma_i$$

A partir da estimativa do erro é possível corrigir a medida:

$$z_j^{corrigido} = z_j^{erro} - \underline{\hat{w}}_i$$

40

USP SÃO CARLOS

Estimando erros nas medidas com o índice UI

Torna-se então possível obter o erro composto em desvio padrão:

$$\underline{e}_{\sigma_i} = r_j^N \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}$$

Logo com o \underline{e}_{σ_i} torna-se possível estimar o erro de uma medida:

$$\hat{w}_i = \underline{e}_{\sigma_i} \cdot \sigma_i$$

A partir da estimativa do erro é possível corrigir a medida:

$$z_i^{corrigido} = z_i^{erro} - \hat{w}_i$$

$$z_j^{corrigido} = z_j^{erro} - \underline{e}_{\sigma_i} \cdot \sigma_i$$

41

USP SÃO CARLOS

Comparando \underline{e}_{σ_i} e o teste- \hat{b}

Através de uma análise comparativa entre a equação do \hat{b}_i e a equação do erro composto em desvio padrão (\underline{e}_{σ_i}), verifica-se:

$$\underline{e}_{\sigma_i} = r_j^N \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)} = r_j^N \cdot \sqrt{\frac{K_{ii}}{(1 - K_{ii})} + 1}$$

$$\underline{e}_{\sigma_i} = r_j^N \cdot \sqrt{\frac{K_{ii} + 1 - K_{ii}}{(1 - K_{ii})} + 1} = r_j^N \cdot \sqrt{\frac{1}{(1 - K_{ii})}}$$

$$\underline{e}_{\sigma_i} = r_j^N \cdot \sqrt{\frac{R_{ii}}{\Omega_{ii}}} = \frac{r_j^N \cdot \sigma_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} = \hat{b}_i$$

$$\underline{e}_{\sigma_i} = \hat{b}_i$$

42

USP SÃO CARLOS

Simulações Computacionais:

Foram implementados os seguintes algoritmos:

- Estimador de estado WLS convencional não linear
- Estimador de estado híbrido WLS, conforme proposto em *Fantin et al. (2015)*
- Teste do maior resíduo normalizado
- Teste do índice $J(x)$
- Processamento de EG através do Teste- \hat{b}
- Cálculo do UI em medidas
- Processamento de EGs através do erro composto em desvio padrão

43

USP SÃO CARLOS

Preparação de Dados:

Medidas sem ruídos:

1. Obtenção de medidas pelo ANAREDE
2. Cálculo dos desvios padrão

$$\sigma_i = \frac{|z_i^{fc}| \cdot pr}{3}$$

Sendo $pr_{scada} = 2\%$ e $pr_{PMU} = 0.5\%$

Geração de Medidas com ruídos gaussianos:

1. Obtenção de valores de referência pelo ANAREDE
2. Cálculo dos desvios padrão
3. Sorteiam-se número aleatórios com distribuição normal de média zero e desvios padrão calculados no passo 2.
4. Quando os números sorteados forem menores (em módulo) que 2,5 vezes os desvios padrão das medidas, adicionam-se, esses números, aos valores de referência obtidos pelo fluxo de carga

44

Testes realizados:

- Foram adicionados EGs simples, em uma medida i de cada vez, com um valor de $10. \sigma_i$ e $20. \sigma_i$
- Foram testados vários métodos de processamento de EGs baseados nos resíduos do estimador WLS

Limitares de Detecção		
Métodos	SCADA	PMUs
Índice $J(x)$	$\lambda = \chi_{43;(1-0,05)} \cong 58$	$\lambda = \chi_{189;(1-0,05)} \cong 222$
Resíduos Normalizados	$\beta = 3$	$\beta = 3$
Teste- \hat{b}	$c = 4$	$c = 4$
e_{σ_i}	$c = 3$	$c = 3$

45

Algoritmo teste- \hat{b}

- Determinar as variáveis de estado
- Calcular os r_N das medidas
- Encontrar a medida i de maior resíduo normalizado em módulo
- Determinar o erro estimado \hat{b}_i
- Verificar se a medida i possui EG
 - Se $\hat{b}_i > c$, a medida possui EG
 - Se $\hat{b}_i \leq c$, a medida não possui EG
- Remova a medida com erro grosseiro

46

Algoritmo e_{σ}

- Determinar as variáveis de estado
- Calcular as matrizes K e $(I - K)$
- Calcular os r_N e o índice UI das medidas
- Calcular o e_{σ}
- Encontrar a medida i de maior resíduo normalizado em módulo
- Verificar se a medida i possui EG
 - Se $e_{\sigma_i} > c$, a medida possui EG
 - Se $e_{\sigma_i} \leq c$, a medida não possui EG
- Corrigir a medida com EG

47

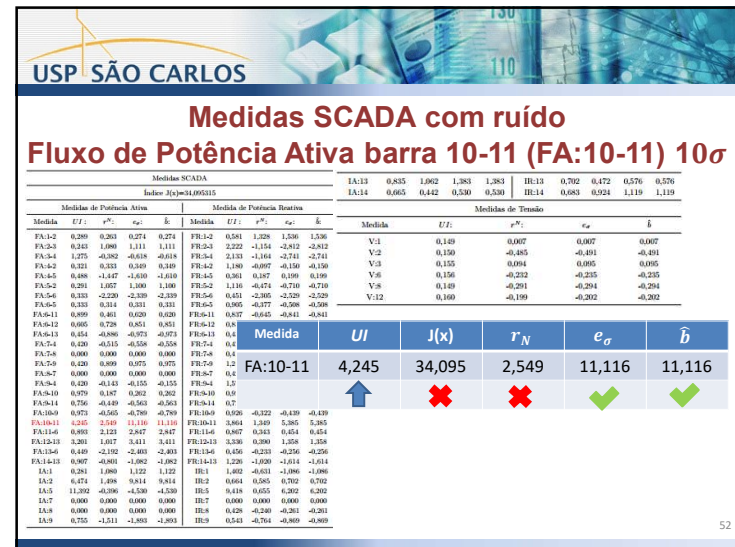
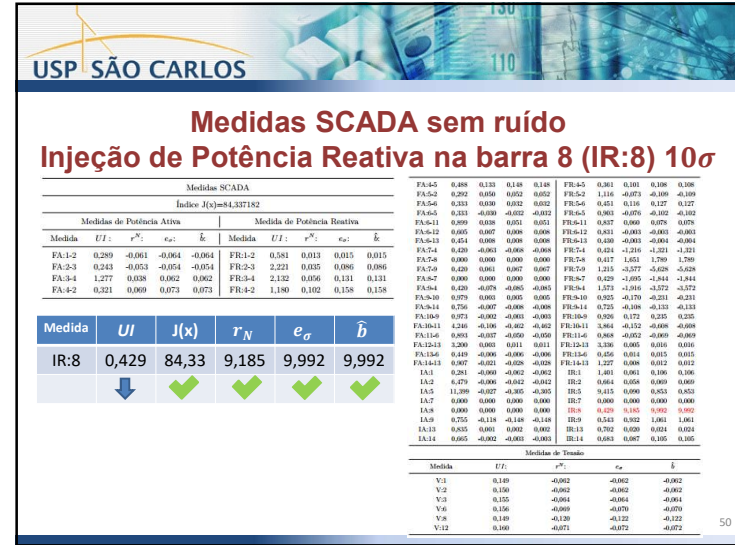
Medidas SCADA sem ruído Injeção de Potência Ativa na barra 5 (IA:5) 10σ

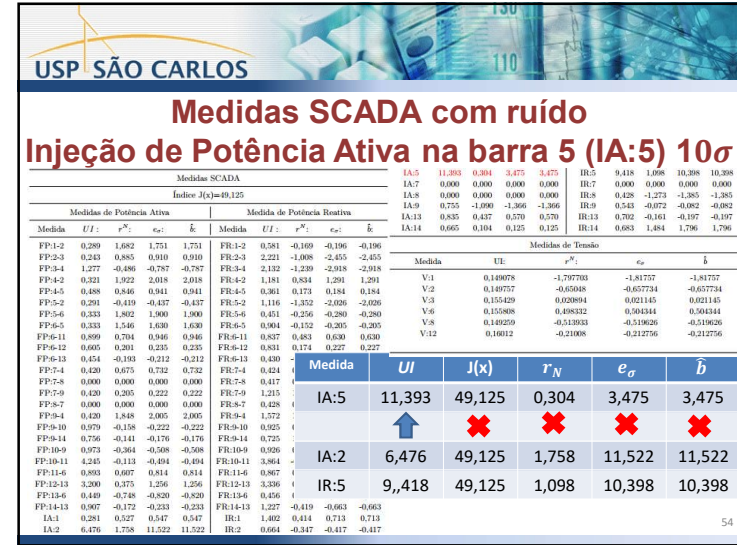
Medidas SCADA									
Índice $J(x)=0,704557$									
Medidas de Potência Ativa					Medidas de Potência Reativa				
Medida	UI	r^N	e_{σ}	\hat{b}	Medida	UI	r^N	e_{σ}	\hat{b}
FA-1-2	0,289	0,178	0,185	0,185	FR-1-2	0,581	-0,009	-0,114	-0,114
FA-2-3	0,243	0,056	0,058	0,058	FR-2-3	2,221	0,086	0,088	0,088
FA-3-4	1,276	0,145	0,235	0,235	FR-3-4	2,133	0,093	0,219	0,219
FA-4-2	0,321	-0,121	-0,128	-0,128	FR-4-2	1,380	-0,165	-0,256	-0,256
FA-5-5	0,488	0,643	0,716	0,716	FR-4-5	0,361	-0,094	-0,100	-0,100
FA-5-2	0,291	-0,379	-0,395	-0,395	FR-5-2	1,116	0,281	0,421	0,421
FA-5-6	0,333	-0,155	-0,164	-0,164	FR-5-6	0,451	-0,082	-0,090	-0,090
FA-6-5	0,333	0,155	0,164	0,164	FR-6-5	0,904	-0,123	-0,166	-0,166
FA-6-11	0,899	-0,019	-0,026	-0,026	FR-6-11	0,857	-0,023	-0,030	-0,030
FA-6-12	0,605	-0,004	-0,005	-0,005	FR-6-12	0,831	0,000	-0,001	-0,001
FA-6-13	0,454	-0,002	-0,002	-0,002	FR-6-13	0,430	-0,005	-0,006	-0,006
FA-7-4	0,429	-0,010	-0,011	-0,011	FR-7-4	0,424	0,028	0,031	0,031
FA-7-8	0,000	0,000	0,000	0,000	FR-7-8	0,417	0,007	0,008	0,008
FA-7-9	0,429	0,009	0,009	0,009	FR-7-9	1,215	-0,055	-0,087	-0,087
FA-8-7	0,000	0,000	0,000	0,000	FR-8-7	0,428	-0,010	-0,011	-0,011
FA-9-4	0,429	-0,011	-0,011	-0,011	FR-9-4	1,573	-0,073	-0,105	-0,105
FA-9-10	0,979	0,006	0,009	0,009	FR-9-10	0,925	0,031	0,042	0,042
FA-9-14	0,756	0,009	0,012	0,012	FR-9-14	0,725	0,019	0,024	0,024
FA-10-9	0,973	-0,005	-0,007	-0,007	FR-10-9	0,926	-0,032	-0,043	-0,043
FA-10-11	4,246	0,053	0,232	0,232	FR-10-11	3,964	0,058	0,231	0,231
FA-11-6	0,893	0,017	0,023	0,023	FR-11-6	0,867	0,020	0,026	0,026
FA-12-13	3,200	-0,004	-0,013	-0,013	FR-12-13	3,336	-0,002	-0,007	-0,007

Medidas de Tensão					
Medida	UI	r^N	e_{σ}	\hat{b}	
V-1	0,149	0,055	0,055	0,055	
V-2	0,150	0,053	0,054	0,054	
V-3	0,155	0,054	0,055	0,055	
V-6	0,156	0,059	0,059	0,059	
V-8	0,149	0,047	0,048	0,048	
V-12	0,160	0,051	0,051	0,051	

Medida	UI	$J(x)$	r_N	e_{σ}	\hat{b}
IA:5	11,397	0,764	0,874	10,001	10,001
	↑	✗	✗	✓	✓

48





USP SÃO CARLOS

Sistema Híbrido com ruído

Os resultados obtidos com o plano de medição com medidas SCADA e medidas fasoriais sincronizadas com ruído foram muito parecidos com os resultados sem ruído.

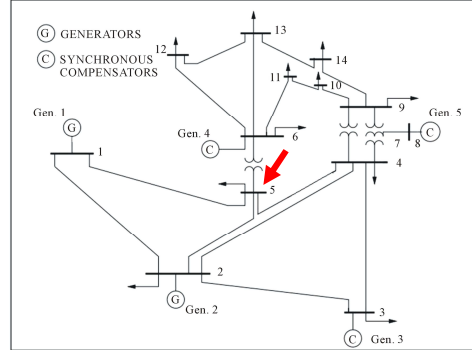
Isso ocorreu devido a alta redundância das medidas, que possibilita a obtenção de um plano de medição formado por medidas com menores índices UI.

Nível de redundância Global = $\frac{m}{N} \cong 7,7$

57

USP SÃO CARLOS

Influência do PMU

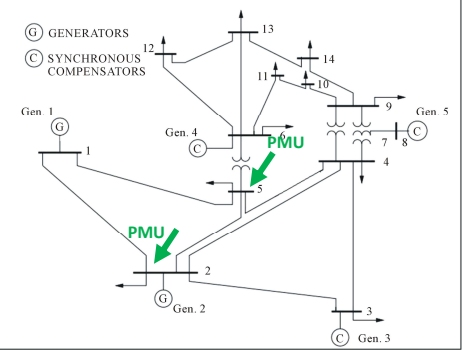


	Com ruído
	Sem PMU
Medida	UI(com ruído):
IA:5	11,397675
IR:5	9,41541

58

USP SÃO CARLOS

Influência do PMU

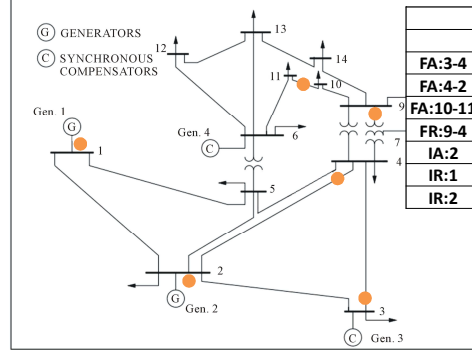


	Com ruído
	Com PMU
Medida	UI(com ruído):
V:2	0,158831
V:5	0,160955
Teta:2	2,267373
Teta:5	2,118803

59


USP SÃO CARLOS

Influência do PMU



	Com ruído	
	Sem PMU	Com PMU
FA:3-4	1,2769	1,0878
FA:4-2	0,3212	0,3035
FA:10-11	4,2456	4,2236
FR:9-4	1,5728	1,5602
IA:2	6,4782	5,8205
IR:1	1,4014	1,3739
IR:2	0,6638	0,5752

60




USP SÃO CARLOS

Considerações Finais:

- O índice UI classifica as medidas de acordo com o quanto o resíduo caracteriza o erro.
- As medidas com índice UI elevado apresentam maior dificuldade no processamento de EGs através da análise dos resíduos.
- O índice UI varia muito pouco em relação a medidas sem ou com ruído gaussiano.
- Os valores de \hat{b} e e_σ calculados foram iguais.

61




USP SÃO CARLOS

Considerações Finais:

- Nos testes sem ruídos gaussianos a medida portadora de EG foi sempre a de maior resíduo normalizado.
 - Nos testes com ruído gaussianos apresentou casos em que isso não ocorreu.
- O método de $I(x)$ foi o que apresentou pior desempenho no processamento de EGs.
- Nos sistemas híbridos os testes funcionaram bem devido a alta redundância de medidas.
- O último teste apresentado mostrou uma melhoria no processamento de EGs utilizando PMUs.

62



USP SÃO CARLOS

Índice UI

Autora: Camila Silva Vieira
Orientador: Prof. João Bosco Augusto London Jr.