

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Kelvin Henri Kobs**

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DE ESTIMADOR DE  
ESTADOS A ERROS DE MEDIÇÃO E ESTRATÉGIAS  
DE MITIGAÇÃO**

**Santa Maria, RS**

**2024**

**Kelvin Henri Kobs**

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DE ESTIMADOR DE ESTADOS A ERROS  
DE MEDIÇÃO E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria – Campus Santa Maria (UFSM-RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

**Orientador(a):** Prof. Gustavo Marchesan

Santa Maria, RS, Brasil

2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de  
Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica.**

Elaborado por  
**Kelvin Henri Kobs**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Engenheiro Eletricista**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Gustavo Marchesan, Prof. Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

---

Ghedy Cardoso Junior, Prof. Dr. (UFSM)  
(Professor convidado)

---

Olinto C. B. De Araujo, Prof. Dr. (UFSM)  
(Professor convidado)

**Santa Maria, 3 de maio de 2024**

## RESUMO

### ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DE ESTIMADOR DE ESTADOS A ERROS DE MEDIÇÃO E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO

AUTOR: KELVIN HENRI KOB  
ORIENTADOR: GUSTAVO MARCHESAN

Este trabalho tem como objetivo avaliação da sensibilidade do estimador de estados a erros de medição em sistemas elétricos de potência. A análise investiga o impacto das imprecisões de medição nos estados estimados e explora estratégias para mitigar esses efeitos. Foram realizados teste em um sistema de três barramentos com oito medidas, variando o erro de medição, em torno da condição de erro zero, de  $\pm 0.4$  pu. Para mitigar esse erro, foram simulados testes em que a variável composta de erro de medição tivesse seu peso reduzido. Com base nesse processo, foram analisadas estatisticamente as respostas dos estados estimados e dos resíduos obtidos das simulações, através dos erros médios absolutos percentuais e do desvio padrão das variáveis. Busca-se aprimorar a compreensão de como os erros de medição afetam o desempenho dos estimadores de estados.

**Palavras-chave:** Estimação de Estados, Erros de Medição, Análise de Sensibilidade, Estratégias de Mitigação, Sistemas de Energia.

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF ESTIMATOR SENSITIVITY TO MEASUREMENT ERROR VARIATIONS AND MITIGATION STRATEGIES

AUTHOR: KELVIN HENRI KOBS  
ADVISOR: GUSTAVO MARCHESAN

This work aims to evaluate the sensitivity of the state estimator to measurement errors in power electrical systems. The analysis investigates the impact of measurement inaccuracies on the estimated states and explores strategies to mitigate these effects. Tests were conducted on a three-bus system with eight measurements, varying the measurement error around the zero error condition, from  $\pm 0.4$  pu. To mitigate this error, tests were simulated in which the measurement error composite variable had its weight reduced. Based on this process, the responses of the estimated states and residuals obtained from the simulations were statistically analyzed, using the mean absolute percentage errors and the standard deviation of the variables. The goal is to enhance the understanding of how measurement errors affect the performance of state estimators.

**Keywords:** State Estimation, Measurement Errors, Sensitivity Analysis, Mitigation Strategies, Power Systems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de Erros.....	8
Figura 2: Configuração de rede tipo $\pi$ .....	9
Figura 3: Estimador de Estados Balanceado .....	14
Figura 4: Diagrama unifilar e medição do modelo de 3 barramentos. ....	16
Figura 5: Variação de estados das Tensões para variação de erro em P12 .....	20
Figura 6: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em P12 .....	20
Figura 7: Variação de Resíduos para variação de erro em P12 .....	21
Figura 8: Variação de estados das Tensões para variação de erro em P13 .....	24
Figura 9: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em P13 .....	25
Figura 10: Variação de Resíduos para variação de erro em P13 .....	25
Figura 11: Variação de estados das Tensões para variação de erro em P22 .....	28
Figura 12: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em P22 .....	29
Figura 13: Variação de Resíduos para variação de erro em P22 .....	29
Figura 14: Variação de estados das Tensões para variação de erro em Q12.....	32
Figura 15: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em Q12 .....	33
Figura 16: Variação de Resíduos para variação de erro em Q12 .....	33
Figura 17: Variação de estados das Tensões para variação de erro em Q13.....	36
Figura 18: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em Q13 .....	37
Figura 19: Variação de Resíduos para variação de erro em Q13 .....	37
Figura 20: Variação de estados das Tensões para variação de erro em Q22.....	40
Figura 21: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em Q22 .....	41
Figura 22: Variação de Resíduos para variação de erro em Q22 .....	41
Figura 23: Variação de estados das Tensões para variação de erro em V1 .....	44
Figura 24: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em V1.....	45
Figura 25: Variação de Resíduos para variação de erro em V1.....	45
Figura 26: Variação de estados das Tensões para variação de erro em V2 .....	48
Figura 27: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em V2.....	49
Figura 28: Variação de Resíduos para variação de erro em V2.....	49
Figura 29: Variação de Resíduos para variação de erro em P22 e peso 90% .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características topológicas da rede de 3 barramentos.....	17
Tabela 2: Medidas e pesos da rede de 3 barramentos.....	17
Tabela 3: Estados Estimados com variação de erro de medição em P12.....	19
Tabela 4: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em P12.....	19
Tabela 5: Resíduos com variação de erro medição em P12.....	19
Tabela 6: Erro de resíduos para diferentes erros de medição em P12.....	19
Tabela 7: Variação dos estados estimados para variação do erro em P12.....	22
Tabela 8: Variação dos resíduos para variação em P12.....	22
Tabela 9: Estados Estimados com variação de erro de medição em P13.....	23
Tabela 10: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em P13.....	23
Tabela 11: Resíduos com variação de erro de medição em P13.....	23
Tabela 12: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em P13.....	24
Tabela 13: Variação dos estados estimados para variação do erro em P13.....	26
Tabela 14: Variação dos resíduos para variação em P13.....	26
Tabela 15: Estados Estimados com variação de erro de medição em P22.....	27
Tabela 16: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em P22.....	27
Tabela 17: Resíduos com variação de erro de medição em P22.....	28
Tabela 18: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em P22.....	28
Tabela 19: Variação dos estados estimados para variação do erro em P22.....	30
Tabela 20: Variação dos resíduos para variação em P22.....	30
Tabela 21: Estados Estimados com variação de erro de medição em Q12.....	31
Tabela 22: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em Q12.....	31
Tabela 23: Resíduos com variação de erro em Q12.....	32
Tabela 24: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em Q12.....	32
Tabela 25: Variação dos estados estimados para variação do erro em Q12.....	34
Tabela 26: Variação dos resíduos para variação em Q12.....	34
Tabela 27: Estados Estimados com variação de erro de medição em Q13.....	35
Tabela 28: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em Q13.....	35
Tabela 29: Resíduos com variação de erro de medição em Q13.....	36
Tabela 30: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em Q13.....	36
Tabela 31: Variação dos estados estimados para variação do erro em Q13.....	38
Tabela 32: Variação dos resíduos para variação em Q13.....	38
Tabela 33: Estados Estimados com variação de erro medição em Q22.....	39
Tabela 34: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em Q22.....	39
Tabela 35: Resíduos com variação de erro medição em Q22.....	40
Tabela 36: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em Q22.....	40
Tabela 37: Variação dos estados estimados para variação do erro em Q22.....	42
Tabela 38: Variação dos resíduos para variação em Q22.....	42
Tabela 39: Estados Estimados com variação de erro de medição em V1.....	43
Tabela 40: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em V1.....	43
Tabela 41: Resíduos com variação de erro de medição em V1.....	44
Tabela 42: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em V1.....	44

Tabela 43: Variação dos estados estimados para variação do erro em V1 .....	46
Tabela 44: Variação dos resíduos para variação de erro em V1 .....	46
Tabela 45: Estados Estimados com variação de erro de medição em V2 .....	47
Tabela 46: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em V2.....	47
Tabela 47: Resíduos com variação de erro de medição em V2 .....	48
Tabela 48: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em V2 .....	48
Tabela 49: Variação dos estados estimados para variação do erro em V2 .....	50
Tabela 50: Variação dos resíduos para variação em V2.....	50
Tabela 51: Estados Estimados com variação de erro medição em P22 e peso 90%.....	52
Tabela 52: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em P22 e peso 90%.....	52
Tabela 53: Resíduos com variação de erro de medição em P22 e peso 90% .....	53
Tabela 54: Variação dos resíduos para diferentes erros de medição em P22 e peso 90%.....	53
Tabela 55: Variação dos estados estimados para variação do erro em P22 e peso 90% .....	54
Tabela 56: Variação dos resíduos para variação em P22 e peso 90%.....	54
Tabela 57: Resíduos para variação de peso para erro de medição em P22 .....	55
Tabela 58: Estados Estimados para variação de peso para erro de medição em P22 .....	55
Tabela 59: Resíduos para variação de peso para erro em V1 .....	56
Tabela 60: Estados Estimados para variação de peso para erro em V1 .....	56
Tabela 61: Desvio Padrão para EE para variação de peso em P22 .....	57
Tabela 62: Desvio Padrão para resíduos para variação de peso em P22.....	58
Tabela 63: Desvio Padrão para EE para variação de peso em V1 .....	58
Tabela 64: Desvio Padrão para resíduos para variação de peso em V1 .....	58
Tabela 65: Estados estimados com variação de erro de medição em P22 e peso 50%.....	64
Tabela 66: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em P22 e peso 50%.....	64
Tabela 67: Resíduos com variação de erro de medição em P22 e peso 50% .....	64
Tabela 68: Variação dos resíduos para diferentes erros de medição em P22 e peso 50%.....	64
Tabela 69: Variação dos estados estimados para variação de erro em P22 e peso 50% .....	65
Tabela 70: Variação dos resíduos para variação de erro de medição em P22 e peso 50% .....	65
Tabela 71: Estados Estimados com variação de erro de medição em P22 e Peso 10%.....	65
Tabela 72: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em P22 e peso 50%.....	65
Tabela 73: Resíduos com variação de erro de medição em P22 e peso 10% .....	66
Tabela 74: Variação dos resíduos para diferentes erros de medição em P22 e peso 10%.....	66
Tabela 75:Variação dos estados estimados para variação do erro em P22 e peso 10% .....	66
Tabela 76: Variação dos resíduos para variação em P22 e peso 10%.....	66
Tabela 77: Estados Estimados com variação de erro de medição em P22 e Peso 0%.....	67
Tabela 78: Estados Estimados com variação de erro em P22 e Peso 0%.....	67
Tabela 79: Resíduos com variação de erro em P22 e peso 0% .....	67
Tabela 80: Resíduos com variação de erro em P22 e peso 0% .....	67
Tabela 81: Variação dos estados estimados para variação do erro em P22 e peso 0% .....	68
Tabela 82: Variação dos resíduos para variação em P22 e peso 0%.....	68
Tabela 83: Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e Peso 90%.....	69
Tabela 84: Variação dos Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e peso 90% ....	69
Tabela 85: Resíduos com variação de erro em V1 e peso 90%.....	69
Tabela 86: Variação dos Resíduos com variação de erro de medição em V1 e peso 90% .....	69
Tabela 87: Variação dos estados estimados para variação do erro em V1 e peso 90% .....	70



Tabela 88: EMAP dos resíduos para variação em V1 e peso 90%.....	70
Tabela 89: Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e Peso 50%.....	70
Tabela 90: Variação dos Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e peso 50%....	70
Tabela 91: Resíduos com variação de erro em V1 e peso 50%.....	71
Tabela 92: Variação dos Resíduos com variação de erro de medição em V1 e peso 50% .....	71
Tabela 93: Variação dos estados estimados para variação do erro de medição em V1 e peso 50% ...	71
Tabela 94: Variação dos resíduos para variação em do erro de medição em V1 e peso 50%.....	71
Tabela 95: Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e Peso 10%.....	72
Tabela 96: Variação dos Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e peso 10%....	72
Tabela 97: Resíduos com variação de erro em V1 e peso 10%.....	72
Tabela 98: Variação dos Resíduos com variação de erro de medição em V1 e peso 10% .....	72
Tabela 99: Variação dos estados estimados para variação do erro de medição em V1 e peso 10% ...	73
Tabela 100: Variação dos resíduos para variação em do erro de medição em V1 e peso 10%.....	73
Tabela 101: Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e Peso 0%.....	73
Tabela 102: Variação dos Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e peso 0%....	73
Tabela 103: Resíduos com variação de erro em V1 e peso 0%.....	74
Tabela 104: Variação dos Resíduos com variação de erro de medição em V1 e peso 0% .....	74
Tabela 105: Variação dos estados estimados para variação do erro de medição em V1 e peso 0% ...	74
Tabela 106: Variação dos resíduos para variação em do erro de medição em V1 e peso 0%.....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DMS	<i>Distribution Management System</i>
DP	Desvio Padrão
EE	Estimador de Estados
EM	Erros de Medição
EMAp	Erro médio absoluto percentual
MQP	Método de Mínimos Quadrados Ponderados
NR	Método de Newton-Rapshon
SEPs	Sistemas Elétricos de Potência
Var.	Variação

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Considerações gerais.....	1
1.2	Motivação.....	1
1.3	Justificativa.....	2
1.4	Objetivos .....	2
1.4.1	Objetivo Geral .....	2
1.4.2	Objetivos Específicos.....	3
1.5	Metodologia .....	3
1.6	Estrutura do trabalho.....	4
1.7	Considerações Finais .....	4
2	ESTIMADOR DE ESTADOS .....	6
2.1	Considerações gerais.....	6
2.1.1	Estado da arte .....	6
2.1.2	Estimadores de Estado .....	7
2.1.3	Tipos de Erros.....	8
2.1.4	Equacionamento .....	9
3	SIMULAÇÕES E RESULTADOS .....	15
3.1	Considerações gerais.....	15
3.2	Problema proposto .....	15
3.3	Simulações.....	16
3.4	Erros de medição.....	17
3.4.1	Erro Médio Absoluto Percentual (EMAp).....	18
3.4.2	Erro de Medição em P12.....	18
3.4.3	Erro de Medição em P13.....	23
3.4.4	Erro de Medição P22 .....	27
3.4.5	Erro de Medição Q12 .....	31
3.4.6	Erro de Medição Q13 .....	35
3.4.7	Erro de Medição Q22 .....	39
3.4.8	Erro de Medição V1.....	43
3.4.9	Erro de Medição V2.....	47
3.5	Proposta Metodologia de Variação de pesos .....	51

3.5.1	Varição do Peso para 90% em P22 .....	52
3.5.2	Resultados do teste de variação de Peso .....	55
3.5.3	Varição do Peso em V1 .....	56
3.6	Resultados E Discussões .....	57
3.6.1	Resultados .....	57
3.6.2	Discussões .....	59
4	CONCLUSÕES .....	61
	REFERÊNCIAS .....	63
5	APÊNDICE A .....	64
6	APÊNDICE B .....	69

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Em tempos recentes, os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) têm passado por transformações significativas em suas estruturas, regulações e tecnologias empregadas para operações. Essas transformações têm demandado consistentemente a introdução de ferramentas capazes de fornecer análises precisas e confiáveis do desempenho global do sistema. Nesse contexto, foi desenvolvida uma ferramenta voltada para a análise de medições, com o propósito de avaliar as condições operacionais da rede. Esta ferramenta, denominada Estimador de Estados (EE), destina-se a estimação dos estados de parâmetros específicos do circuito, tais como magnitudes de tensão e ângulos de fase. O desenvolvimento do EE concentra-se na análise de redes trifásicas balanceadas de distribuição de energia.

Além disso, este estudo se concentra na avaliação da sensibilidade do EE diante a Erros de Medição (EM) e na formulação de estratégias de mitigação. A meta é compreender como as variações nos EM impactam os resultados do EE, buscando identificar abordagens capazes de reduzir tais efeitos. A análise dessas sensibilidades e o desenvolvimento de estratégias de mitigação são etapas fundamentais para aprimorar a precisão e a confiabilidade do estimador em situações variáveis de medição.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A variabilidade e as incertezas inerentes às medições em SEPs são inevitáveis devido a diversos fatores, como ruídos elétricos, imprecisões nos equipamentos de medição e condições ambientais variáveis. Diante dessa realidade, a minimização do impacto dessas incertezas torna-se crucial para aprimorar a precisão e a confiabilidade das estimativas obtidas pelos EE. Uma estratégia viável para atenuar esses efeitos reside na possibilidade de ajustar os pesos atribuídos aos EM. Essa abordagem, ao influenciar diretamente a importância relativa de cada medição no processo de estimação, pode mitigar possíveis distorções nos resultados finais, promovendo estimativas mais próximas da realidade operacional dos sistemas.

Ao compreender como essas variações afetam os resultados, é possível identificar padrões, tendências e correlações nos dados, fornecendo uma compreensão mais profunda do comportamento do sistema elétrico. Dessa forma, a capacidade de adaptar os pesos das

medições não só aprimora a performance atual dos estimadores, mas também serve como um guia fundamental para o desenvolvimento de futuros modelos mais robustos e adaptáveis.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O aprimoramento da precisão e confiabilidade dos EE desempenha um papel crucial na operação de sistemas de energia. A qualidade das estimativas resultantes desses métodos influencia diretamente a estabilidade e eficiência operacional desses sistemas. Compreender a influência dos EM sobre os estados estimados é de suma importância para melhorar a qualidade e a confiabilidade das decisões baseadas nessas estimativas. Ao identificar e mitigar os efeitos desses erros nos estimadores de estados, é possível aprimorar a precisão das informações fornecidas, contribuindo significativamente para a tomada de decisões mais assertivas e eficazes no gerenciamento e controle dos sistemas elétricos.

A redução do impacto dos EM não apenas aprimora a precisão das estimativas, mas também desempenha um papel fundamental na garantia da segurança e eficiência dos SEPs. A minimização desses erros permite uma operação mais confiável e estável dos sistemas, reduzindo potenciais riscos operacionais e contribuindo para a prevenção de falhas ou interrupções indesejadas. Portanto, a investigação aprofundada sobre como mitigar e compreender os efeitos dos EM nos EE é essencial para promover a segurança, confiabilidade e eficiência contínua dos SEPs.

### 1.4 OBJETIVOS

#### 1.4.1 **Objetivo Geral**

Desenvolver uma análise sistemática da sensibilidade do Estimador de Estados (EE) em Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) diante de variações nos erros de medição (EM), visando compreender e mitigar os impactos dessas variações nas estimativas, aprimorando assim a precisão e a confiabilidade das informações obtidas.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar o efeito das variações nos EM nas estimativas dos estados do sistema elétrico de potência, analisando seu impacto na qualidade das estimativas e na estabilidade operacional.
- Avaliar os padrões e correlações resultantes das variações nos EM nos resultados do EE, identificando possíveis relações entre as variações e os desvios das estimativas.
- Propor estratégias eficazes de redução do impacto dos EM, ajustando os pesos atribuídos a essas medições no processo de estimação, visando aprimorar a precisão e a confiabilidade das estimativas.
- Validar as estratégias propostas por meio de simulações computacionais e análise estatística, verificando a eficácia dessas estratégias na redução dos efeitos das variações nos EM sobre as estimativas dos estados do sistema elétrico de potência.

## 1.5 METODOLOGIA

A metodologia proposta para este estudo abrange uma série de etapas estratégicas. Inicialmente, a coleta de dados é essencial, reunindo informações detalhadas sobre o sistema elétrico de potência, incluindo medidas reais, topologia da rede e outras características relevantes. Em seguida, é crucial ajustar o EE, considerando sua adequação ao sistema em questão.

As simulações de variações nos EM são passos fundamentais. Isso envolve a introdução controlada de erros nos dados de medição para criar diferentes cenários de erro. O objetivo é analisar como essas variações afetam as estimativas dos estados do sistema, utilizando o EE para processar esses dados.

Uma vez realizadas as simulações, a análise da sensibilidade do EE é conduzida. Isso implica em avaliar como as estimativas dos estados variam em resposta às diferentes variações simuladas nos EM. Padrões e correlações entre as variações dos EM e as alterações nas estimativas são identificados através de técnicas estatísticas.

Com base nessa análise, são propostas estratégias para mitigar o impacto dos EM nas estimativas. Isso pode envolver ajustes nos pesos atribuídos às medições ou outras técnicas

corretivas. Após a proposição das estratégias, estas são implementadas no EE e sua eficácia é avaliada em reduzir os efeitos das variações nos EM.

A validação das estratégias propostas é conduzida por meio de simulações adicionais e análises estatísticas. Os resultados obtidos antes e depois da aplicação das estratégias são comparados para verificar melhorias na precisão e confiabilidade das estimativas. Por fim, todas as etapas da metodologia são documentadas, apresentando os resultados, análises estatísticas e conclusões decorrentes das estratégias de mitigação aplicadas.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Inicialmente, contextualiza-se a importância desses estimadores, visando aprimorar a estabilidade e a eficiência dos sistemas elétricos. Compreender o funcionamento e os desafios enfrentados pelos Estimadores de Estados é crucial para minimizar o impacto das incertezas nas medições e garantir estimativas mais precisas.

No capítulo sobre o EE, são abordados aspectos cruciais desse componente, iniciando-se com uma revisão detalhada sobre seu estado da arte, evolução histórica e suas aplicações práticas em SEPs. Posteriormente, são apresentados conceitos fundamentais, incluindo a definição do EE, seu equacionamento e os métodos empregados para solucionar as equações subjacentes.

O terceiro capítulo concentra-se nas simulações e nos resultados obtidos. Detalha-se a metodologia de simulação empregada, os diferentes cenários de teste considerados e os parâmetros utilizados nas simulações. Os resultados são minuciosamente analisados, considerando diferentes métricas de avaliação e comparando os resultados obtidos com estudos anteriores, visando à compreensão do desempenho do EE sob diversas condições.

No capítulo subsequente, as discussões e conclusões são apresentadas, fornecendo uma análise crítica dos resultados obtidos. Destacam-se aspectos relevantes, discutem-se implicações práticas e oferecem-se recomendações para pesquisas futuras. Por fim, a lista de referências bibliográficas utilizadas é disponibilizada, completando a fundamentação teórica do estudo.

## 1.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da análise detalhada realizada neste estudo sobre os EE em SEPs, torna-se evidente a sua importância na busca por sistemas mais estáveis e eficientes. A revisão



minuciosa do estado da arte permitiu compreender a evolução e aplicabilidade desses estimadores, enquanto a análise dos desafios enfrentados e das metodologias de solução empregadas proporcionou uma visão mais clara de suas complexidades.

## 2 ESTIMADOR DE ESTADOS

### 2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo se destina a fornecer uma análise aprofundada de EE, começando por uma revisão abrangente do seu estado atual de desenvolvimento. Exploraremos sua evolução histórica e as várias aplicações que o tornam tão fundamental para o funcionamento eficiente dos SEPs contemporâneos.

Neste capítulo é abordado conceitos fundamentais do EE, desde sua definição até seu equacionamento, além dos diversos métodos e técnicas empregados para resolver as complexas equações subjacentes. Vale ressaltar os desafios frequentes encontrados durante esse processo, destacando as diferentes abordagens utilizadas para superá-los e garantir a precisão e confiabilidade das estimativas obtidas

#### 2.1.1 Estado da arte

As referências utilizadas para fundamentar o estado da arte estão relacionadas aos estudos de estimadores de estado aplicáveis aos sistemas de distribuição de energia, pois é um caminho em que este trabalho se desenvolverá futuramente. Ao buscar pesquisas nessa área, observa-se que a aplicação dos estimadores de estados em sua maioria faz uso dos métodos numéricos de NR, juntamente com o método de MQP.

O método de NR se baseia no conceito de interação, onde partimos de uma estimativa inicial e, por meio de uma série de passos iterativos, nos aproximamos progressivamente da solução desejada. O método de MQP tem como função, atribuir pesos a medidas conforme a confiabilidade dos mesmos, dessa forma, dados mais confiáveis possuem atribuições de maior significado no processo de estimação.(LOPES, 2008)

Em SUN (2018) foram empregadas abordagens alternativas nos métodos, onde desenvolveram um EE trifásico em dois estágios. No primeiro estágio, utilizaram um estimador que emprega coordenadas polares para corrigir grandes erros de tensão no nó inicial. Já no segundo estágio, empregaram um estimador que utiliza coordenadas retangulares. Este estudo também aborda a condição de má identificação de dados. Eles testaram o desempenho do sistema em um modelo com 33, 70, 84, 11 e 874 nós, composto por carga balanceada e alimentadores não balanceados IEEE 13, 34, 37 e 124, demonstrando sua eficácia.

Em estudos sobre EM, KEERTHANA e ASHOK (2022), CRUZ, QUINTERO e PEREZ (2006) e CHILARD e GRENARD (2013) desenvolveram métodos para detectar diferentes tipos de EM e perdas em estimadores. O estudo de CRUZ, QUINTERO e PEREZ (2006) focaliza-se na análise de perdas não técnicas em um sistema teste, observando um macrossistema de distribuição radial e realizando estimativas em tempo real do estado da carga em pontos relevantes de transformação. Implementando o algoritmo proposto, foram estimadas as perdas não técnicas em todos os pontos de transformação na área de estudo. Além disso, é possível aplicá-lo à estimação de estado em tempo real nas áreas de planejamento e operação do sistema de distribuição. Outros estudos na área de EE em redes de distribuição foram analisados.

CONTE et al. (2023) e WANG et al. (2021) desenvolveram estudos voltados à análise topológica da rede de distribuição. CONTE et al. (2023) criou um algoritmo adaptável capaz de se reconfigurar para variações topológicas na rede, além de observar falhas em redes de distribuição radiais. Já WANG et al. (2021) desenvolveu um algoritmo que fraciona a topologia de rede em subáreas para reduzir o consumo computacional, utilizando dados de PMU para os cálculos.

Os estudos de MESTAV, LUENGO-ROZAS e TONG (2018), LIU e HE (2014) e YUEHAO et al. (2016) abordam diferentes desenvolvimentos dos EE em redes de distribuição. MESTAV, LUENGO-ROZAS e TONG (2018) empregou uma abordagem Bayesiana combinada com redes neurais profundas para alcançar a estimativa mínima do erro quadrático médio dos estados da rede, visando aplicação em tempo real.

LIU e HE (2014) elaboraram um algoritmo de EE para rede de distribuição baseado em informações finitas, utilizando a tensão do nó da rede e a fase da tensão como variáveis de estado. Medidas do nó e planejamento de carga atuam como medições reais e pseudomedidas, concluindo que apenas o método de MQP é adequado para sistemas de distribuição. O estudo de YUEHAO et al. (2016) é similar ao de LIU e HE (2014), embora tenha empregado o método de Newton clássico ao invés do método de MQP, para as mesmas variáveis de estado e medição. Além disso, YUEHAO et al. (2016) utilizou informações do usuário de energia como dados de medição reais.

### **2.1.2 Estimadores de Estado**

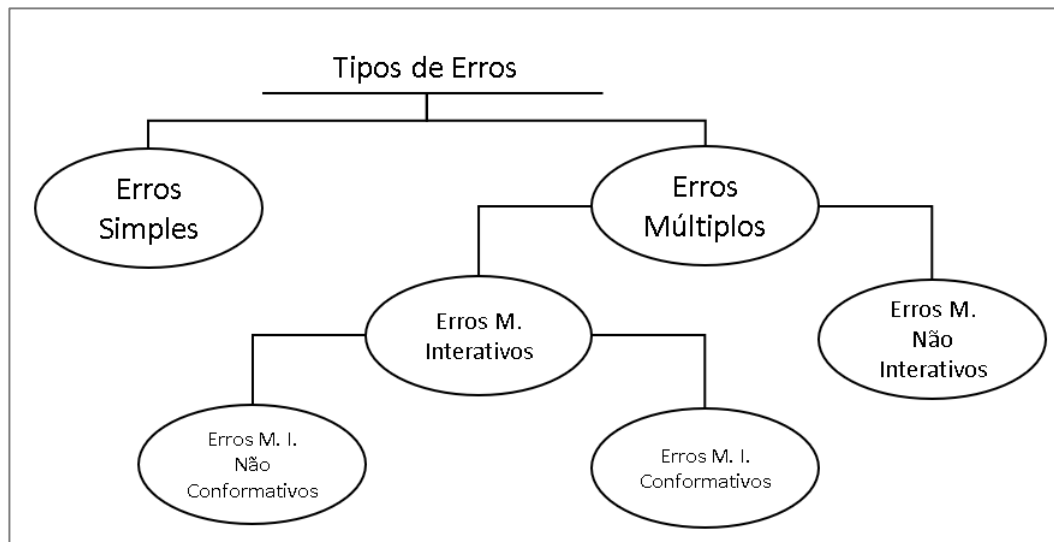
O EE desempenha um papel crucial nos sistemas de distribuição de energia, com base em formulações matemáticas fundamentais, como descritas no estudo de BRETAS (2019), que se baseia nas equações de fluxo de potência. Nesse contexto, a ferramenta desenvolvida enfoca

a utilização das variáveis de estado: magnitude e ângulo de fase da tensão no barramento. O algoritmo base emprega o método resolutivo de NR, que busca, por meio de iterações, encontrar um valor predefinido, minimizando os resíduos. Além disso, adota-se o método dos MQP, que considera as incertezas de medição ao avaliar os dados.

O MQP destaca-se por atribuir pesos diferentes às medidas observadas, conferindo maior peso às medições que geralmente são mais confiáveis e menor peso às medições que costumam apresentar divergências entre os valores práticos e teóricos esperados. Essa atribuição de peso é crucial para aprimorar a precisão do estimador, pois permite uma análise mais cuidadosa das medições, levando em consideração as incertezas associadas. Esses métodos combinados proporcionam uma estimativa mais robusta e confiável do estado do sistema, o que é fundamental para a operação e tomada de decisões nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

### 2.1.3 Tipos de Erros

Figura 1: Tipos de Erros



Fonte: Autor

Os tipos de erros foram definidos por MONTICELLI, WU e YEN (1986) assim se observa que os erros em medições podem se manifestar de diferentes maneiras. Existem os erros simples, que são discrepâncias individuais, ocorrendo de forma isolada, sem interação

com outros dados. Eles representam desvios individuais sem influenciar diretamente outras medições no conjunto.

Já os erros múltiplos podem ser de dois tipos principais: os não interativos e os interativos. Os erros múltiplos não interativos são discrepâncias independentes, sem interação entre si, e não influenciam diretamente outras medições.

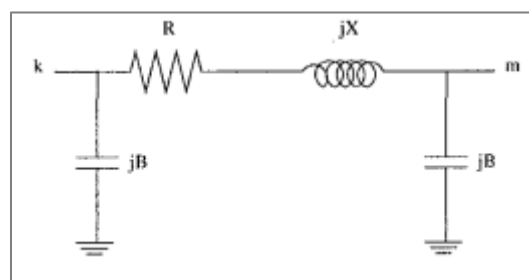
Por outro lado, os erros múltiplos interativos resultam da interação entre diversas discrepâncias. Essa interação pode causar um efeito cumulativo nos dados de medição. Dentro dos erros múltiplos interativos, há os conformes e os não conformes. Os erros múltiplos conformes são aqueles em que a interação das discrepâncias identifica incorretamente dados corretos como incorretos. Já os não conformes, mesmo interagindo, não resultam na identificação incorreta de dados corretos.

Essa diferenciação entre os tipos de erros é fundamental para compreender a natureza das discrepâncias nos dados de medição e aplicar métodos adequados para identificação e correção desses erros.

#### 2.1.4 Equacionamento

A partir de pesquisas bibliográficas e experimentais, obtivemos um embasamento sólido em formulações matemáticas essenciais para o desenvolvimento do EE em sistemas de distribuição de energia elétrica. Para a modelagem dos parâmetros (bloco 1, Figura 3), considera-se a configuração de rede do tipo  $\pi$ , conforme Figura 2.

Figura 2: Configuração de rede tipo  $\pi$



Fonte: (ABUR; EXPÓSITO, 2004)

Inicialmente, defina-se o vetor de estados a serem estimados (Bloco 2, Figura 3), essencial para compreender e analisar o comportamento do sistema elétrico. Esse vetor consiste em variáveis específicas como magnitude e ângulo de fase da tensão, representando os elementos fundamentais para o processo de estimativa, definido por:

$$x = \begin{bmatrix} \theta_k \\ V_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

Em que:

- $x$  = vetor de estados;
- $\theta_k$  = ângulos de fase da barra  $k$ ;
- $V_k$  = magnitude de tensão da barra  $k$ .

O vetor de estados é dado por um vetor coluna de dimensão  $2n-1$ , para  $n$  barramentos do sistema, devido a utilização de ângulo  $\theta_0$  como referência do sistema.

Próximo parâmetro a ser definido é o vetor de medidas reais obtidas do sistema, dado por:

$$z = \begin{bmatrix} P_{km} \\ P_{kk} \\ Q_{km} \\ Q_{kk} \\ V_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

A ordem do vetor de medidas reais segue a disposição específica da equação (2). Inicialmente, são incorporadas todas as medidas de fluxo de potência ativa ( $P_{km}$ ), seguidas pelo parâmetro de potência ativa injetada nas barras do sistema ( $P_{kk}$ ). Os terceiros e quarto elementos do vetor de medidas referem-se aos equivalentes reativos dos elementos um e dois. Por fim, as medidas de tensão completam o vetor de medidas  $z$ .

Assim, seguindo a mesma apresentação do vetor de medidas, determina-se o parâmetro  $h(x)$  (Bloco 3, Figura 3) por meio de equações não-lineares (3),

$$h(x) = \begin{bmatrix} P_{km} \\ P_{kk} \\ Q_{km} \\ Q_{kk} \\ V_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

Os parâmetros do vetor  $h(x)$  são determinadas pela análise de fluxo de potência em SEPs, dadas por (4),

$$P_{km} = -G_{km} V_k^2 + V_k V_m (G_{km} C \theta_{km} + B_{km} S \theta_{km}) \quad (4)$$

$$P_{kk} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} C\theta_{km} + B_{km} S\theta_{km})$$

$$Q_{km} = (B_{km} - b_{km}^{sh}) V_K^2 + V_K V_m (G_{km} S\theta_{km} - B_{km} C\theta_{km})$$

$$Q_{kk} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} S\theta_{km} - B_{km} C\theta_{km})$$

Em que:

- $P_{km}$  = Fluxo de potência ativa na linha entre a barra  $k$  e a barra  $m$ ;
- $Q_{km}$  = Fluxo de potência reativa na linha entre a barra  $k$  e a barra  $m$ ;
- $P_{kk}$  = Potência ativa na injetada na barra  $k$ ;
- $Q_{kk}$  = Potência reativa na injetada na barra  $k$ ;
- $V_m$  = Tensão na barra  $m$ ;
- $V_K$  = Tensão na barra  $k$ ;
- $S\theta_{km} = \text{sen}(\theta_k - \theta_m)$ ;
- $C\theta_{km} = \text{cos}(\theta_k - \theta_m)$ ;
- $\theta_k$  = Ângulo da barra  $k$ ;
- $\theta_m$  = Ângulo da barra  $m$ ;
- $G_{km}$  = Condutância da linha  $km$ ;
- $B_{km}$  = Susceptância da linha  $km$ ;
- $b_{km}^{sh}$  = Susceptância shunt da linha  $km$ .

A partir desses parâmetros definidos, temos a equação de resíduos (Bloco 4, Figura 3), que analisa a diferença entre os valores medidos ( $z$ ) e os valores calculados (teóricos( $x$ )), apresentada em (5),

$$r = z - h(x) \quad (5)$$

O método resolutivo utilizado, método de NR, exige as derivadas parciais (Bloco 5, Figura 3) dos elementos obtidos na equação (5), esses sendo derivados parcialmente em função dos estados a serem estimados, assim temos a equação (6),

$$H(x) = - \frac{\partial [z - h(x)]}{\partial x} \quad (6)$$

Resolvemos a equação (6) e obtemos o conjunto de equações parciais de potência ativa e reativas injetada (7) derivadas em relação aos estados de ângulo e tensão.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{kk}}{\partial \theta_k} &= -Q_{kk} - V_k^2 \cdot B_{kk} \\
\frac{\partial P_{kk}}{\partial \theta_m} &= V_k V_m (G_{km} S\theta_{km} - B_{km} C\theta_{km}) \\
\frac{\partial P_{kk}}{\partial V_k} &= \frac{P_{kk}}{V_k} + V_k \cdot G_{kk} \\
\frac{\partial P_{kk}}{\partial V_m} &= V_k (G_{km} C\theta_{km} + B_{km} S\theta_{km}) \\
\frac{\partial Q_{kk}}{\partial \theta_k} &= \frac{Q_{kk}}{V_k} - V_k \cdot B_{kk} \\
\frac{\partial Q_{kk}}{\partial \theta_m} &= -V_k V_m (G_{km} C\theta_{km} + B_{km} S\theta_{km}) \\
\frac{\partial Q_{kk}}{\partial V_k} &= P_{kk} - V_k^2 \cdot G_{kk} \\
\frac{\partial Q_{kk}}{\partial V_m} &= V_k (G_{km} S\theta_{km} - B_{km} C\theta_{km})
\end{aligned} \tag{7}$$

Da mesma forma, obtemos em (8), o conjunto de derivadas parciais de fluxo de potência ativa e reativa.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} &= -V_k V_m (G_{km} S\theta_{km} - B_{km} C\theta_{km}) \\
\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} &= V_k V_m (G_{km} S\theta_{km} - B_{km} C\theta_{km}) \\
\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} &= V_m (G_{km} S\theta_{km} - B_{km} C\theta_{km}) - 2G_{km} V_k \\
\frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} &= V_k (G_{km} C\theta_{km} + B_{km} S\theta_{km}) \\
\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} &= V_k V_m (G_{km} S\theta_{km} + B_{km} C\theta_{km}) \\
\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} &= -V_k V_m (G_{km} C\theta_{km} + B_{km} S\theta_{km}) \\
\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} &= V_m (G_{km} S\theta_{km} - B_{km} C\theta_{km}) - 2V_k (B_{km} - b_{km}^{sh})
\end{aligned} \tag{8}$$



$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} = V_k (G_{km} S \theta_{km} - B_{km} C \theta_{km})$$

As derivadas parciais da tensão em relação a tensão e a ângulos estimados, são apresentadas em (9).

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_k}{\partial V_k} &= 1 \\ \frac{\partial V_k}{\partial V_m} &= \frac{\partial V_k}{\partial \theta_m} = \frac{\partial V_k}{\partial \theta_k} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Assim, a partir dos conjuntos de equações (7),(8) e (9), obtemos a matriz de derivadas parciais apresentadas por:

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{km}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{kk}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{kk}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{kk}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{kk}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_k}{\partial \theta} & \frac{\partial V_k}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (10)$$

O estimador de estado, conforme referência no subtópico 2.1.2, emprega um método matemático que considera possíveis erros. Para minimizar esses erros, se empregou o método de MQP, ou qual utiliza uma matriz diagonal de pesos correspondente a cada uma das medidas reais do sistema. Esses pesos são definidos com base na covariância de cada um dos elementos medidos, conforme indicado na equação (11). A matriz diagonal é expressa pela equação (12).

$$w = \frac{1}{\sigma^2} \quad (11)$$

$$W_{ii} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{\sigma_m^2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

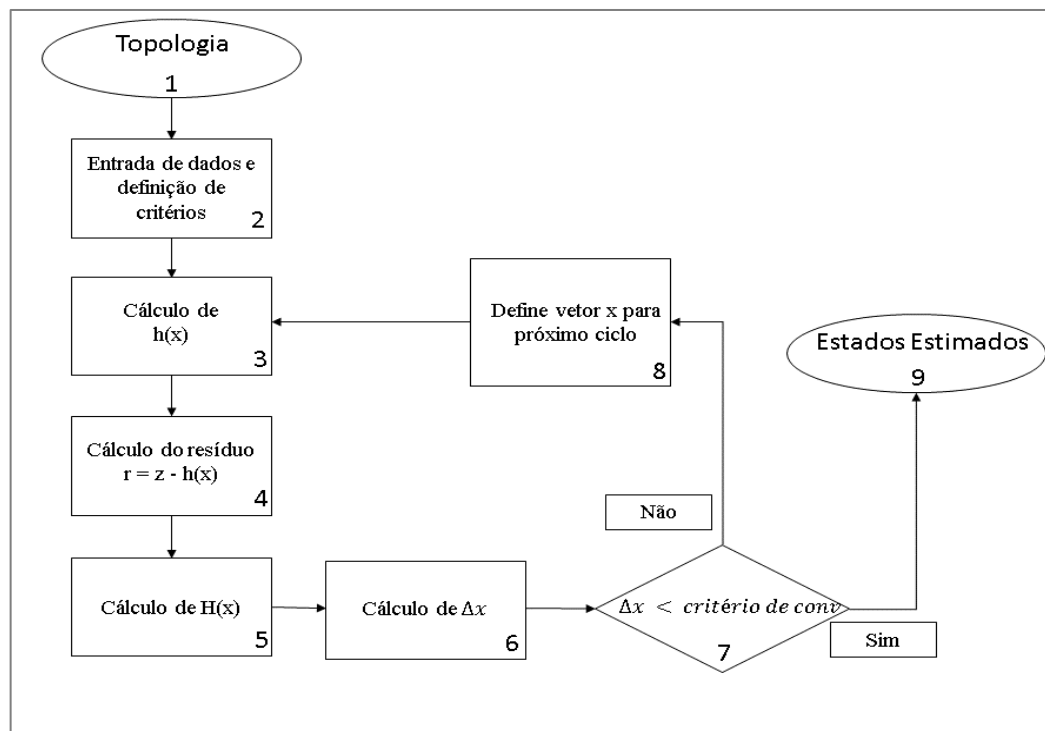
Por fim, obtemos a equação geral completa que retorna à variação dos parâmetros de estados do ciclo atual (Bloco 6, Figura 3), esse parâmetro é comparado ao critério de convergência do EE (Bloco 7, Figura 3). Quando todos elementos do vetor da equação (13) atenderem ao critério de convergência, o ciclo iterativo do estimador encerra, obtendo os estados estimados (Bloco 9, Figura 3), conforme Figura 3.

$$\Delta x = (H(x)^T \cdot W \cdot H(x))^{-1} \cdot H(x)^T \cdot W \cdot [z - h(x)] \quad (13)$$

Em que:

- $H(x)^T$ : matriz transposta de  $H(x)$ .

Figura 3: Estimador de Estados Balanceado



Fonte: Autor

### 3 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nesta seção será apresentada simulações e análise dos resultados obtidos. Esta etapa representa um passo crucial para compreender mais profundamente como os EM impactam diretamente os resultados das estimativas fornecidas pelo EE. Ao simular diferentes cenários com variações de erros de medição, busca-se não apenas avaliar a robustez do estimador frente às condições adversárias, mas também investigar estratégias de mitigação para minimizar os efeitos desses erros.

Serão apresentados os detalhes das simulações realizadas, abrangendo a aplicação de erros deliberados nos parâmetros de medição, conforme descrito anteriormente. Além disso, serão considerados os resultados obtidos em termos de resíduos gerados pela EE e a influência desses resíduos na precisão das estimativas de estados do sistema. Essa análise é essencial para validar a capacidade do estimador de lidar com situações reais e imprevisíveis, fornecendo conhecimento valioso sobre possíveis estratégias de aprimoramento de EE.

Além disso, exploraremos as soluções corretivas propostas para minimizar o impacto dos erros introduzidos, detalhando como a variação de parâmetros, especialmente os associados aos pesos das medidas afetadas, influenciando os resultados das simulações. Essa análise permitirá identificar abordagens mais eficazes para reduzir a influência dos EM no processo de estimativa de estados, promovendo, assim, um melhor desempenho e confiabilidade do EE em condições desafiadoras.

#### 3.2 PROBLEMA PROPOSTO

Após a implementação do Estimador de Estados (EE) conforme descrito no tópico anterior, a etapa seguinte envolveu uma análise minuciosa da sensibilidade dos EM do tipo simples nesse estimador. Para garantir a validação e a comparabilidade dos resultados obtidos, utilizou-se o exemplo proposto por BRETAS (2019) e ABUR; EXPÓSITO (2004), adotando os mesmos parâmetros de medição, pesos e topologia apresentados nessas referências. Os resultados alcançados pela EE requerem de forma consistente aos dados reportados nas pesquisas científicas, validando assim a correção e eficiência do estimador proposto.

Posteriormente, foi conduzido um estudo específico para analisar o impacto dos erros deliberados nos parâmetros de medição do exemplo indicado. Esses erros, variando em torno

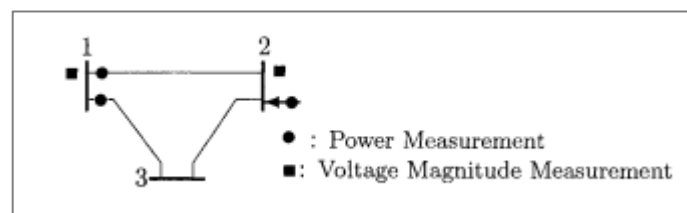
de  $\pm 0,4$  em relação às medidas originais, foram aplicados a fim de investigar como tais variações afetariam os resíduos e os estados estimados pelo sistema. Esta etapa foi crucial para compreender como os EM podem influenciar as estimativas do EE em condições mais realistas, já que muitas vezes estão sujeitas a incertezas e imprecisões nos dados coletados.

Diante da identificação desses erros e da minimização de seus efeitos adversos, foi proposto um método corretivo. Este método consiste em ajustar o parâmetro que representa o peso associado à medida afetada pelo erro introduzido. Foram realizadas simulações variando esse parâmetro corretivo em intervalos, buscando entender de que forma essa variação impacta os resíduos e os estados estimados pelo EE. Essa abordagem permitiu explorar estratégias para mitigar os efeitos específicos dos EM, aprimorando a robustez e a precisão do estimador em condições adversas ou com dados ambientais imprecisos.

### 3.3 SIMULAÇÕES

No contexto do problema proposto, realizamos a aplicação do EE a um caso prático, tomando como referência o exemplo fornecido por BRETAS (2019) e ABUR; EXPÓSITO (2004), conforme apresentado na Figura 3. Esse exemplo foi fundamental para a validação e análise do desempenho do EE em condições reais de sistemas elétricos. Durante essa aplicação, calculamos e identificamos os valores associados aos resíduos, que representam a diferença entre as medidas reais e as estimativas produzidas pelo estimador.

Figura 4: Diagrama unifilar e medição do modelo de 3 barramentos.



Fonte: (ABUR; EXPÓSITO, 2004)

As características do sistema de 3 barramentos são apresentadas nas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1: Características topológicas da rede de 3 barramentos

Linha	Resistencia	Reatância	Susceptância
	$R$ (pu)	$X$ (pu)	$B_s$
L12	0.01	0.03	0
L13	0.02	0.05	0
L23	0.03	0.08	0

Tabela 2: Medidas e pesos da rede de 3 barramentos

Índice $i$	Tipo	Valor (pu)	Peso $W_{ii}$ (pu)
1	P12	0.888	15625
2	P13	1.173	15625
3	P22	-0.501	10000
4	Q12	0.568	15625
5	Q13	0.663	15625
6	Q22	-0.286	10000
7	V1	1.006	62500
8	V2	0.968	62500

Para um critério de convergência estipulado em  $10^{-4}$ , obtemos os estados estimados (14) e os resíduos (15) para o sistema de 3 barramentos, com convergência no terceiro ciclo iterativo.

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1.2475 \\ -2.7457 \\ 0.9996 \\ 0.9742 \\ 0.9439 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$r = z - h(x) = \begin{bmatrix} -0.0050 \\ 0.0019 \\ -0.0051 \\ 0.0092 \\ -0.0047 \\ 0.0117 \\ 0.0064 \\ -0.0062 \end{bmatrix} \quad (15)$$

### 3.4 ERROS DE MEDIÇÃO

A continuidade da análise concentrou-se na simulação deliberada de EM simples, variando em torno de  $\pm 0,4$  pu em relação às medidas originais. Esta etapa representou um marco significativo no estudo, permitindo uma investigação minuciosa do impacto dessas variações

nos resíduos e estados estimados pelo sistema. O objetivo foi entender que forma esses desvios poderiam afetar as estimativas geradas pelo EE, considerando as condições mais realistas do ambiente operacional.

### 3.4.1 Erro Médio Absoluto Percentual (EMAp)

Para calcular os EMAp das simulações, considera-se a (16). Embora utilizada a equação de erro médio absoluto percentual, se definirá o resultado obtido como uma variação (Var.).

$$EMAp = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right| \cdot 100\% \quad (16)$$

Em que:

- $Y_i$  = valor para condição de erro zero;
- $\hat{Y}_i$  = valor para condição de erro;
- $n$  = nº de interações.

### 3.4.2 Erro de Medição em P12

As Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 apresentam os dados relativos ao erro introduzido no parâmetro de medição fluxo de potência ativa entre a linha 1 e a linha 2 (P12), considera-se o valor 0.888 como valor referente a operação na condição de erro zero. Na Tabela 3 são apresentados os valores referentes aos estados estimados e na Tabela 5 e são apresentados os valores referentes aos resíduos obtidos a partir da terceira interação do EE.

Os resultados também podem ser observados graficamente nas Figura 5, Figura 6 e Figura 7. As Tabela 4 e Tabela 6 apresenta o estudo da diferença entre a condição de erro zero e a condição com erro simples dos estados estimados e resíduos, respectivamente.

Tabela 3: Estados Estimados com variação de erro de medição em P12

P12	0.488	0.588	0.688	0.788	0.888	0.988	1.088	1.188	1.288
$\theta_1(^{\circ})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-0.883	-0.974	-1.065	-1.156	-1.248	-1.339	-1.431	-1.523	-1.615
$\theta_3$	-2.475	-2.543	-2.610	-2.678	-2.746	-2.813	-2.881	-2.949	-3.017
V1 (pu)	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
V2	0.975	0.975	0.975	0.974	0.974	0.974	0.974	0.973	0.973
V3	0.944	0.944	0.944	0.944	0.944	0.944	0.944	0.943	0.943

Tabela 4: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em P12

P12	0.488	0.588	0.688	0.788	0.888	0.988	1.088	1.188	1.288
Var. $\theta_2 (^{\circ})$	-0.365	-0.274	-0.183	-0.091	0.000	0.092	0.183	0.275	0.367
Var. $\theta_3$	-0.270	-0.203	-0.135	-0.068	0.000	0.068	0.135	0.203	0.271
Var.V1 (pu)	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001
Var.V2	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Var.V3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001

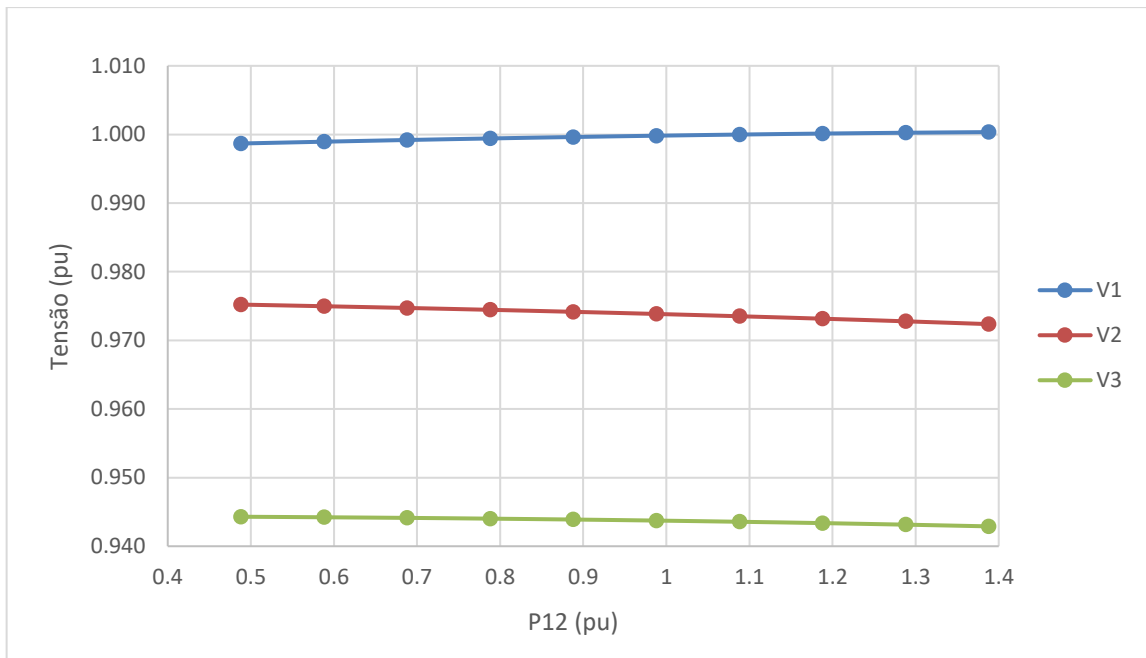
Tabela 5: Resíduos com variação de erro medição em P12

P12	0.488	0.588	0.688	0.788	0.888	0.988	1.088	1.188	1.288
P12 (pu)	-0.198	-0.149	-0.101	-0.053	-0.005	0.043	0.091	0.139	0.187
P13	0.090	0.068	0.046	0.024	0.002	-0.020	-0.042	-0.064	-0.086
P22	-0.229	-0.173	-0.117	-0.061	-0.005	0.051	0.107	0.163	0.219
Q12	0.011	0.011	0.010	0.010	0.009	0.008	0.008	0.007	0.006
Q13	-0.008	-0.007	-0.006	-0.005	-0.005	-0.004	-0.003	-0.003	-0.002
Q22	0.018	0.017	0.015	0.013	0.012	0.010	0.008	0.006	0.004
V1	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
V2	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.005	-0.005

Tabela 6: Erro de resíduos para diferentes erros de medição em P12

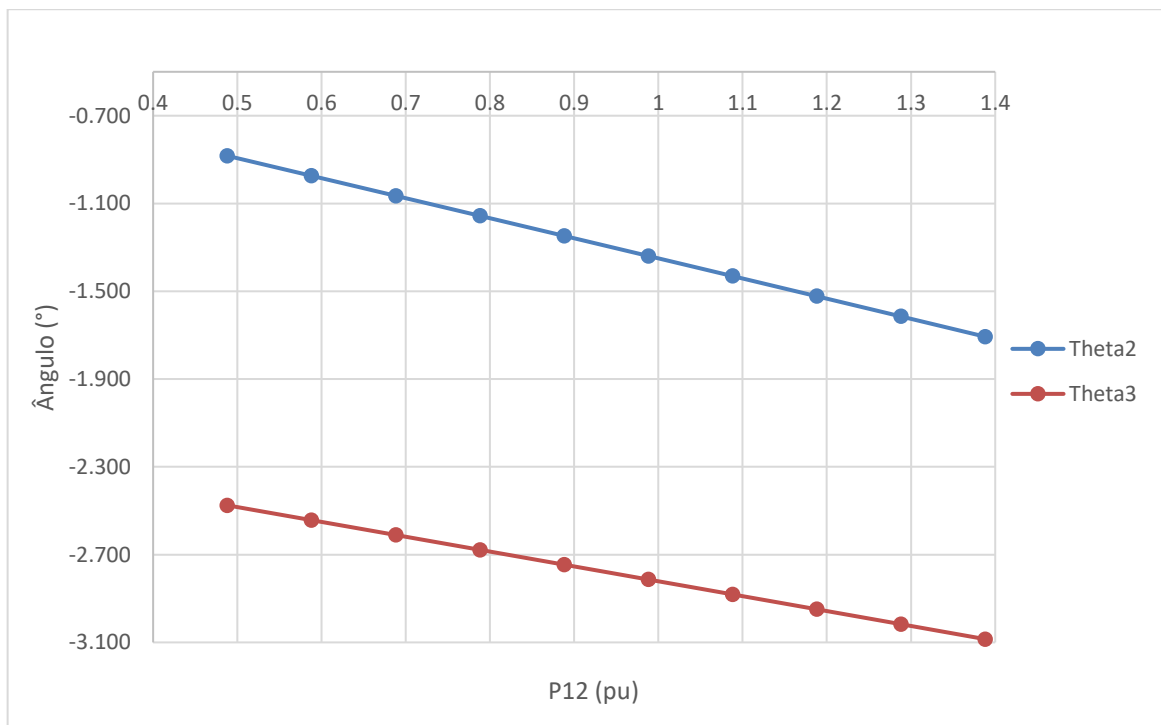
P12	0.488	0.588	0.688	0.788	0.888	0.988	1.088	1.188	1.288
Var. P12 (pu)	0.193	0.144	0.096	0.048	0.000	-0.048	-0.096	-0.144	-0.192
Var.P13	-0.088	-0.066	-0.044	-0.022	0.000	0.022	0.044	0.066	0.088
Var.P22	0.224	0.168	0.112	0.056	0.000	-0.056	-0.112	-0.168	-0.224
Var.Q12	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003
Var.Q13	0.003	0.002	0.002	0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003
Var.Q22	-0.006	-0.005	-0.003	-0.002	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008
Var.V1	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Var.V2	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001

Figura 5: Variação de estados das Tensões para variação de erro em P12



Fonte: autor

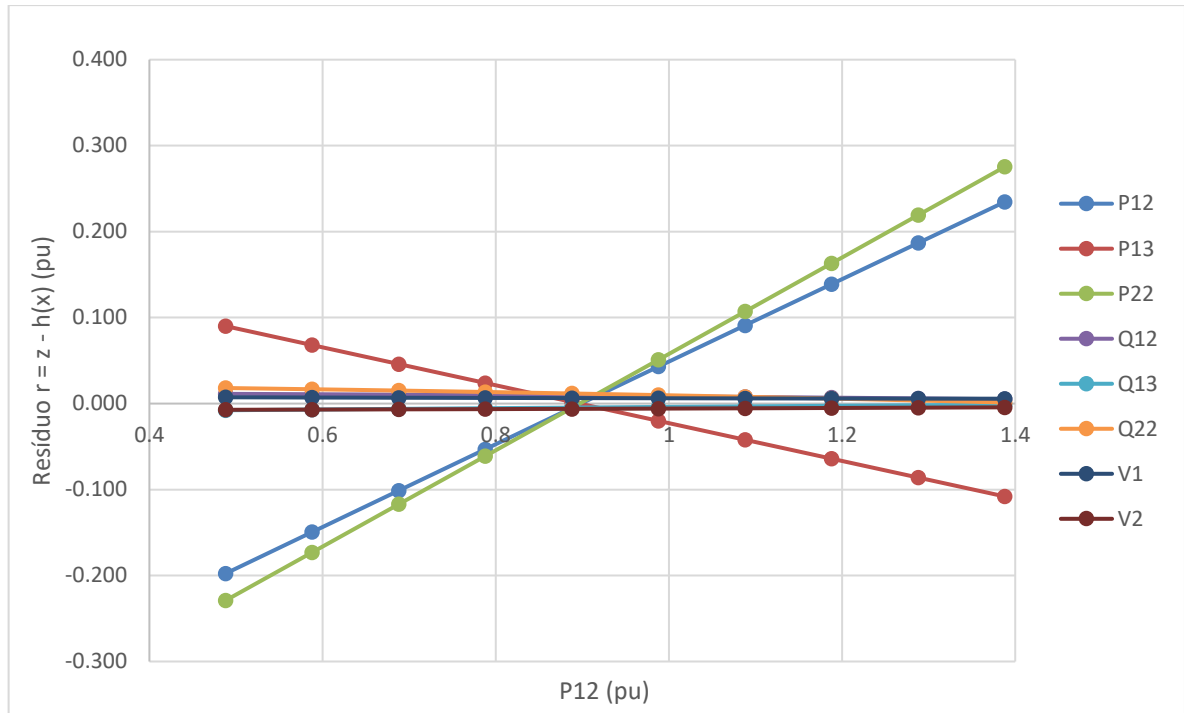
Figura 6: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em P12



Fonte: autor



Figura 7: Variação de Resíduos para variação de erro em P12



Fonte: autor

Aplicando a Equação (16) nas Tabela 3 e Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, obtemos os seguintes resultados:

Tabela 7: Variação dos estados estimados para variação do erro em P12

Var. $\theta 2$	16.29%
Var. $\theta 3$	5.48%
Var. V1	0.04%
Var. V2	0.07%
Var. V3	0.03%

---

Tabela 8: Variação dos resíduos para variação em P12

Var. P12	2140.4%
Var. P13	2569.7%
Var. P22	2455.0%
Var. Q12	16.1%
Var. Q13	34.5%
Var. Q22	34.3%
Var. V1	6.7%
Var. V2	11.1%

---

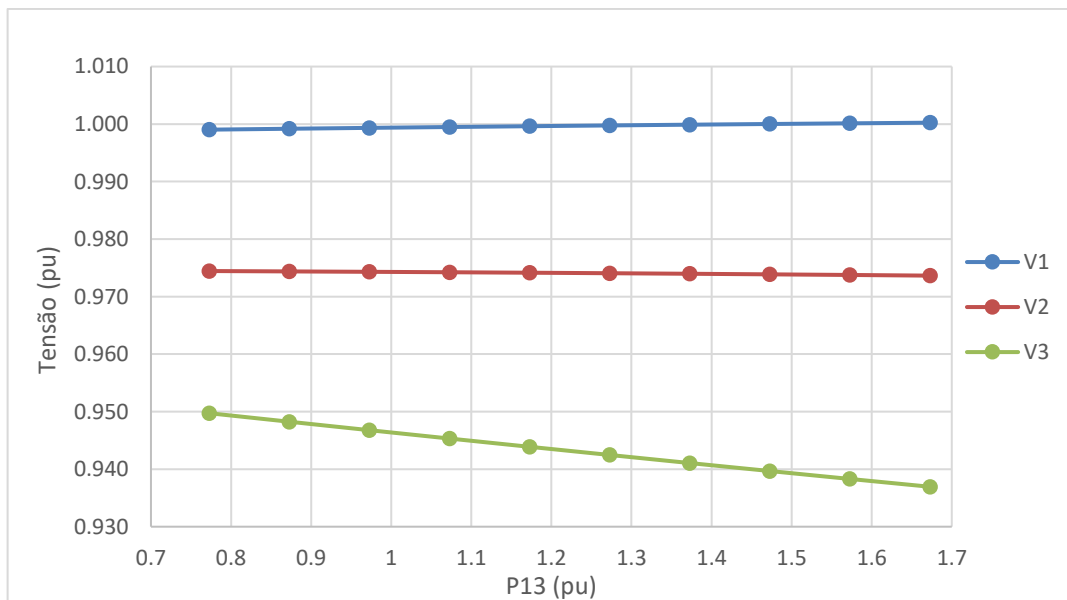
Observa-se que as medidas com maior variação estão associadas ao tipo de medida que contém EM, especificamente nas medidas de potência ativa. O percentual elevado (acima de 100%) decorre do cálculo dos resíduos para a condição de erro zero, que está na faixa decimal, portanto, qualquer variação nessa faixa de resultado resulta em uma diferença expressiva. Por outro lado, os outros tipos de resíduos (potência reativa e magnitude de tensão) também apresentam variação considerável, porém não tão expressiva quanto os resíduos de potência ativa.



Tabela 12: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em P13

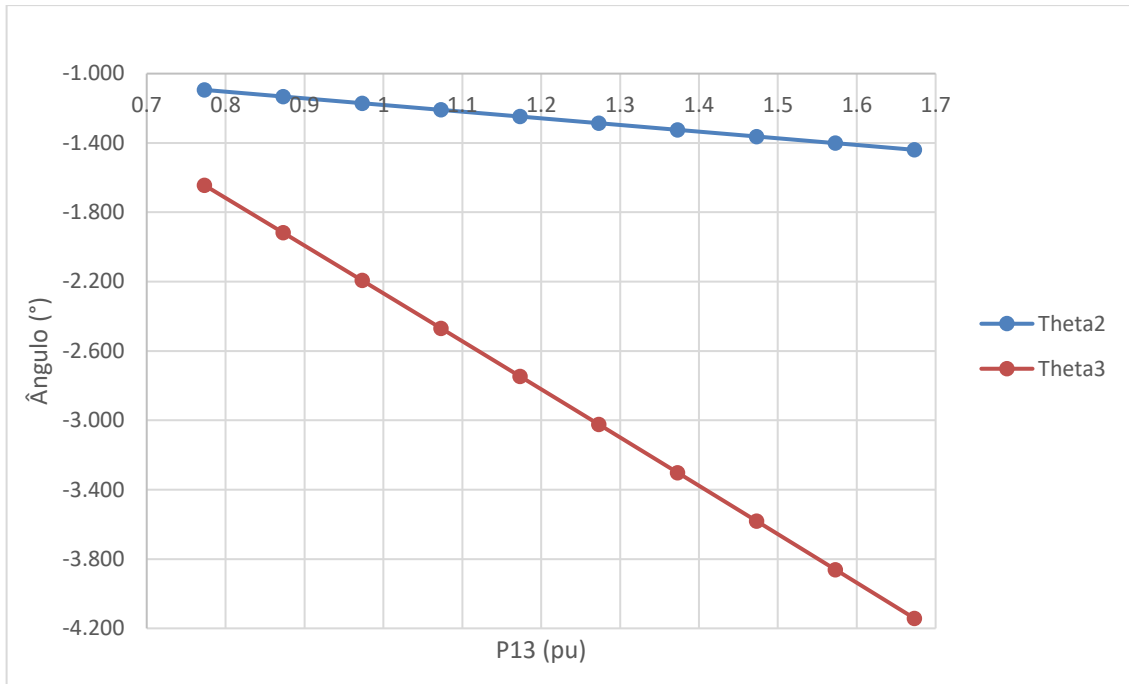
P13	0.773	0.873	0.973	1.073	1.173	1.273	1.373	1.473	1.573
Var.P12 (pu)	-0.088	-0.066	-0.044	-0.022	0.000	0.022	0.044	0.066	0.088
Var.P13	0.040	0.030	0.020	0.010	0.000	-0.010	-0.020	-0.030	-0.040
Var.P22	-0.103	-0.077	-0.051	-0.026	0.000	0.026	0.051	0.077	0.103
Var.Q12	-0.003	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003
Var.Q13	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.Q22	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Var.V1	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Var. V2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Figura 8: Variação de estados das Tensões para variação de erro em P13



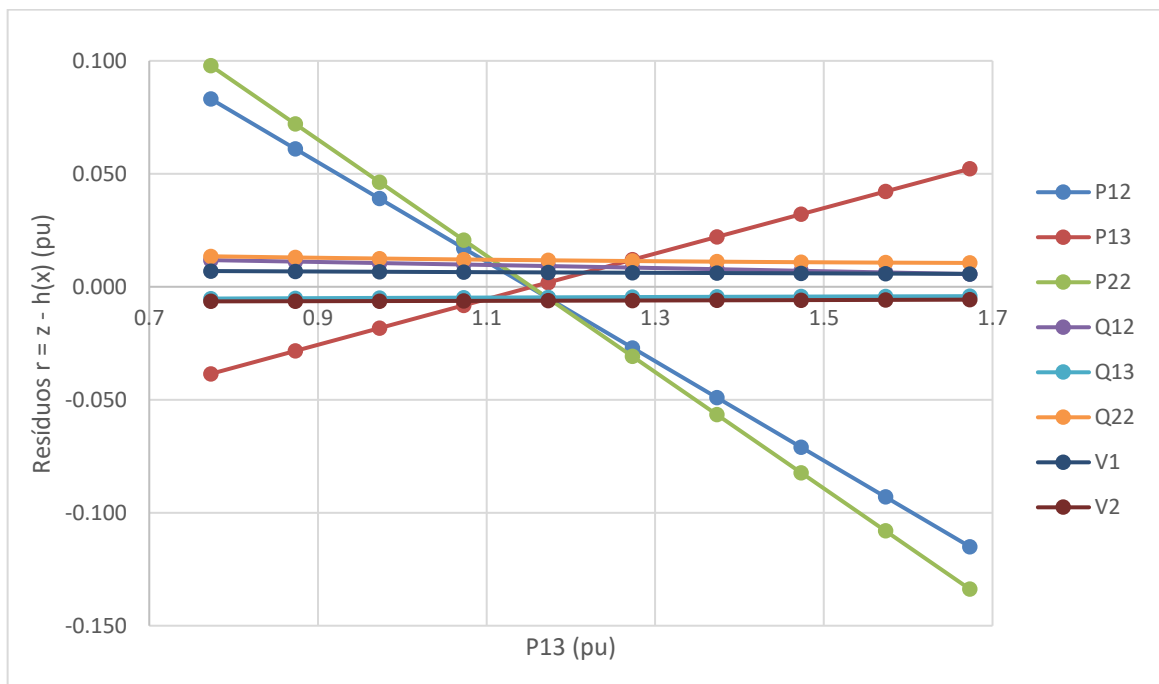
Fonte: autor

Figura 9: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em P13



Fonte: autor

Figura 10: Variação de Resíduos para variação de erro em P13



Fonte: autor

Aplicando a Equação (16) nas Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 , obtemos os seguintes resultados:

Tabela 13: Variação dos estados estimados para variação do erro em P13

Var. $\theta 2$	6.84%
Var. $\theta 3$	22.43%
Var. V1	0.03%
Var. V2	0.02%
Var. V3	0.34%

Tabela 14: Variação dos resíduos para variação em P13

Var. P12	980.5%
Var. P13	1177.3%
Var. P22	1127.5%
Var. Q12	16.5%
Var. Q13	5.8%
Var. Q22	6.6%
Var. V1	4.9%
Var. V2	3.0%

Como observado no comportamento do caso anterior, percebe-se que as medidas com maior variação estão relacionadas ao tipo de medida que inclui EM. Nesse contexto, nas medidas de potência ativa, também se nota um percentual elevado de variação (acima de 100%) nos resíduos. Em comparação ao caso do tópico 3.4.2, confrontam-se, principalmente, os resultados dos ângulos estimados, que chegam a uma variação de mais de 20% em cada caso.

### 3.4.4 Erro de Medição P22

As Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18 apresentam os dados relativos ao erro introduzido no parâmetro de medição potência ativa injetada na barra 2 (P22), considera-se o valor -0.501 como valor referente a operação na condição de erro zero. Na Tabela 15 são apresentados os valores referentes aos estados estimados e na Tabela 17 são apresentados os valores referentes aos resíduos obtidos a partir da terceira interação do EE.

Os resultados também podem ser observados graficamente nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13. As Tabela 16 e Tabela 18 apresenta o estudo da diferença entre a condição de erro zero e a condição com erro simples dos estados estimados e resíduos, respectivamente.

Tabela 15: Estados Estimados com variação de erro de medição em P22

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
$\theta_1$ (°)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-0.997	-1.059	-1.122	-1.185	-1.248	-1.310	-1.372	-1.435	-1.497
$\theta_3$	-2.953	-2.902	-2.850	-2.798	-2.746	-2.694	-2.642	-2.590	-2.538
V1 (pu)	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001
V2	0.975	0.975	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974
V3	0.942	0.942	0.943	0.943	0.944	0.944	0.945	0.946	0.946

Tabela 16: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em P22

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
Var. $\theta_2$ (°)	-0.251	-0.188	-0.125	-0.063	0.000	0.063	0.125	0.187	0.249
Var. $\theta_3$	0.208	0.156	0.104	0.052	0.000	-0.052	-0.104	-0.156	-0.208
Var.V1 (pu)	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001
Var.V2	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.V3	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002

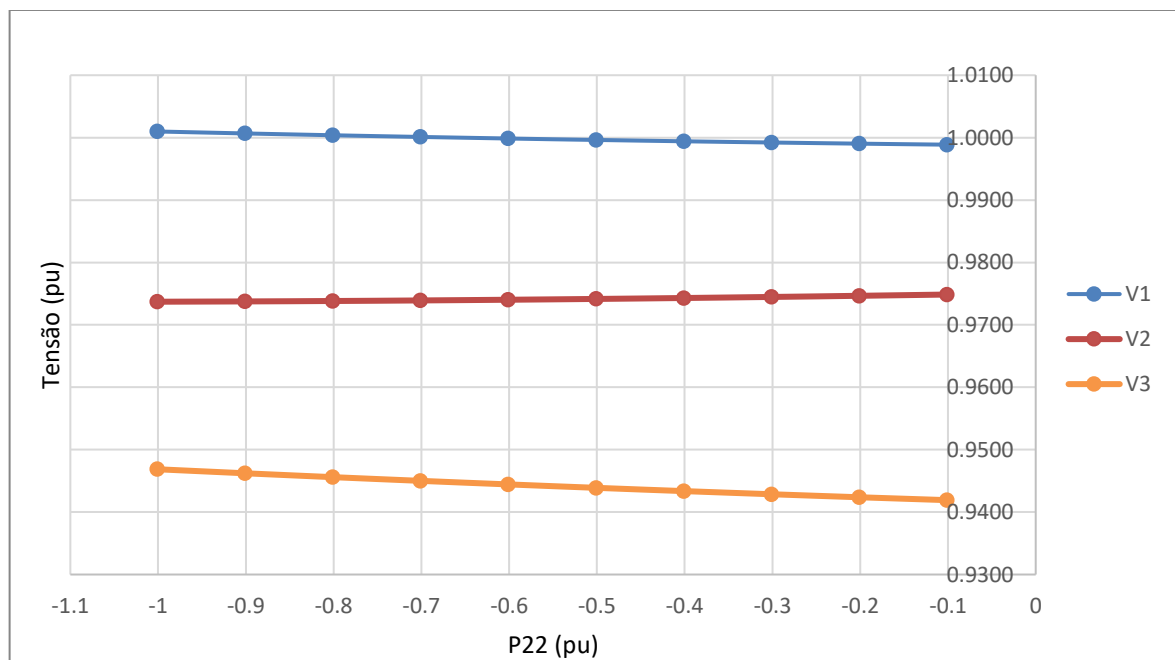
Tabela 17: Resíduos com variação de erro de medição em P22

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
P12	0.139	0.103	0.067	0.031	-0.005	-0.041	-0.077	-0.112	-0.148
P13	-0.064	-0.047	-0.031	-0.015	0.002	0.018	0.035	0.051	0.068
P22	0.162	0.120	0.079	0.037	-0.005	-0.047	-0.089	-0.131	-0.173
Q12	0.013	0.012	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005
Q13	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004	-0.004	-0.004	-0.003
Q22	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.011	0.010	0.010	0.009
V1	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005
V2	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006

Tabela 18: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em P22

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
Var.P12	-0.144	-0.108	-0.072	-0.036	0.000	0.036	0.072	0.107	0.143
Var.P13	0.066	0.049	0.033	0.016	0.000	-0.016	-0.033	-0.049	-0.066
Var.P22	-0.167	-0.125	-0.084	-0.042	0.000	0.042	0.084	0.126	0.168
Var.Q12	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.002	0.003	0.005
Var.Q13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001
Var.Q22	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003
Var.V1	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Var.V2	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

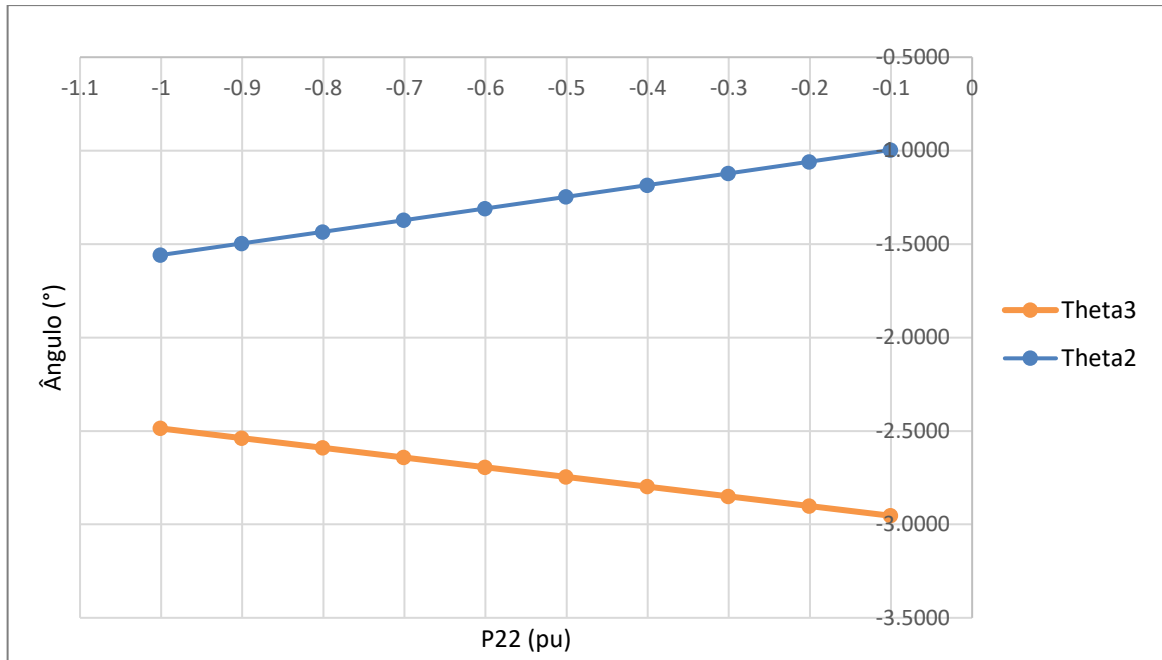
Figura 11: Variação de estados das Tensões para variação de erro em P22



Fonte: autor

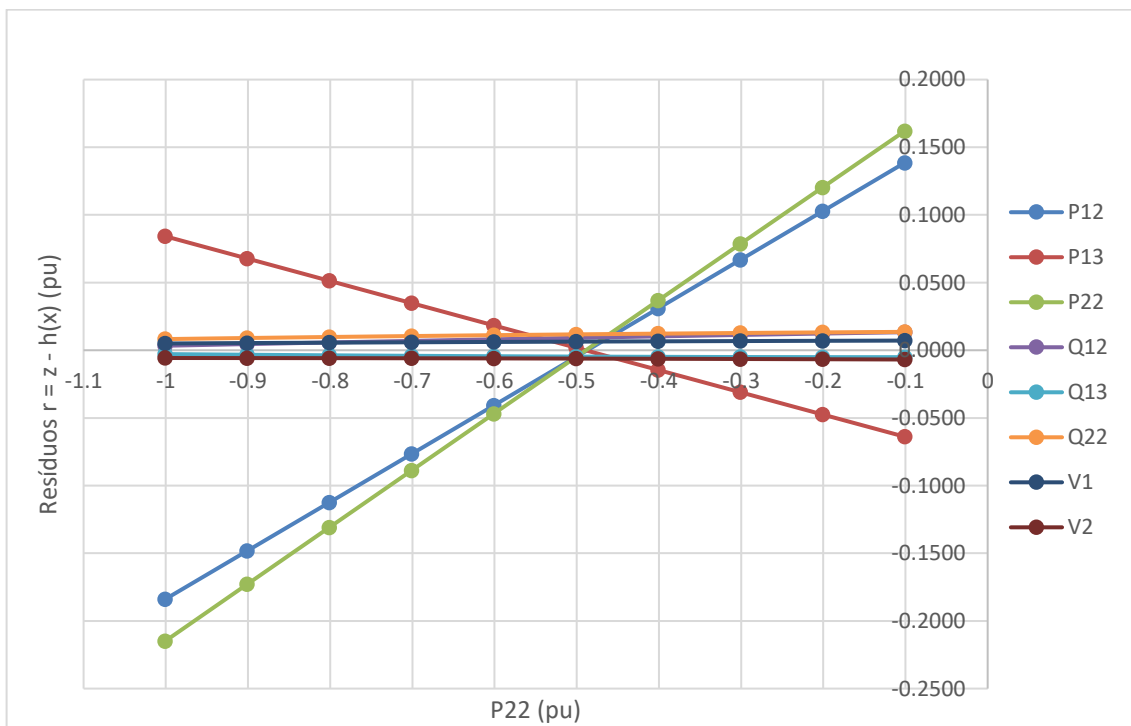


Figura 12: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em P22



Fonte: autor

Figura 13: Variação de Resíduos para variação de erro em P22



Fonte: autor

Aplicando a Equação (16) nas Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18, obtemos os seguintes resultados:

Tabela 19: Varição dos estados estimados para variação do erro em P22

Var. $\theta_2$	11.14%
Var. $\theta_3$	4.20%
Var. V1	0.05%
Var. V2	0.03%
Var. V3	0.13%

---

Tabela 20: Varição dos resíduos para variação em P22

Var. P12	1596.7%
Var. P13	1920.8%
Var. P22	1834.1%
Var. Q12	26.6%
Var. Q13	10.7%
Var. Q22	10.8%
Var. V1	7.9%
Var. V2	4.9%

---

Como observado no comportamento dos casos anteriores, percebe-se que as medidas com maior variação estão relacionadas ao tipo de medida que inclui EM. Nesse contexto, nota-se um valor elevado para os resíduos das potências ativas.

### 3.4.5 Erro de Medição Q12

As Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24 apresentam os dados relativos ao erro introduzido no parâmetro de medição fluxo de potência reativa entre a linha 1 e a linha 2 (Q12), considera-se o valor 0.568 como valor referente a operação na condição de erro zero. Nas Tabela 21 e Tabela 22 são apresentados os valores referentes aos estados estimados e nas Tabela 23 e Tabela 24 são apresentados os valores referentes aos resíduos obtidos a partir da terceira interação do EE. Os resultados também podem ser observados graficamente nas Figura 14, Figura 15 e Figura 16.

Nas Tabela 22 e Tabela 24 apresenta o estudo da diferença entre a condição de erro zero e a condição com erro simples dos estados estimados e resíduos, respectivamente.

Tabela 21: Estados Estimados com variação de erro de medição em Q12

Q12	0.168	0.268	0.368	0.468	0.568	0.668	0.768	0.868	0.968
$\theta_1$ (°)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-1.364	-1.335	-1.306	-1.277	-1.248	-1.218	-1.189	-1.160	-1.131
$\theta_3$	-2.847	-2.821	-2.796	-2.771	-2.746	-2.721	-2.696	-2.672	-2.648
V1 (pu)	0.997	0.998	0.998	0.999	1.000	1.000	1.001	1.001	1.002
V2	0.978	0.977	0.976	0.975	0.974	0.973	0.972	0.971	0.970
V3	0.946	0.945	0.945	0.944	0.944	0.943	0.943	0.942	0.942

Tabela 22: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em Q12

Q12	0.168	0.268	0.368	0.468	0.568	0.668	0.768	0.868	0.968
Var. $\theta_2$ (°)	0.116	0.087	0.058	0.029	0.000	-0.029	-0.058	-0.087	-0.117
Var. $\theta_3$	0.101	0.076	0.050	0.025	0.000	-0.025	-0.049	-0.074	-0.098
Var.V1 (pu)	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002
Var.V2	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004
Var.V3	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002

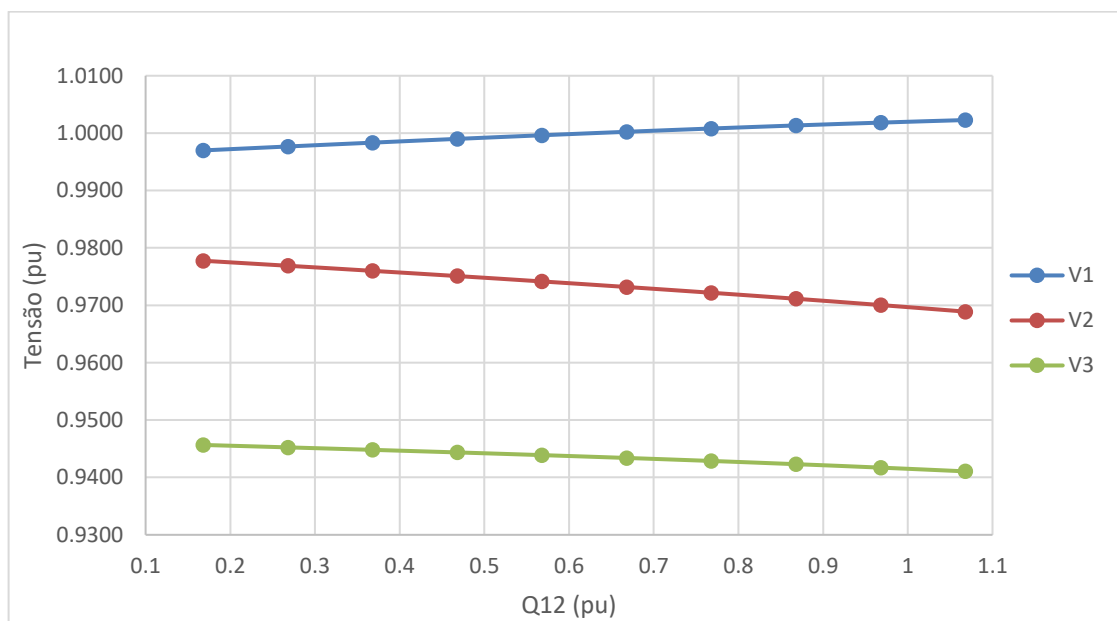
Tabela 23: Resíduos com variação de erro em Q12

Q12	0.168	0.268	0.368	0.468	0.568	0.668	0.768	0.868	0.968
P12 (pu)	-0.003	-0.003	-0.004	-0.004	-0.005	-0.006	-0.006	-0.007	-0.008
P13	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.001
P22	-0.012	-0.010	-0.009	-0.007	-0.005	-0.003	-0.002	0.000	0.001
Q12	-0.183	-0.135	-0.087	-0.039	0.009	0.057	0.104	0.152	0.199
Q13	0.084	0.061	0.039	0.017	-0.005	-0.027	-0.049	-0.071	-0.092
Q22	-0.211	-0.156	-0.100	-0.044	0.012	0.068	0.124	0.180	0.236
V1	0.009	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.004
V2	-0.010	-0.009	-0.008	-0.007	-0.006	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002

Tabela 24: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em Q12

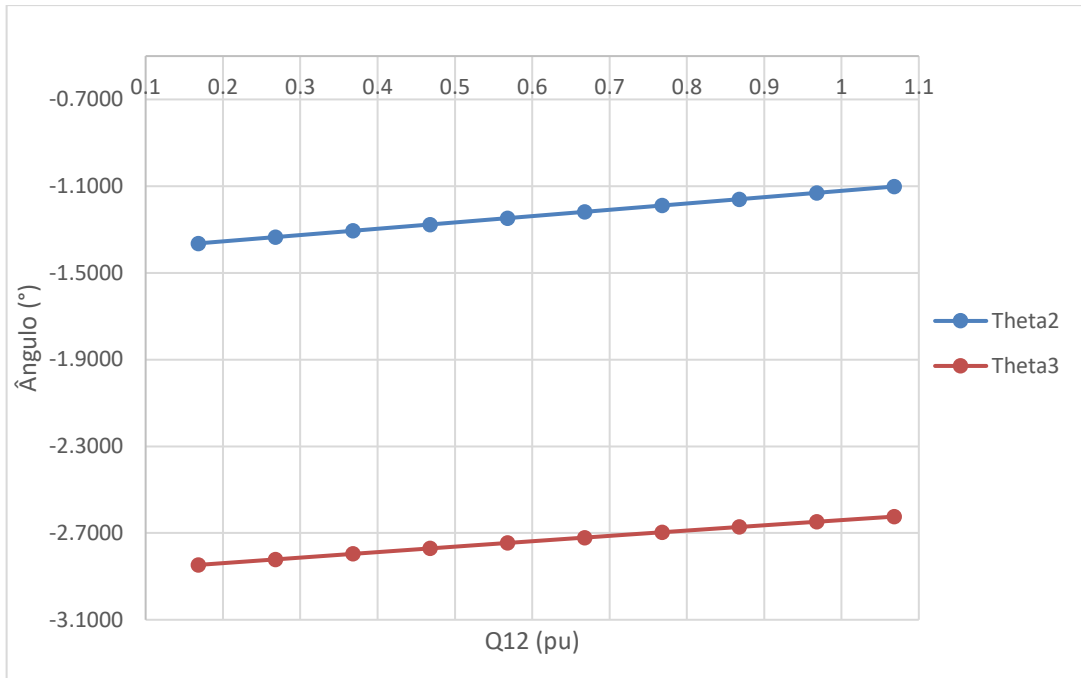
Q12	0.168	0.268	0.368	0.468	0.568	0.668	0.768	0.868	0.968
Var.P12 (pu)	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003
Var.P13	-0.003	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003
Var.P22	0.007	0.005	0.003	0.002	0.000	-0.002	-0.003	-0.005	-0.007
Var.Q12	0.193	0.144	0.096	0.048	0.000	-0.048	-0.095	-0.142	-0.190
Var.Q13	-0.088	-0.066	-0.044	-0.022	0.000	0.022	0.044	0.066	0.088
Var.Q22	0.223	0.167	0.112	0.056	0.000	-0.056	-0.112	-0.168	-0.225
Var.V1	-0.003	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002
Var.V2	0.004	0.003	0.002	0.001	0.000	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004

Figura 14: Variação de estados das Tensões para variação de erro em Q12



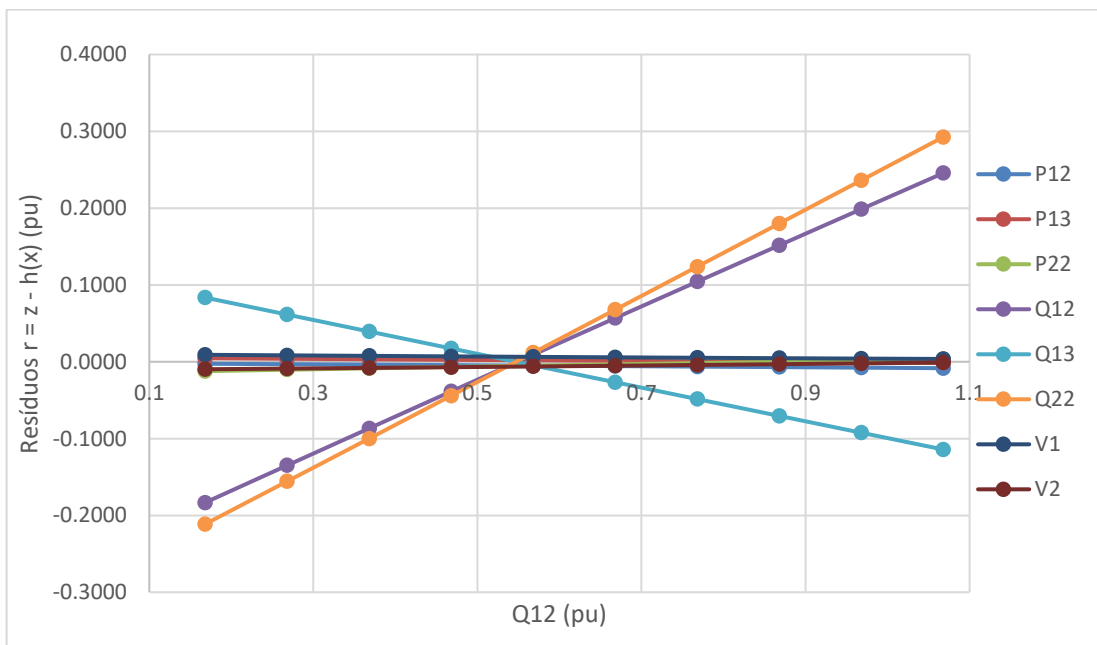
Fonte: autor

Figura 15: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em Q12



Fonte: autor

Figura 16: Variação de Resíduos para variação de erro em Q12



Fonte: autor

Aplicando a Equação (16) nas Tabela 21 e Tabela 23, obtemos os seguintes resultados:

Tabela 25: Variação dos estados estimados para variação do erro em Q12

Var. $\theta_2$	5.19%
Var. $\theta_3$	2.02%
Var. V1	0.14%
Var. V2	0.22%
Var. V3	0.12%

Tabela 26: Variação dos resíduos para variação em Q12

Var.P12	28.3%
Var.P13	78.9%
Var.P22	74.7%
Var.Q12	1156.7%
Var.Q13	1047.7%
Var.Q22	1060.3%
Var. V1	21.5%
Var. V2	34.4%

Observa-se que as medidas com maior variação estão associadas ao tipo de medida que contém EM, especificamente na medida de potência reativa. O percentual elevado (acima de 100%) decorre do cálculo dos resíduos para a condição de erro zero, que está na faixa decimal, portanto, qualquer variação nessa faixa de resultado resulta em uma diferença significativa. Por outro lado, os outros tipos de resíduos (potência ativa e magnitude de tensão) também apresentam variação considerável, porém não tão expressiva quanto os resíduos de potência reativa.

### 3.4.6 Erro de Medição Q13

As Tabela 27, Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30 apresentam os dados relativos ao erro introduzido no parâmetro de medição fluxo de potência reativa entre a linha 1 e a linha 3 (Q13), considera-se o valor 0.663 como valor referente a operação na condição de erro zero. Nas Tabela 27 são apresentados os valores referentes aos estados estimados e nas Tabela 29 são apresentados os valores referentes aos resíduos obtidos a partir da terceira interação do EE.

Os resultados também podem ser observados graficamente nas Figura 17, Figura 18 e Figura 19. Nas Tabela 28 e Tabela 30 apresenta o estudo da diferença entre a condição de erro zero e a condição com erro simples dos estados estimados e resíduos, respectivamente.

Tabela 27: Estados Estimados com variação de erro de medição em Q13

Q13	0.263	0.363	0.463	0.563	0.663	0.763	0.863	0.963	1.063
$\theta_1$ (°)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-1.305	-1.291	-1.276	-1.262	-1.248	-1.233	-1.219	-1.204	-1.190
$\theta_3$	-3.134	-3.038	-2.942	-2.844	-2.746	-2.647	-2.547	-2.446	-2.345
V1 (pu)	0.998	0.998	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001
V2	0.975	0.975	0.975	0.974	0.974	0.974	0.974	0.973	0.973
V3	0.960	0.956	0.952	0.948	0.944	0.940	0.936	0.931	0.927

Tabela 28: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em Q13

Q13	0.263	0.363	0.463	0.563	0.663	0.763	0.863	0.963	1.063
Var. $\theta_2$ (°)	0.058	0.043	0.029	0.014	0.000	-0.014	-0.029	-0.043	-0.057
Var. $\theta_3$	0.389	0.293	0.196	0.098	0.000	-0.099	-0.199	-0.300	-0.401
Var.V1 (pu)	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.002
Var.V2	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Var.V3	-0.017	-0.012	-0.008	-0.004	0.000	0.004	0.008	0.012	0.017

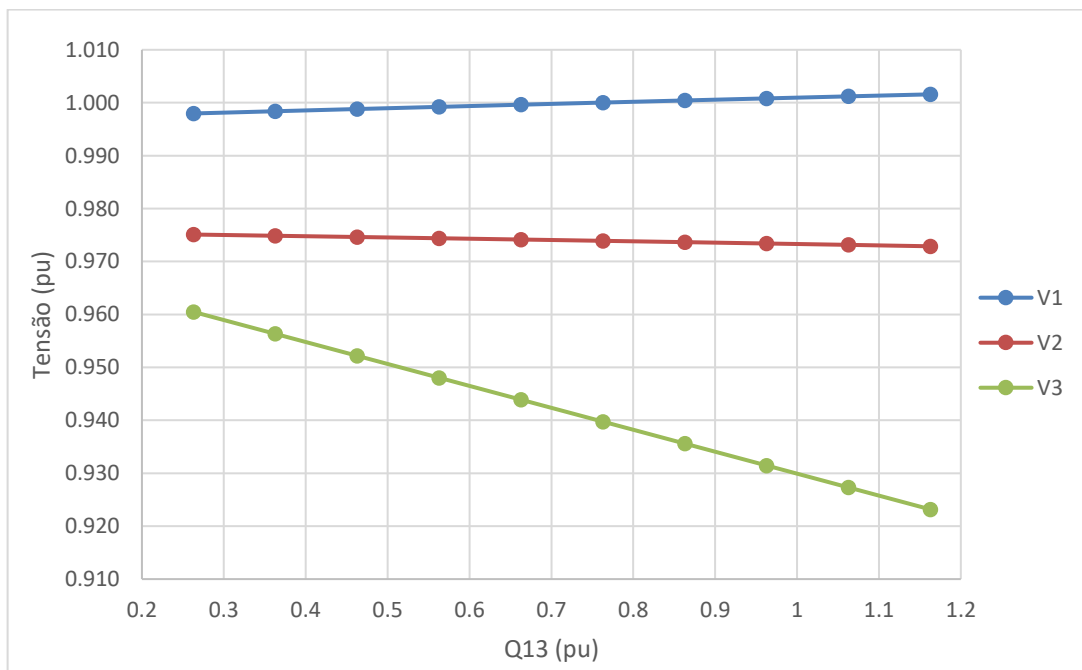
Tabela 29: Resíduos com variação de erro de medição em Q13

Q13	0.263	0.363	0.463	0.563	0.663	0.763	0.863	0.963	1.063
P12	-0.008	-0.007	-0.006	-0.006	-0.005	-0.004	-0.004	-0.003	-0.002
P13	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
P22	-0.004	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005	-0.006	-0.006	-0.006
Q12	0.097	0.075	0.053	0.031	0.009	-0.013	-0.035	-0.057	-0.079
Q13	-0.045	-0.035	-0.025	-0.015	-0.005	0.005	0.016	0.026	0.036
Q22	0.115	0.089	0.063	0.038	0.012	-0.014	-0.040	-0.066	-0.092
V1	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005
V2	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.005	-0.005

Tabela 30: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em Q13

Q13	0.263	0.363	0.463	0.563	0.663	0.763	0.863	0.963	1.063
Var.P12	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003
Var.P13	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
Var.P22	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Var.Q12	-0.088	-0.066	-0.044	-0.022	0.000	0.022	0.044	0.066	0.088
Var.Q13	0.041	0.031	0.020	0.010	0.000	-0.010	-0.020	-0.030	-0.041
Var.Q22	-0.104	-0.078	-0.052	-0.026	0.000	0.026	0.052	0.078	0.103
Var.V1	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
Var.V2	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001

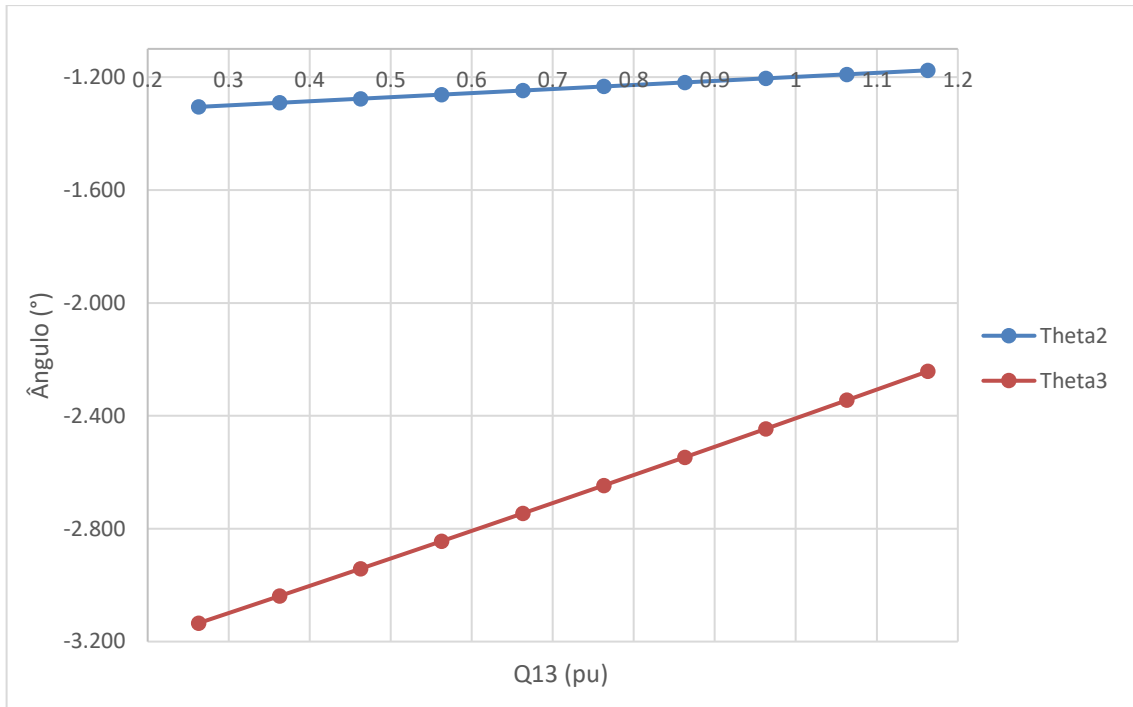
Figura 17: Variação de estados das Tensões para variação de erro em Q13



Fonte: autor

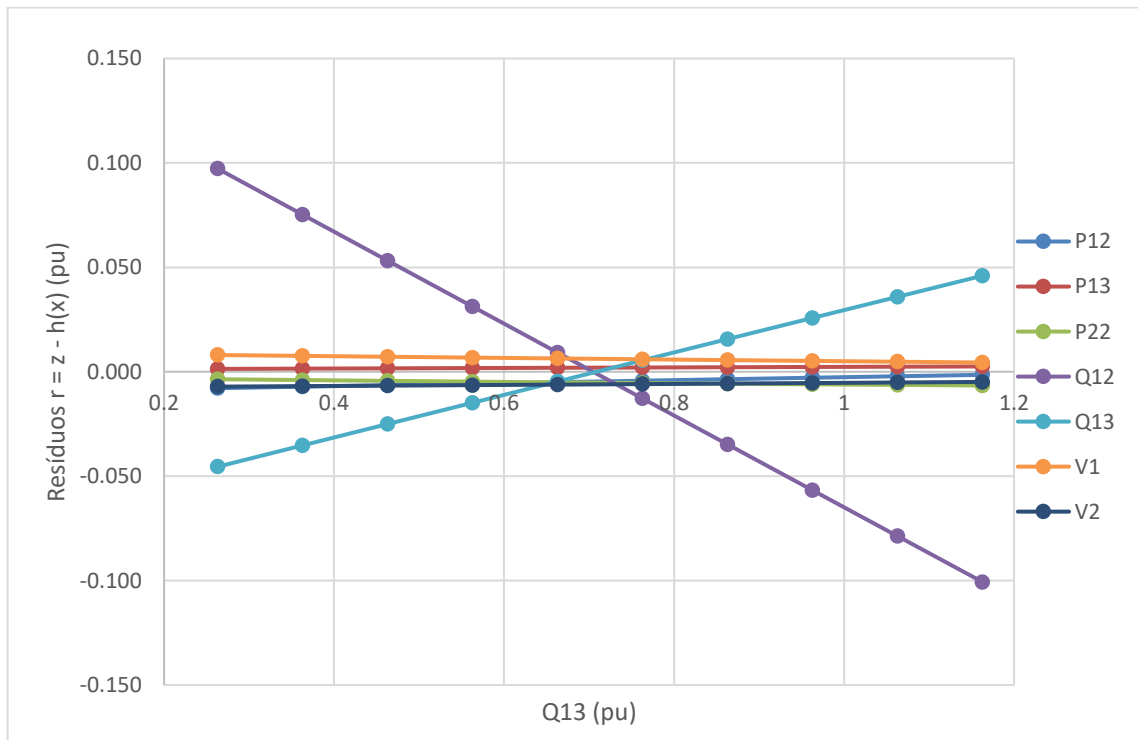


Figura 18: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em Q13



Fonte: autor

Figura 19: Variação de Resíduos para variação de erro em Q13



Fonte: autor

Aplicando a Equação (16) nas Tabela 27, Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30, obtemos os seguintes resultados:

Tabela 31: Variação dos estados estimados para variação do erro em Q13

Var. $\theta_2$	2.57%
Var. $\theta_3$	7.99%
Var. V1	0.09%
Var. V2	0.06%
Var. V3	0.98%

Tabela 32: Variação dos resíduos para variação em Q13

Var. P12	31.8%
Var. P13	15.4%
Var. P22	14.9%
Var. Q12	532.8%
Var. Q13	484.5%
Var. Q22	490.2%
Var. V1	14.0%
Var. V2	8.9%

Como observado no comportamento do caso anterior, percebe-se que as medidas com maior variação estão relacionadas ao tipo de medida que inclui EM. Nesse contexto, nas medidas de potência ativa, também se nota um percentual elevado de variação (acima de 100%) nos resíduos. Em comparação ao caso do tópico 3.4.5, confrontam-se, principalmente, os resultados dos ângulos estimados, que chegam a uma variação de mais de 5% em cada caso. Em comparação aos casos de potência ativa, se percebe que a variação é maior, em relação aos casos de potência reativa, quando comparados as variações dos ângulos estimados.

### 3.4.7 Erro de Medição Q22

As Tabela 33, Tabela 34, Tabela 35 e Tabela 36 apresentam os dados relativos ao erro introduzido no parâmetro de medição potência injetada na barra 2 (Q22), considera-se o valor -0.286 como valor referente a operação na condição de erro zero. Nas Tabela 33 são apresentados os valores referentes aos estados estimados e nas Tabela 35 são apresentados os valores referentes aos resíduos obtidos a partir da terceira interação do EE.

Os resultados também podem ser observados graficamente nas Figura 20, Figura 21 e Figura 22. Nas Tabela 34 e Tabela 36 apresenta a diferença entre a condição de erro zero e a condição com erro simples dos estados estimados e resíduos, respectivamente.

Tabela 33: Estados Estimados com variação de erro medição em Q22

Q22	0.114	0.014	-0.086	-0.186	-0.286	-0.386	-0.486	-0.586	-0.686
$\theta_1$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-1.341	-1.318	-1.294	-1.271	-1.248	-1.224	-1.201	-1.177	-1.154
$\theta_3$	-2.691	-2.705	-2.719	-2.732	-2.746	-2.759	-2.772	-2.784	-2.797
V1	0.997	0.998	0.998	0.999	1.000	1.000	1.001	1.002	1.002
V2	0.976	0.975	0.975	0.975	0.974	0.974	0.973	0.973	0.973
V3	0.938	0.939	0.941	0.942	0.944	0.945	0.947	0.949	0.950

Tabela 34: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em Q22

Q22	0.114	0.014	-0.086	-0.186	-0.286	-0.386	-0.486	-0.586	-0.686
Var. $\theta_2$	0.094	0.070	0.047	0.023	0.000	-0.023	-0.047	-0.070	-0.094
Var. $\theta_3$	-0.054	-0.041	-0.027	-0.013	0.000	0.013	0.026	0.039	0.051
Var.V1	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003
Var.V2	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Var.V3	0.006	0.005	0.003	0.002	0.000	-0.002	-0.003	-0.005	-0.006

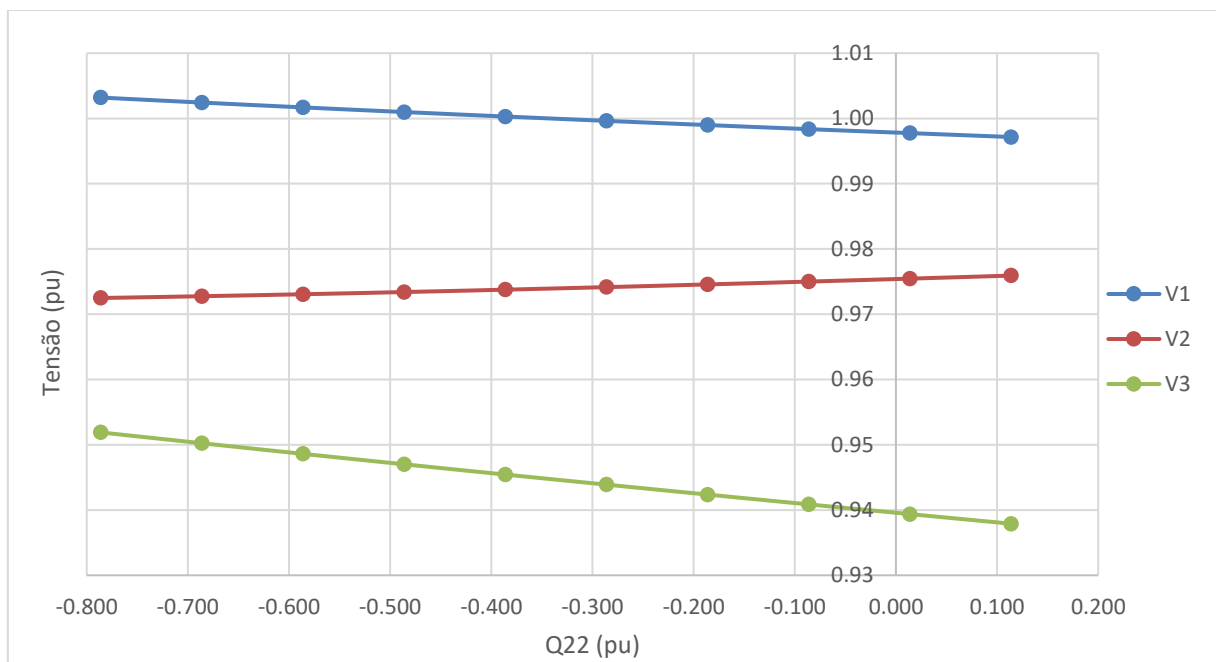
Tabela 35: Resíduos com variação de erro medição em Q22

Q22	0.263	0.363	0.463	0.563	0.663	0.763	0.863	0.963	1.063
P12	-0.010	-0.009	-0.007	-0.006	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	0.000
P13	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003
P22	-0.003	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.006	-0.006	-0.007	-0.007
Q12	0.153	0.117	0.081	0.045	0.009	-0.027	-0.062	-0.098	-0.134
Q13	-0.071	-0.054	-0.038	-0.021	-0.005	0.012	0.029	0.045	0.062
Q22	0.179	0.137	0.096	0.054	0.012	-0.030	-0.073	-0.115	-0.158
V1	0.009	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006	0.005	0.004	0.004
V2	-0.008	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006	-0.005	-0.005	-0.005

Tabela 36: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em Q22

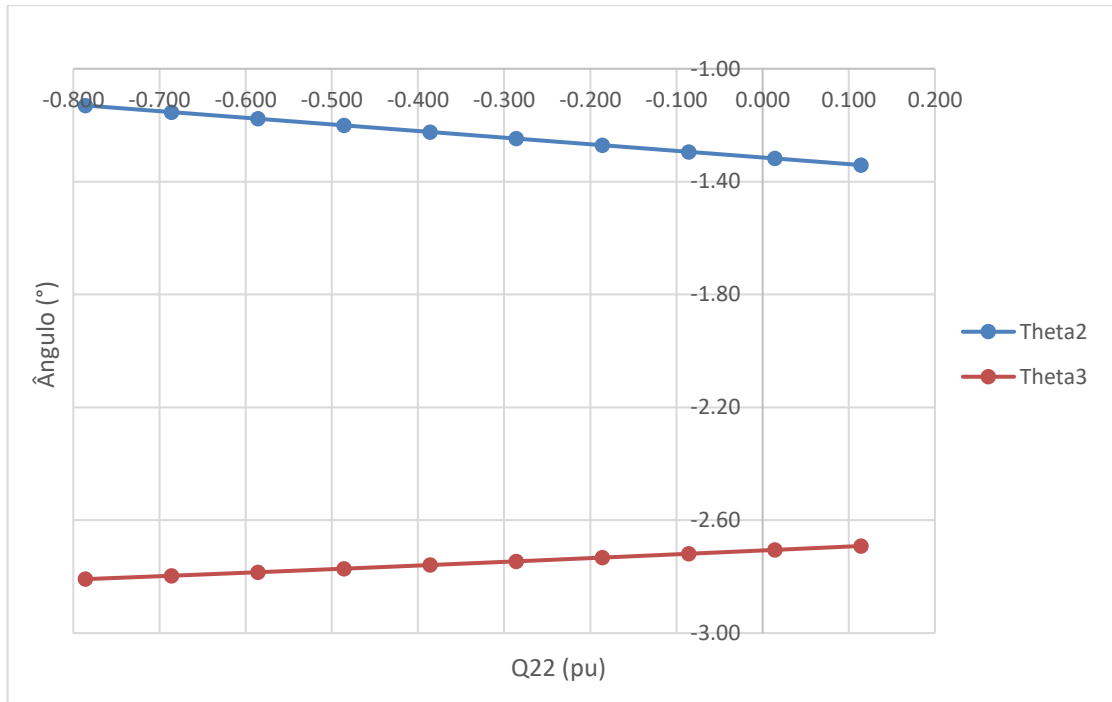
Q22	0.263	0.363	0.463	0.563	0.663	0.763	0.863	0.963	1.063
Var.P12	0.005	0.004	0.002	0.001	0.000	-0.001	-0.002	-0.003	-0.005
Var.P13	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001
Var.P22	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002
Var.Q12	-0.144	-0.108	-0.072	-0.036	0.000	0.036	0.072	0.107	0.143
Var.Q13	0.066	0.050	0.033	0.017	0.000	-0.017	-0.033	-0.050	-0.066
Var.Q22	-0.167	-0.126	-0.084	-0.042	0.000	0.042	0.084	0.127	0.170
Var.V1	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003
Var.V2	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001

Figura 20: Variação de estados das Tensões para variação de erro em Q22



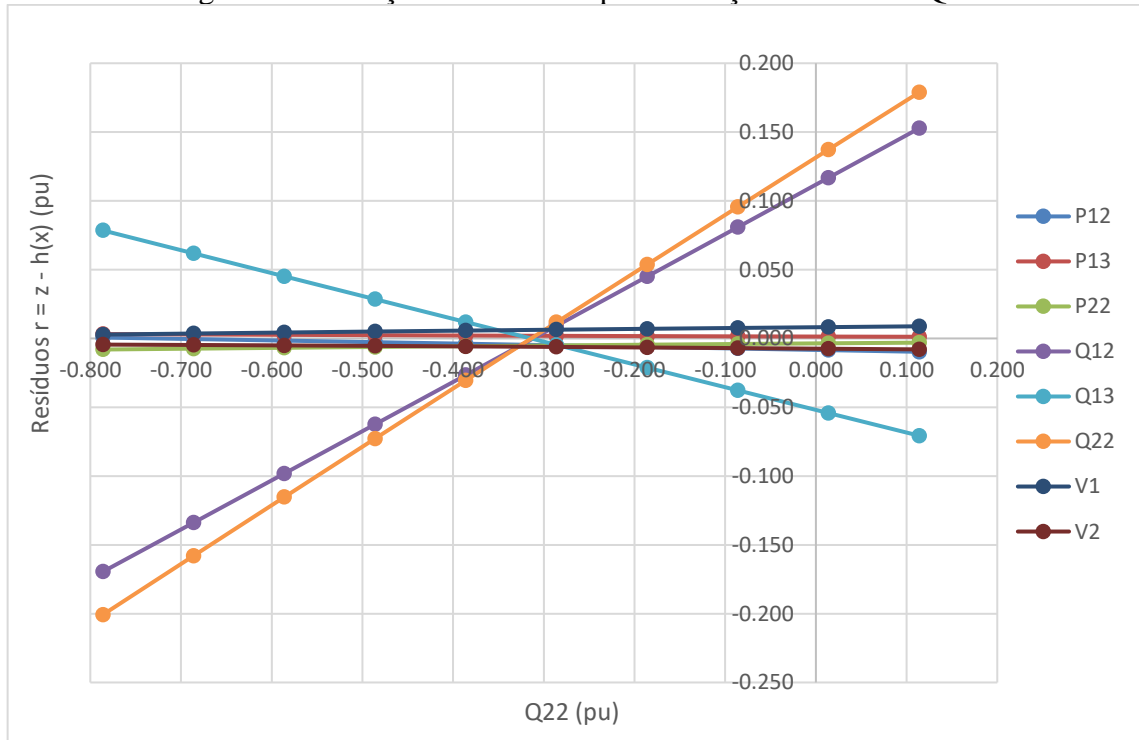
Fonte: autor

Figura 21: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em Q22



Fonte: autor

Figura 22: Variação de Resíduos para variação de erro em Q22



Fonte: autor

Aplicando a Equação (16) nas Tabela 33, Tabela 34, Tabela 35 e Tabela 36, obtemos os seguintes resultados:

Tabela 37: Varição dos estados estimados para variação do erro em Q22

Var. $\theta 2$	4.18%
Var. $\theta 3$	1.07%
Var. V1	0.15%
Var. V2	0.09%
Var. V3	0.36%

---

Tabela 38: Varição dos resíduos para variação em Q22

Var.P12	51.44%
Var.P13	24.34%
Var.P22	23.83%
Var.Q12	867.57%
Var.Q13	788.96%
Var.Q22	797.77%
Var.V1	22.78%
Var.V2	14.52%

---

Como observado no comportamento dos casos anteriores, percebe-se que as medidas com maior variação estão relacionadas ao tipo de medida que inclui EM. Nesse contexto, nota-se um valor elevado para os resíduos das potências reativas. Comparando as condições de EM para fluxo de potência em relação aos casos de potência injetada, nota-se que os casos de EM de fluxo de potência acaba impactando mais nos estados estimados, isso se dá pois na formulação matemática do EE, os dados de fluxo de potência obtidos do sistema apresentam maior confiabilidade, matematicamente falando, o peso atribuído é maior para esse tipo de medida.

### 3.4.8 Erro de Medição V1

As Tabela 39, Tabela 40, Tabela 41 e Tabela 42 apresentam os dados relativos ao erro introduzido no parâmetro de medição magnitude de tensão na barra 1 (V1), considera-se o valor 1.006 como valor referente a operação na condição de erro zero. Na Tabela 39 são apresentados os valores referentes aos estados estimados e na Tabela 41 são apresentados os valores referentes aos resíduos obtidos a partir da terceira interação do EE.

Os resultados também podem ser observados graficamente nas Figura 23, Figura 24 e Figura 25. Nas Tabela 40 e Tabela 42 apresenta a diferença entre a condição de erro zero e a condição com erro simples dos estados estimados e resíduos, respectivamente.

Tabela 39: Estados Estimados com variação de erro de medição em V1

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
$\theta_1$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-1.945	-1.725	-1.540	-1.382	-1.248	-1.131	-1.030	-0.942	-0.865
$\theta_3$	-4.358	-3.844	-3.415	-3.053	-2.746	-2.482	-2.255	-2.058	-1.885
V1	0.806	0.854	0.902	0.951	1.000	1.049	1.098	1.147	1.196
V2	0.775	0.825	0.874	0.924	0.974	1.024	1.074	1.124	1.174
V3	0.738	0.790	0.841	0.893	0.944	0.995	1.046	1.098	1.149

Tabela 40: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em V1

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
Var. $\theta_2$	0.697	0.478	0.292	0.135	0.000	-0.116	-0.217	-0.305	-0.383
Var. $\theta_3$	1.612	1.098	0.669	0.307	0.000	-0.263	-0.491	-0.688	-0.861
Var.V1	0.194	0.146	0.097	0.049	0.000	-0.049	-0.098	-0.147	-0.196
Var.V2	0.199	0.149	0.100	0.050	0.000	-0.050	-0.100	-0.150	-0.200
Var.V3	0.206	0.154	0.103	0.051	0.000	-0.051	-0.103	-0.154	-0.205

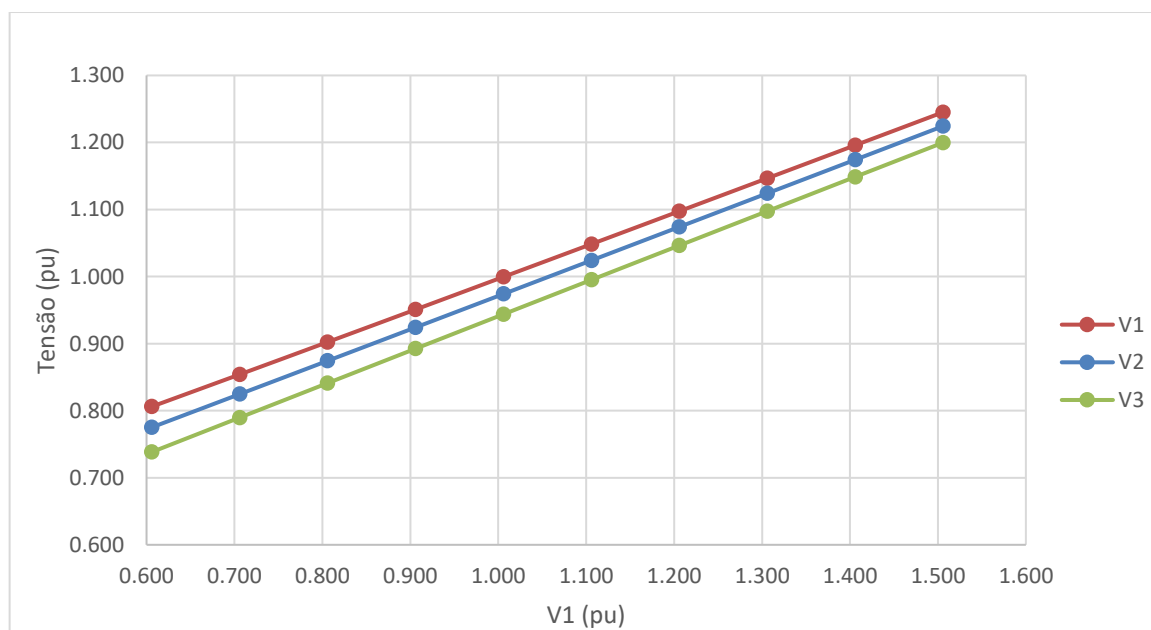
Tabela 41: Resíduos com variação de erro de medição em V1

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
P12	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004	-0.005	-0.006	-0.006	-0.007	-0.008
P13	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000
P22	-0.012	-0.010	-0.008	-0.007	-0.005	-0.004	-0.003	-0.001	0.000
Q12	0.021	0.018	0.015	0.012	0.009	0.007	0.005	0.003	0.001
Q13	0.004	0.001	-0.001	-0.003	-0.005	-0.006	-0.008	-0.009	-0.010
Q22	-0.009	-0.003	0.003	0.007	0.012	0.016	0.019	0.022	0.025
V1	-0.200	-0.148	-0.096	-0.045	0.006	0.058	0.108	0.159	0.210
V2	0.193	0.143	0.094	0.044	-0.006	-0.056	-0.106	-0.156	-0.206

Tabela 42: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em V1

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
Var.P12	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003
Var.P13	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
Var.P22	0.007	0.005	0.003	0.001	0.000	-0.001	-0.003	-0.004	-0.005
Var.Q12	-0.012	-0.009	-0.005	-0.003	0.000	0.002	0.005	0.007	0.008
Var.Q13	-0.008	-0.006	-0.004	-0.001	0.000	0.002	0.003	0.004	0.005
Var.Q22	0.021	0.015	0.009	0.005	0.000	-0.004	-0.007	-0.011	-0.013
Var.V1	0.207	0.154	0.103	0.051	0.000	-0.051	-0.102	-0.153	-0.204
Var.V2	-0.199	-0.149	-0.100	-0.050	0.000	0.050	0.100	0.150	0.200

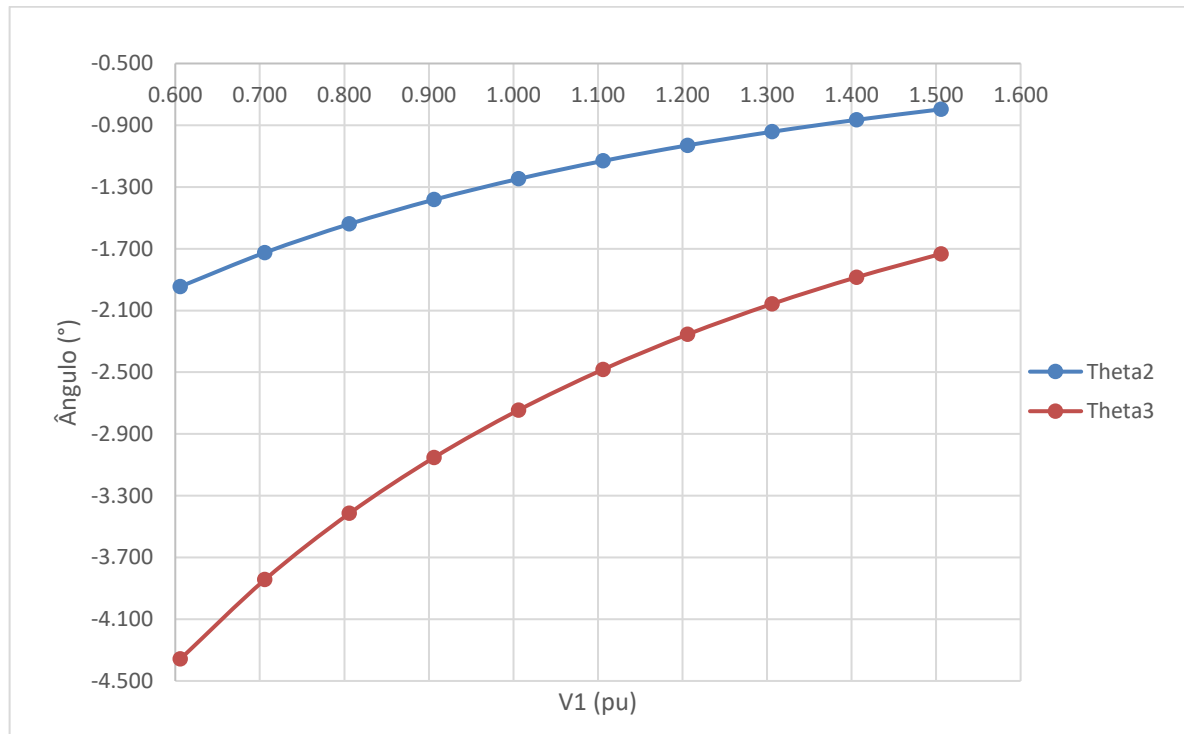
Figura 23: Variação de estados das Tensões para variação de erro em V1



Fonte: autor

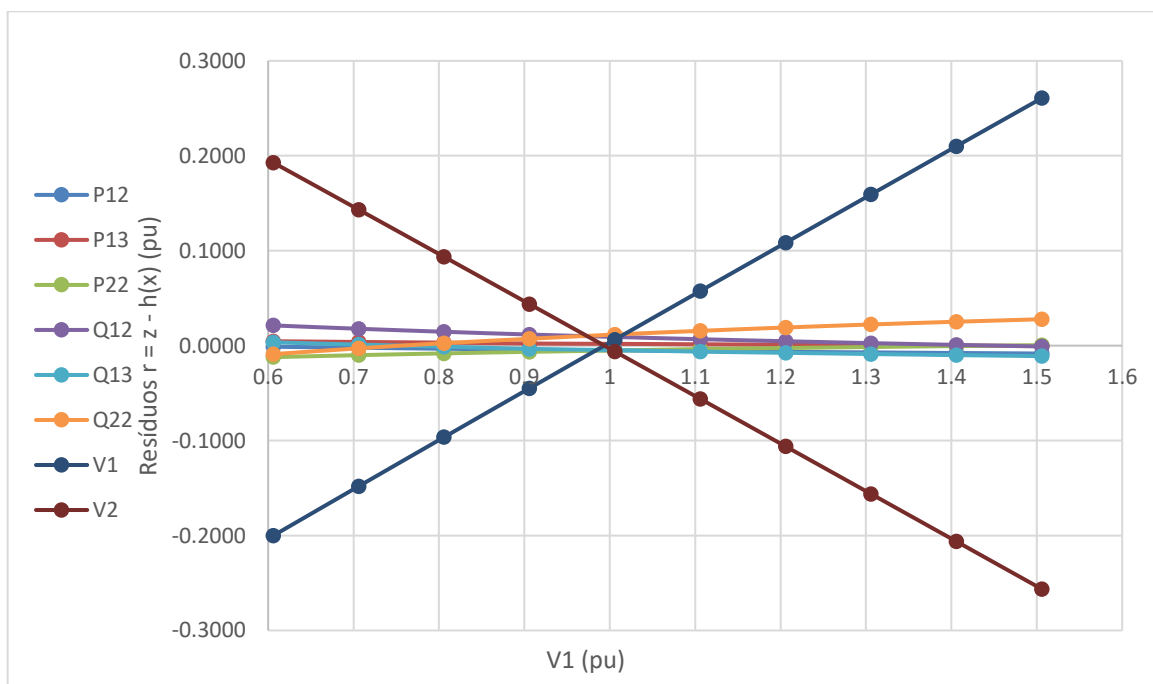


Figura 24: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em V1



Fonte: autor

Figura 25: Variação de Resíduos para variação de erro em V1



Fonte: autor

Aplicando a Equação (16) nas Tabela 39, Tabela 40, Tabela 41 e Tabela 42, obtemos os seguintes resultados:

Tabela 43: Variação dos estados estimados para variação do erro em V1

Var. $\theta 2$	23.36%
Var. $\theta 3$	24.24%
Var. V1	10.84%
Var. V2	11.39%
Var. V3	12.08%

---

Tabela 44: Variação dos resíduos para variação de erro em V1

Var. P12	36.03%
Var. P13	64.00%
Var. P22	63.04%
Var. Q12	61.17%
Var. Q13	78.31%
Var. Q22	79.74%
Var. V1	1788.08%
Var. V2	1801.14%

---

Nota-se que os estados estimados apresentam, em sua totalidade, uma variação maior em comparação aos casos anteriores (EM em potência ativa e reativa). Isso se dá ao fato da maior confiabilidade atribuída as medidas de tensão do sistema.

### 3.4.9 Erro de Medição V2

As Tabela 45, Tabela 46, Tabela 47 e Tabela 48 apresentam os dados relativos ao erro introduzido no parâmetro de medição magnitude de tensão na barra 2 (V2), considera-se o valor 0.968 como valor referente a operação na condição de erro zero. Na Tabela 45 são apresentados os valores referentes aos estados estimados e na Tabela 47 são apresentados os valores referentes aos resíduos obtidos a partir da terceira interação do EE.

Os resultados também podem ser observados graficamente nas Figura 26, Figura 27 e Figura 28. Nas Tabela 46 e Tabela 48 apresenta a diferença entre a condição de erro zero e a condição com erro simples dos estados estimados e resíduos, respectivamente.

Tabela 45: Estados Estimados com variação de erro de medição em V2

V2	0.568	0.668	0.768	0.868	0.968	1.068	1.168	1.268	1.368
$\theta_1$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-1.981	-1.745	-1.550	-1.386	-1.248	-1.129	-1.027	-0.938	-0.860
$\theta_3$	-4.442	-3.890	-3.437	-3.062	-2.746	-2.477	-2.247	-2.048	-1.875
V1	0.799	0.849	0.900	0.950	1.000	1.050	1.099	1.149	1.199
V2	0.767	0.819	0.871	0.923	0.974	1.025	1.076	1.127	1.178
V3	0.730	0.784	0.838	0.891	0.944	0.996	1.049	1.101	1.153

Tabela 46: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em V2

V2	0.568	0.668	0.768	0.868	0.968	1.068	1.168	1.268	1.368
Var. $\theta_2$	0.734	0.498	0.302	0.139	0.000	-0.119	-0.221	-0.310	-0.387
Var. $\theta_3$	1.696	1.144	0.692	0.316	0.000	-0.268	-0.499	-0.698	-0.871
Var.V1	0.200	0.150	0.100	0.050	0.000	-0.050	-0.100	-0.150	-0.200
Var.V2	0.208	0.155	0.103	0.051	0.000	-0.051	-0.102	-0.153	-0.204
Var.V3	0.214	0.160	0.106	0.053	0.000	-0.053	-0.105	-0.157	-0.209

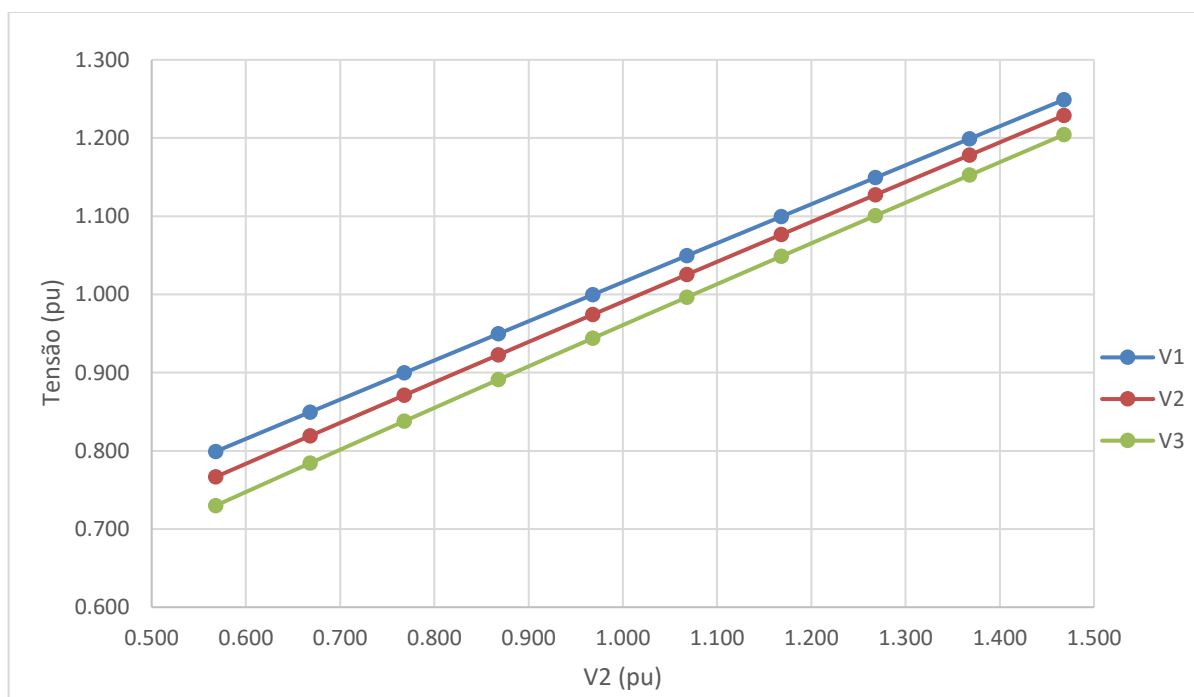
Tabela 47: Resíduos com variação de erro de medição em V2

V2	0.568	0.668	0.768	0.868	0.968	1.068	1.168	1.268	1.368
P12	-0.011	-0.009	-0.008	-0.006	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001
P13	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003
P22	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004	-0.005	-0.006	-0.007	-0.007	-0.008
Q12	-0.010	-0.005	0.001	0.005	0.009	0.013	0.016	0.019	0.022
Q13	-0.009	-0.008	-0.007	-0.006	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001
Q22	0.024	0.020	0.017	0.014	0.012	0.009	0.007	0.005	0.003
V1	0.207	0.157	0.106	0.056	0.006	-0.044	-0.094	-0.143	-0.193
V2	-0.199	-0.151	-0.103	-0.055	-0.006	0.043	0.091	0.141	0.190

Tabela 48: Erro dos Resíduos para diferentes erros de medição em V2

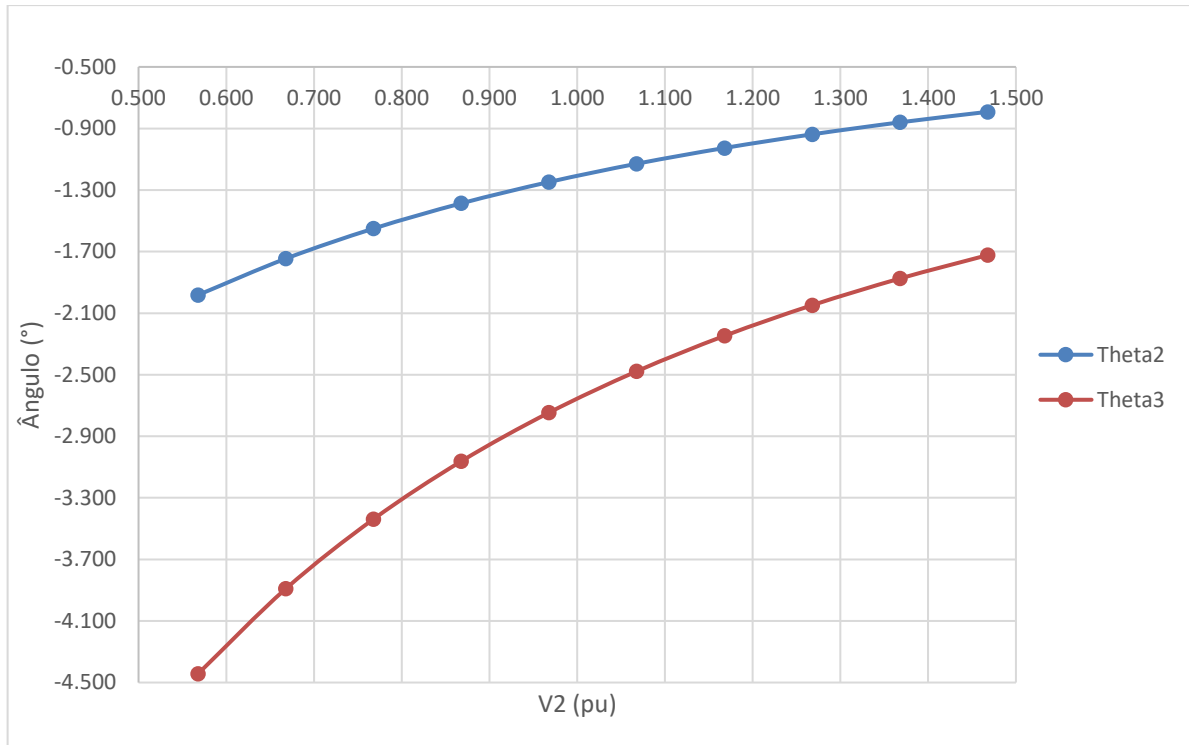
V2	0.568	0.668	0.768	0.868	0.968	1.068	1.168	1.268	1.368
Var.P12	0.006	0.004	0.003	0.001	0.000	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004
Var.P13	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
Var.P22	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.002	0.002	0.003
Var.Q12	0.020	0.014	0.009	0.004	0.000	-0.004	-0.007	-0.010	-0.012
Var.Q13	0.004	0.003	0.002	0.002	0.000	-0.001	-0.001	-0.003	-0.003
Var.Q22	-0.012	-0.009	-0.005	-0.002	0.000	0.002	0.005	0.007	0.009
Var.V1	-0.200	-0.150	-0.100	-0.050	0.000	0.050	0.100	0.150	0.199
Var.V2	0.193	0.145	0.097	0.049	0.000	-0.049	-0.098	-0.147	-0.196

Figura 26: Variação de estados das Tensões para variação de erro em V2



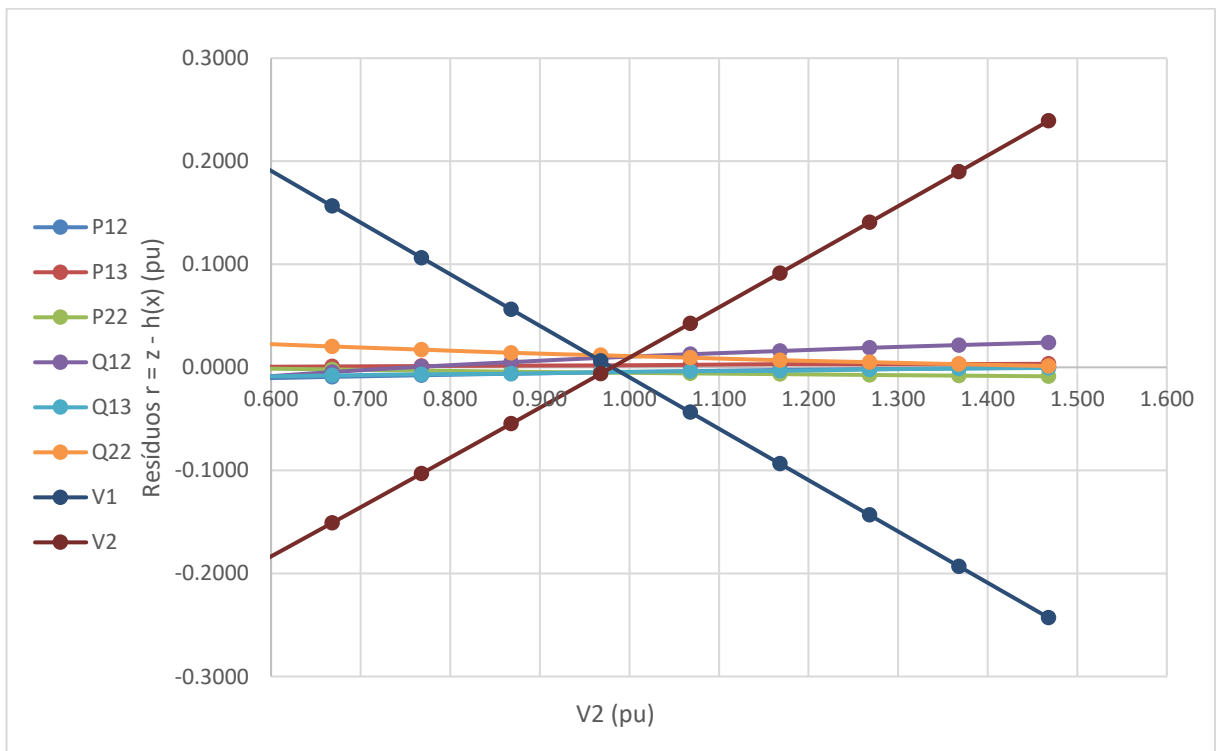
Fonte: autor

Figura 27: Variação para estado dos Ângulos com variação de erro em V2



Fonte: autor

Figura 28: Variação de Resíduos para variação de erro em V2



Fonte: autor

Aplicando a Equação (16) nas Tabela 45, Tabela 46, Tabela 47 e Tabela 48, obtemos os seguintes resultados:

Tabela 49: Variação dos estados estimados para variação do erro em V2

Var. $\theta_2$	24.13%
Var. $\theta_3$	25.03%
Var. V1	11.11%
Var. V2	11.72%
Var. V3	12.42%

---

Tabela 50: Variação dos resíduos para variação em V2

Var. P12	55.25%
Var. P13	42.65%
Var. P22	38.45%
Var. Q12	95.09%
Var. Q13	46.38%
Var. Q22	48.12%
Var. V1	1743.66%
Var. V2	1754.16%

---

Da mesma forma visto no caso de EM em V1, nota-se que os estados estimados apresentam, em sua totalidade, uma variação maior em comparação aos casos anteriores (EM em potência ativa e reativa). Isso se dá ao fato da maior confiabilidade atribuída as medidas de tensão do sistema.

### 3.5 PROPOSTA METODOLOGIA DE VARIAÇÃO DE PESOS

Após identificar os erros e compreender sua influência é proposto nesta seção um método corretivo. Essa metodologia visa ajustar o parâmetro associado ao peso da medida afetada pelos erros identificados. Por meio de simulações, exploramos diferentes variações desse parâmetro corretivo em intervalos percentuais, buscando elucidar como essas alterações impactam os resíduos e os estados estimados pelo EE. Esta abordagem estratégica tem como objetivo mitigar os efeitos específicos dos EM, contribuindo para aprimorar a robustez e a precisão do estimador.

O estudo foi direcionado para duas medidas específicas, V1 e P22, a fim de compreender os efeitos corretivos sobre diferentes parâmetros do sistema e destacar a eficácia dessa abordagem em medidas específicas.

No estudo de caso abordando a modificação do valor relativo ao peso da medida de P22 e V1, terceiro e sétimos valor na diagonal principal da equação (12), respectivamente, foram considerados os EM discutidos no tópico 0 e 3.4.8. Inicialmente, em condições operacionais normais, este peso é atribuído a um valor de 10000 e 62500, respectivamente. Essas condições são atribuídas para as condições de covariância dos parâmetros adotados por ABUR e EXPÓSITO (2004), os quais consideram a covariância (Equação (11)) de  $10^{-4}$  para os parâmetros de potência injetada na barra e covariância de  $16 \cdot 10^{-6}$  para medidas de magnitude de tensão. Realizaram-se simulações para cenários nos quais esse peso foi reduzido para 90%, 50%, 10% e 0% do seu valor normal de operação. Observados os impactos causados nos estados estimados e nos resíduos, além disso, foram calculados os parâmetros estatísticos de variância e desvio padrão referentes aos testes realizados.

Quanto aos dados apresentados graficamente, se optou por exibir apenas as medidas mais afetadas, conforme pode ser observado nos estudos de erro. Para o caso de EM em P22, os dados exibidos são referentes aos elementos de fluxo e injeção de potência ativa, já para o caso de EM em V1, são mostrados os impactos causados apenas nos elementos de tensão do sistema teste.

### 3.5.1 Variação do Peso para 90% em P22

As Tabela 51, Tabela 52, Tabela 53 e Tabela 54 apresentam os dados relativos ao erro introduzido no parâmetro de medição potência injetada na barra 2 (P22), considera-se o valor 1.006 como valor referente a operação na condição de erro zero e o peso atribuído é de 90% do peso original. Na Tabela 51 são apresentados os valores referentes aos estados estimados e na Tabela 53 são apresentados os valores referentes aos resíduos obtidos a partir da terceira interação do EE.

Os resultados também podem ser observados graficamente na Figura 29. Nas Tabela 52 e Tabela 54 apresenta a diferença entre a condição de erro zero e a condição com erro simples dos estados estimados e resíduos, respectivamente.

Tabela 51: Estados Estimados com variação de erro medição em P22 e peso 90%

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
$\theta_1$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-1.007	-1.059	-1.127	-1.187	-1.247	-1.307	-1.367	-1.426	-1.485
$\theta_3$	-2.945	-2.902	-2.845	-2.796	-2.746	-2.696	-2.647	-2.597	-2.548
V1	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001
V2	0.975	0.975	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974

Tabela 52: Erro de estimação dos estados para diferentes erros de medição em P22 e peso 90%

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
Var. $\theta_2$	-0.240	-0.188	-0.120	-0.060	0.000	0.060	0.119	0.179	0.238
Var. $\theta_3$	0.199	0.156	0.099	0.050	0.000	-0.050	-0.099	-0.149	-0.198
Var.V1	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001
Var.V2	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.V3	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002



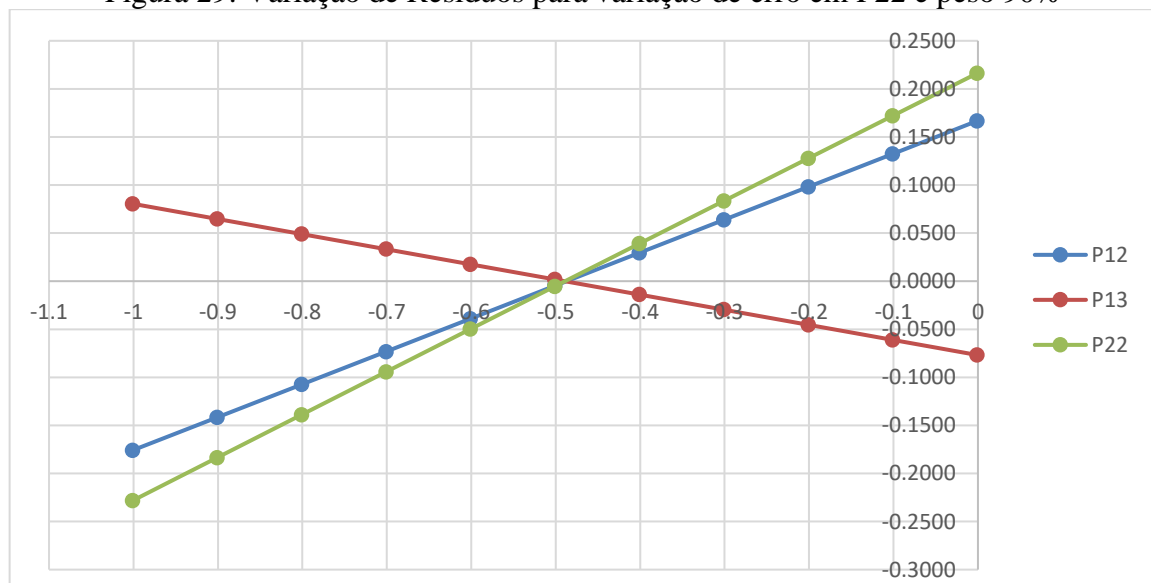
Tabela 53: Resíduos com variação de erro de medição em P22 e peso 90%

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
P12	0.132	0.098	0.064	0.029	-0.005	-0.039	-0.073	-0.108	-0.142
P13	-0.061	-0.045	-0.030	-0.014	0.002	0.018	0.033	0.049	0.065
P22	0.172	0.128	0.083	0.039	-0.005	-0.050	-0.094	-0.139	-0.184
Q12	0.013	0.012	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005
Q13	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004	-0.004	-0.004	-0.003
Q22	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.011	0.011	0.010	0.009
V1	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005
V2	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006

Tabela 54: Variação dos resíduos para diferentes erros de medição em P22 e peso 90%

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
Var.P12	-0.137	-0.103	-0.069	-0.034	0.000	0.034	0.068	0.103	0.137
Var.P13	0.063	0.047	0.031	0.016	0.000	-0.016	-0.031	-0.047	-0.063
Var.P22	-0.177	-0.133	-0.089	-0.044	0.000	0.044	0.089	0.134	0.178
Var.Q12	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004
Var.Q13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001
Var.Q22	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003
Var.V1	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Var.V2	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Figura 29: Variação de Resíduos para variação de erro em P22 e peso 90%



Fonte: autor

Aplicando a Equação (16) nas Tabela 51, Tabela 53, Tabela 53 E Tabela 54 obtemos os seguintes resultados:

Tabela 55: Variação dos estados estimados para variação do erro em P22 e peso 90%

Var.θ2	10.72%
Var.θ3	4.04%
Var.V1	0.05%
Var.V2	0.03%
Var.V3	0.12%

---

Tabela 56: Variação dos resíduos para variação em P22 e peso 90%

Var. P12	1586.7%
Var.P13	1924.3%
Var.P22	1834.9%
Var.Q12	25.4%
Var.Q13	10.2%
Var.Q22	10.3%
Var.V1	7.6%
Var.V2	4.7%

---

Informa-se que os procedimentos detalhados para os pesos de 50%, 10% e 0% da medida P22 foram removidos do corpo principal do documento e agora estão disponíveis no apêndice. Essa decisão foi tomada para simplificar a apresentação dos resultados principais neste documento, enquanto ainda são fornecidas acesso às informações detalhadas para aqueles que desejam uma análise mais aprofundada dos dados. No Apêndice A, os leitores encontrarão as tabelas correspondentes aos diferentes pesos da medida P22, permitindo uma compreensão completa das variações observadas nas condições de peso.

### 3.5.2 Resultados do teste de variação de Peso

Conforme apresentado neste tópico, analisou-se o impacto dos EM para o parâmetro de medição P22. A Tabela 57 apresenta o resumo do EMap dos resíduos resultantes para variação de peso da medida contendo erro simples. A Tabela 58 apresenta o resumo dos EMap dos estados estimados para variação de peso da medida P22 contendo EM. Embora os testes anteriormente citados foram aplicados para condições de 90%, 50%, 10% e 0% do peso, apresenta-se dados mais completos dos testes.

Tabela 57: Resíduos para variação de peso para erro de medição em P22

Peso%	0%	10%	20%	40%	60%	80%
Var. P12	0.00%	1055.46%	1300.40%	1471.05%	1538.32%	1574.3%
Var.P13	0.00%	2253.52%	2055.79%	1969.31%	1942.05%	1928.7%
Var.P22	1842.38%	1841.49%	1840.64%	1838.98%	1837.35%	1835.7%
Var.Q12	0.00%	5.50%	9.84%	16.23%	20.71%	24.0%
Var.Q13	0.00%	2.18%	3.91%	6.48%	8.29%	9.6%
Var.Q22	0.00%	2.23%	3.98%	6.57%	8.38%	9.7%
Var.V1	0.00%	1.64%	2.93%	4.84%	6.18%	7.2%
Var.V2	0.00%	1.04%	1.85%	3.02%	3.83%	4.4%

Tabela 58: Estados Estimados para variação de peso para erro de medição em P22

Peso%	0%	10%	20%	40%	60%	80%
Var.θ2	0.00%	2.35%	4.18%	6.86%	8.72%	10.09%
Var.θ3	0.00%	0.88%	1.57%	2.58%	3.28%	3.80%
Var.V1	0.00%	0.01%	0.02%	0.03%	0.04%	0.05%
Var.V2	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	0.03%
Var.V3	0.00%	0.03%	0.05%	0.08%	0.10%	0.11%

### 3.5.3 Variação do Peso em V1

O procedimento descrito no tópico anterior foi aplicado à medida de potência injetada na barra 2. Essa medida pode ser interpretada como uma carga conectada à barra 2 ou representar um consumidor em um sistema de distribuição genérico, onde pode indicar um possível desvio de energia quando analisado globalmente. Neste contexto, o procedimento será repetido para a medida de magnitude de tensão da barra 1. Neste estudo, a barra é tratada como um consumidor genérico que pode estar associado à geração distribuída de energia (GD), cujos dados podem ser manipulados para obter vantagens em relação à distribuidora de energia. Os dados processados estão disponíveis no Apêndice B, e os resultados estão apresentados nas tabelas subsequentes.

Tabela 59: Resíduos para variação de peso para erro em V1

Peso%	0%	10%	50%	90%
Var.P12	0.0%	5.7%	24.2%	34.1%
Var.P13	0.0%	5.8%	41.8%	60.3%
Var.P22	0.0%	10.9%	41.2%	59.4%
Var.Q12	0.0%	10.4%	39.7%	57.7%
Var.Q13	0.0%	12.8%	52.6%	74.1%
Var.Q22	0.0%	14.8%	52.8%	75.4%
Var.V1	1786.8%	1786.8%	1787.1%	1787.9%
Var.V2	0.0%	1876.0%	1809.3%	1802.1%

Tabela 60: Estados Estimados para variação de peso para erro em V1

Peso%	0%	10%	50%	90%
Var.θ1	0.00%	3.99%	15.05%	21.99%
Var.θ3	0.00%	4.12%	15.58%	22.81%
Var.V1	0.00%	1.94%	7.18%	10.26%
Var.V2	0.00%	2.04%	7.55%	10.78%
Var.V3	0.00%	2.17%	8.01%	11.43%

### 3.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.6.1 Resultados

Na fase de resultados da nossa análise, exploramos os desvios padrões derivados de simulações envolvendo erro de medição e variação de peso em um estimador de estados. Ao investigar os desvios padrões, buscamos entender a dispersão dos dados resultantes das simulações. Essas métricas estatísticas são indicativas da variabilidade e estabilidade do estimador sob diferentes cenários de erro e variação de peso. O exame detalhado dos desvios padrões permite-nos avaliar a consistência e confiabilidade do estimador em face das incertezas inerentes às medidas e à ponderação utilizada no processo. As Tabela 61 e Tabela 62 a seguir apresentam os desvios padrões obtidos das simulações para EM em P22, com variação de  $\pm 0.4$  pu em torno da condição de erro zero, simuladas com espaçamento de 0.1 entre cada simulação, para cada situação, se realizou a variação de peso das medidas com EM, obtendo-se:

Tabela 61: Desvio Padrão para EE para variação de peso em P22

Peso%	0%	20%	40%	60%	80%	100%
$\theta_2$	0.0000	0.0640	0.1052	0.1339	0.1551	0.1713
$\theta_3$	0.0000	0.0531	0.08736	0.1112	0.1287	0.1422
V1	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0006
V2	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0003	0.0004
V3	0.0000	0.0005	0.0009	0.0011	0.0013	0.0015

Tabela 62: Desvio Padrão para resíduos para variação de peso em P22

Peso%	0%	20%	40%	60%	80%	100%
P12	0.0000	0.0367	0.0603	0.0767	0.0888	0.09818
P13	0.0000	0.0169	0.0277	0.0352	0.0408	0.04508
P22	0.2739	0.2143	0.1761	0.1493	0.1297	0.11464
Q12	0.0000	0.0011	0.0018	0.0023	0.0027	0.00301
Q13	0.0000	0.0002	0.0004	0.0004	0.0005	0.00064
Q22	0.0000	0.0006	0.0010	0.0012	0.0014	0.00156
V1	0.0000	0.0002	0.0004	0.0004	0.0005	0.00063
V2	0.0000	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003	0.00037

As Tabela 63 e Tabela 64 a seguir apresentam os desvios padrões obtidos das simulações para EM em V1, com variação de  $\pm 0.4$  pu em torno da condição de erro zero, simuladas com espaçamento de 0.1 entre cada simulação, para cada situação, se realizou a variação de peso das medidas com EM, obtendo-se:

Tabela 63: Desvio Padrão para EE para variação de peso em V1

Peso%	0%	20%	40%	60%	80%	100%
$\theta_2$	0.0000	0.1145	0.1994	0.2664	0.3214	0.3675
$\theta_3$	0.0000	0.2604	0.4542	0.6078	0.7342	0.8410
V1	0.0000	0.0438	0.0755	0.0996	0.1184	0.1335
V2	0.0000	0.0449	0.0773	0.1019	0.1212	0.1367
V3	0.0000	0.0461	0.0795	0.1048	0.1246	0.1405

Tabela 64: Desvio Padrão para resíduos para variação de peso em V1

Peso%	0%	20%	40%	60%	80%	100%
P12	0.0000	0.0007	0.0012	0.0017	0.0020	0.0022
P13	0.0000	0.0005	0.0008	0.0012	0.0014	0.0015
P22	0.0000	0.0013	0.0022	0.0029	0.0035	0.0040
Q12	0.0000	0.0023	0.0039	0.0052	0.0062	0.0070
Q13	0.0000	0.0015	0.0025	0.0034	0.0041	0.0046
Q22	0.0000	0.0037	0.0065	0.0085	0.0102	0.0116
V1	0.2739	0.2301	0.1983	0.1743	0.1555	0.1404
V2	0.0000	0.0448	0.0773	0.1019	0.1120	0.1367

### 3.6.2 Discussões

Nos segmentos anteriores, conduzimos uma análise centrada na variação dos pesos das medidas afetadas por erro de medição (EM). A partir dessa análise, empreendemos uma avaliação estatística dos parâmetros dos estados estimados e dos resíduos resultantes das simulações. Focalizamos nossa atenção nas condições específicas de desvio padrão (DP) e erro médio absoluto percentual (EMAp), considerando pesos de medidas variando entre 100%, 90%, 50% e 10% do valor de referência padrão. Os resultados obtidos foram meticulosamente documentados nas Tabelas 51, 52, 69 e 70, destacando as nuances das variações de peso e EM nas medidas de P22 e V1.

No caso da medida P22, observamos resultados que indicam um comportamento de EMAp elevado (superior a 1000%) nos resíduos para medidas que contêm EM, como P22, além de suas contrapartes (P12 e P13). Notavelmente, a medida P22 com EM exibe uma variação inferior a 8% para diferentes pesos, caracterizando uma estabilidade que não é observada nas medidas semelhantes (P12 e P13), que variam mais de 300% para diferentes pesos em P22. Entretanto, outras medidas (potências reativas e tensões) demonstram um comportamento padrão de decréscimo à medida que o peso da medida P22 diminui.

Ao examinar o impacto do EM e da variação de peso em P22 na estimação dos estados (conforme apresentado na Tabela 52), observamos que o erro nos estados de tensão das barras é inferior a 1% para todos os pesos simulados. O impacto mais expressivo é evidenciado nos ângulos das barras, alcançando mais de 10% para condições de peso com EM superior a 80%.

Analisando agora o caso de EM em V1, notamos um comportamento semelhante ao caso anterior, com a medida V1 e suas semelhantes (V2) apresentando um EMAp elevado (superior a 1000%) nos resíduos das simulações. V1 também exibe um comportamento estável quando o peso da medida é reajustado, enquanto outras medidas (potências ativas e reativas) revelam um decréscimo quando o peso é reajustado.

Comparando o EM em P22 com o EM em V1, observamos que o impacto do EM em V1 é mais significativo na estimação dos estados, como indicado na Tabela 70. Os erros chegam a 5% quando o peso da medida com EM é superior a 10%, podendo ultrapassar 20% quando o peso é superior a 90%.

Concluindo nossa análise de resultados, podemos afirmar que o comportamento dos desvios padrões para ambas as condições de EM são notavelmente semelhantes. Em ambos os casos, os DP das medidas afetadas por EM aumentam à medida que o peso diminui, quando examinamos os resíduos (Tabela 72 e Tabela 74). Por outro lado, as demais medidas apresentam

uma diminuição nos DP para as mesmas condições. Ao analisar os estados estimados, observamos um comportamento decrescente do erro para todos os parâmetros conforme o peso da medida com erro é reduzido, abrangendo ambos os cenários simulados. Essas conclusões reforçam a importância crítica da análise detalhada da sensibilidade e da variação de peso na confiabilidade e precisão dos estimadores de estados, fornecendo um alicerce sólido para ajustes futuros e otimizações.



## 4 CONCLUSÕES

A investigação aprofundada sobre a sensibilidade, variação de peso e erros de medição aplicados ao estimador de estados revelou condições cruciais para a compreensão de sua robustez em face de condições variáveis. Ao examinar a resposta do estimador às alterações nos pesos das variáveis, observamos um impacto direto nos resultados, destacando a notável sensibilidade do estimador a esses ajustes. A redução dos pesos atribuídos às variáveis com erros resultou em um aumento proporcional tanto no erro médio absoluto percentual (EMAp) quanto no desvio padrão (DP) das variáveis que apresentavam erros de medição, possibilitando identificar a variável composta de erro.

Além disso, a uniformidade na resposta do estimador diante de diversos tipos de erros de medição reflete sua consistência e adaptabilidade em ambientes desafiadores. A compreensão dos efeitos das variações de peso e dos erros de medição é essencial para o contínuo refinamento desses sistemas, contribuindo para aprimorar sua capacidade de estimativa em diferentes condições e assegurar uma operação mais confiável e eficiente das redes elétricas.

O estudo realizado neste trabalho proporcionou uma compreensão mais profunda do comportamento do estimador de estados diante de variações de pesos, erros de medição e sensibilidade a diferentes variáveis. No entanto, há perspectivas promissoras para futuras investigações que podem aprimorar ainda mais a eficiência e confiabilidade desse estimador.

Uma dessas direções inclui a exploração de métodos mais adaptativos para ajustar dinamicamente os pesos das variáveis, considerando a dinâmica do sistema e as flutuações na carga. Além disso, a aplicação de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina pode oferecer novas perspectivas, possibilitando uma adaptação mais precisa e preditiva ao comportamento do sistema.

Outra área promissora para estudos futuros é a análise mais aprofundada da convergência do método de estimativa, considerando diferentes condições iniciais e topologias de rede para garantir a estabilidade do estimador. A realização de experimentos práticos pode validar e comparar os resultados teóricos, proporcionando uma compreensão mais robusta do desempenho do estimador em cenários reais de redes de distribuição.

A segurança cibernética é outra frente crucial, exigindo uma análise minuciosa para proteger o estimador contra possíveis ataques, desenvolvendo métodos de detecção e prevenção contra injeções de dados maliciosos.

Essas áreas de pesquisa representam caminhos promissores para aprimorar a confiabilidade, a precisão e a eficiência dos estimadores de estados em redes de distribuição, contribuindo significativamente para o desenvolvimento contínuo e aprimoramento desse campo.

## REFERÊNCIAS

- ABUR, A.; EXPÓSITO, A. G. **Power system state estimation : theory and implementation**. [s.l.] Marcel Dekker, 2004.
- BRETAS, A. **Quasi Static Power Systems State Estimation**. [s.l.: s.n.].
- CHILARD, O.; GRENARD, S. **Detection of measurements errors with a distribution network state estimation function**. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013). **Anais...**2013.
- CONTE, F. et al. **Distribution Network Topology Identification by PMU-based State Estimation**. 2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). **Anais...**2023.
- CRUZ, R. V; QUINTERO, C. V; PEREZ, F. **Detecting Non-Technical Losses in Radial Distribution System Transformation Point through the Real Time State Estimation Method**. 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. **Anais...**2006.
- KEERTHANA, T.; ASHOK, S. **Detection of False Data Injection Attacks in Distribution System State Estimation**. 2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon). **Anais...**2022.
- LIU, L.; HE, J. H. **Application of weighted least square algorithm in distribution network state estimation with finite measurement information**. 2014 International Conference on Power System Technology. **Anais...**2014.
- LOPES, T. T. E. **Estimadores de Estado em Sistemas de Energia Elétrica Incluindo Restrições Fuzzy**. [s.l.: s.n.].
- MESTAV, K. R.; LUENGO-ROZAS, J.; TONG, L. **State Estimation for Unobservable Distribution Systems via Deep Neural Networks**. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). **Anais...**2018.
- MONTICELLI, A.; WU, F. F.; YEN, M. **Mutiple Bad Data Identwication for State Estimation by Combinatorial Oftimization**. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 3, p. 361–369, 1986.
- SUN, L. et al. **Two-Stage Linear State Estimation for Active Distribution Networks**. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). **Anais...**2018.
- WANG, S. et al. **WLS State Estimation Method of Distribution Network Topology Partition Based on Phase Measurement Unit**. 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). **Anais...**2021.
- YUEHAO, Y. et al. **A distribution network state estimation method based on power user electric energy data acquisition system**. 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). **Anais...**2016.





Tabela 73: Resíduos com variação de erro de medição em P22 e peso 10%

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
P12	0.029	0.021	0.013	0.006	-0.002	-0.009	-0.017	-0.024	-0.032
P13	-0.013	-0.010	-0.007	-0.003	0.000	0.004	0.007	0.011	0.014
P22	0.341	0.253	0.165	0.077	-0.011	-0.098	-0.186	-0.274	-0.362
Q12	0.010	0.010	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.008
Q13	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004
Q22	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011
V1	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
V2	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006

Tabela 74: Variação dos resíduos para diferentes erros de medição em P22 e peso 10%

P22	-0.101	-0.201	-0.301	-0.401	-0.501	-0.601	-0.701	-0.801	-0.901
Var. P12	-0.030	-0.023	-0.015	-0.008	0.000	0.008	0.015	0.023	0.030
Var.P13	0.014	0.010	0.007	0.003	0.000	-0.003	-0.007	-0.010	-0.014
Var.P22	-0.351	-0.263	-0.176	-0.088	0.000	0.088	0.176	0.263	0.351
Var.Q12	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Var.Q13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.Q22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.V1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.V2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela 75: Variação dos estados estimados para variação do erro em P22 e peso 10%

Var.θ2 2.35%

Var.θ3 0.88%

Var.V1 0.01%

Var.V2 0.01%

Var.V3 0.03%

Tabela 76: Variação dos resíduos para variação em P22 e peso 10%

Var. P12 1055.46%

Var.P13 2253.52%

Var.P22 1841.49%

Var.Q12 5.50%

Var.Q13 2.18%

Var.Q22 2.23%

Var.V1 1.64%

Var.V2 1.04%



Tabela 81: Variação dos estados estimados para variação do erro em P22 e peso 0%

Var.θ2	0.000%
Var.θ3	0.000%
Var.V1	0.000%
Var.V2	0.000%
Var.V3	0.000%

Tabela 82: Variação dos resíduos para variação em P22 e peso 0%

Var. P12	0.00%
Var. P13	0.00%
Var. P22	1842.38%
Var. Q12	0.00%
Var. Q13	0.00%
Var. Q22	0.00%
Var. V1	0.00%
Var. V2	0.00%



## 6 APÊNDICE B

Tabela 83: Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e Peso 90%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
$\theta_1$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-1.895	-1.694	-1.523	-1.376	-1.248	-1.138	-1.041	-0.956	-0.881
$\theta_3$	-4.242	-3.772	-3.375	-3.037	-2.748	-2.497	-2.279	-2.089	-1.921
V1	0.816	0.862	0.907	0.953	0.999	1.046	1.092	1.138	1.185
V2	0.786	0.832	0.879	0.927	0.974	1.021	1.068	1.116	1.163
V3	0.749	0.798	0.846	0.895	0.944	0.992	1.041	1.089	1.137

Tabela 84: Variação dos Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e peso 90%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
Var. $\theta_2$	0.647	0.446	0.274	0.127	0.000	-0.111	-0.207	-0.292	-0.367
Var. $\theta_3$	1.494	1.024	0.628	0.290	0.000	-0.250	-0.468	-0.659	-0.827
Var.V1	0.183	0.138	0.092	0.046	0.000	-0.046	-0.093	-0.139	-0.186
Var.V2	0.188	0.141	0.094	0.047	0.000	-0.047	-0.095	-0.142	-0.189
Var.V3	0.194	0.146	0.097	0.049	0.000	-0.049	-0.097	-0.146	-0.194

Tabela 85: Resíduos com variação de erro em V1 e peso 90%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
P12	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004	-0.005	-0.006	-0.006	-0.007	-0.008
P13	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000
P22	-0.012	-0.010	-0.008	-0.006	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001
Q12	0.021	0.017	0.014	0.012	0.009	0.007	0.005	0.003	0.001
Q13	0.003	0.001	-0.001	-0.003	-0.005	-0.006	-0.007	-0.009	-0.010
Q22	-0.008	-0.002	0.003	0.007	0.012	0.015	0.019	0.022	0.025
V1	-0.210	-0.156	-0.101	-0.047	0.007	0.060	0.114	0.168	0.221
V2	0.182	0.136	0.089	0.041	-0.006	-0.053	-0.100	-0.148	-0.195

Tabela 86: Variação dos Resíduos com variação de erro de medição em V1 e peso 90%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
Var. P12	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003
Var.P13	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
Var.P22	0.007	0.005	0.003	0.001	0.000	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004
Var.Q12	-0.011	-0.008	-0.005	-0.002	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008
Var.Q13	-0.008	-0.005	-0.003	-0.001	0.000	0.002	0.003	0.004	0.005
Var.Q22	0.019	0.014	0.009	0.004	0.000	-0.004	-0.007	-0.010	-0.013
Var.V1	0.217	0.162	0.108	0.054	0.000	-0.054	-0.107	-0.161	-0.214
Var.V2	-0.188	-0.141	-0.094	-0.047	0.000	0.047	0.095	0.142	0.189

Tabela 87: Variação dos estados estimados para variação do erro em V1 e peso 90%

Var.θ2	21.99%
Var.θ3	22.81%
Var.V1	10.26%
Var.V2	10.78%
Var.V3	11.43%

Tabela 88: EMAp dos resíduos para variação em V1 e peso 90%

Var.P12	34.1%
Var.P13	60.3%
Var.P22	59.4%
Var.Q12	57.7%
Var.Q13	74.1%
Var.Q22	75.4%
Var.V1	1787.9%
Var.V2	1802.1%

Tabela 89: Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e Peso 50%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
θ1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
θ2	-1.663	-1.544	-1.437	-1.340	-1.253	-1.174	-1.101	-1.036	-0.976
θ3	-3.699	-3.424	-3.178	-2.957	-2.758	-2.578	-2.415	-2.267	-2.132
V1	0.869	0.901	0.933	0.965	0.998	1.030	1.062	1.095	1.127
V2	0.840	0.873	0.906	0.939	0.972	1.005	1.038	1.071	1.105
V3	0.806	0.840	0.874	0.908	0.942	0.976	1.010	1.044	1.078

Tabela 90: Variação dos Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e peso 50%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
Var.θ2	0.410	0.291	0.184	0.087	0.000	-0.079	-0.151	-0.217	-0.277
Var.θ3	0.942	0.666	0.420	0.199	0.000	-0.180	-0.343	-0.491	-0.626
Var.V1	0.128	0.096	0.064	0.032	0.000	-0.032	-0.065	-0.097	-0.130
Var.V2	0.132	0.099	0.066	0.033	0.000	-0.033	-0.066	-0.099	-0.132
Var.V3	0.136	0.102	0.068	0.034	0.000	-0.034	-0.068	-0.102	-0.136

Tabela 91: Resíduos com variação de erro em V1 e peso 50%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
P12	-0.003	-0.003	-0.004	-0.005	-0.005	-0.006	-0.006	-0.006	-0.007
P13	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
P22	-0.009	-0.008	-0.007	-0.006	-0.005	-0.004	-0.003	-0.003	-0.002
Q12	0.017	0.015	0.013	0.011	0.009	0.008	0.006	0.005	0.003
Q13	0.000	-0.001	-0.002	-0.004	-0.005	-0.006	-0.007	-0.007	-0.008
Q22	-0.001	0.002	0.006	0.009	0.012	0.014	0.017	0.019	0.021
V1	-0.263	-0.195	-0.127	-0.059	0.008	0.076	0.144	0.211	0.279
V2	0.128	0.095	0.062	0.029	-0.004	-0.037	-0.070	-0.103	-0.137

Tabela 92: Variação dos Resíduos com variação de erro de medição em V1 e peso 50%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
Var. P12	-0.002	-0.002	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002
Var.P13	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Var.P22	0.004	0.003	0.002	0.001	0.000	-0.001	-0.002	-0.003	-0.003
Var.Q12	-0.007	-0.005	-0.003	-0.002	0.000	0.002	0.003	0.005	0.006
Var.Q13	-0.005	-0.004	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004
Var.Q22	0.013	0.009	0.006	0.003	0.000	-0.003	-0.005	-0.007	-0.010
Var.V1	0.272	0.204	0.136	0.068	0.000	-0.068	-0.135	-0.203	-0.270
Var.V2	-0.132	-0.099	-0.066	-0.033	0.000	0.033	0.066	0.099	0.132

Tabela 93: Variação dos estados estimados para variação do erro de medição em V1 e peso 50%

Var.θ2	15.05%
Var.θ3	15.58%
Var.V1	7.18%
Var.V2	7.55%
Var.V3	8.01%

Tabela 94: Variação dos resíduos para variação em do erro de medição em V1 e peso 50%

Var.P12	24.2%
Var.P13	41.8%
Var.P22	41.2%
Var.Q12	39.7%
Var.Q13	52.6%
Var.Q22	52.8%
Var.V1	1787.1%
Var.V2	1809.3%

Tabela 95: Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e Peso 10%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
$\theta_1$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2$	-1.356	-1.331	-1.307	-1.283	-1.260	-1.238	-1.216	-1.195	-1.174
$\theta_3$	-2.992	-2.936	-2.881	-2.827	-2.775	-2.724	-2.675	-2.627	-2.580
V1	0.960	0.969	0.977	0.986	0.995	1.003	1.012	1.021	1.030
V2	0.933	0.942	0.951	0.960	0.969	0.978	0.987	0.996	1.005
V3	0.902	0.911	0.920	0.929	0.939	0.948	0.957	0.966	0.975

Tabela 96: Variação dos Estados Estimados com variação de erro de medição em V1 e peso 10%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
Var. $\theta_2$	0.095	0.071	0.046	0.023	0.000	-0.022	-0.044	-0.065	-0.086
Var. $\theta_3$	0.217	0.161	0.106	0.052	0.000	-0.051	-0.100	-0.148	-0.195
Var.V1	0.035	0.026	0.017	0.009	0.000	-0.009	-0.017	-0.026	-0.035
Var.V2	0.036	0.027	0.018	0.009	0.000	-0.009	-0.018	-0.027	-0.036
Var.V3	0.037	0.027	0.018	0.009	0.000	-0.009	-0.018	-0.027	-0.037

Tabela 97: Resíduos com variação de erro em V1 e peso 10%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
P12	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.006
P13	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
P22	-0.006	-0.006	-0.006	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004	-0.004
Q12	0.011	0.011	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008
Q13	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.006
Q22	0.008	0.009	0.010	0.011	0.011	0.012	0.013	0.013	0.014
V1	-0.354	-0.263	-0.171	-0.080	0.011	0.103	0.194	0.285	0.377
V2	0.035	0.026	0.017	0.008	-0.001	-0.010	-0.019	-0.028	-0.037

Tabela 98: Variação dos Resíduos com variação de erro de medição em V1 e peso 10%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
Var. P12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Var.P13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.P22	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001
Var.Q12	-0.002	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
Var.Q13	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Var.Q22	0.003	0.002	0.002	0.001	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003
Var.V1	0.365	0.274	0.183	0.091	0.000	-0.091	-0.183	-0.274	-0.365
Var.V2	-0.036	-0.027	-0.018	-0.009	0.000	0.009	0.018	0.027	0.036



Tabela 103: Resíduos com variação de erro em V1 e peso 0%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
P12	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
P13	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
P22	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
Q12	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
Q13	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004
Q22	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
V1	-0.388	-0.288	-0.188	-0.088	0.012	0.112	0.212	0.312	0.412
V2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela 104: Variação dos Resíduos com variação de erro de medição em V1 e peso 0%

V1	0.606	0.706	0.806	0.906	1.006	1.106	1.206	1.306	1.406
Var. P12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.P13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.P22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.Q12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.Q13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.Q22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Var.V1	0.400	0.300	0.200	0.100	0.000	-0.100	-0.200	-0.300	-0.400
Var.V2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabela 105: Variação dos estados estimados para variação do erro de medição em V1 e peso 0%

Var.θ2	0.000%
Var.θ3	0.000%
Var.V1	0.000%
Var.V2	0.000%
Var.V3	0.000%

Tabela 106: Variação dos resíduos para variação em do erro de medição em V1 e peso 0%

Var.P12	0.0%
Var.P13	0.0%
Var.P22	0.0%
Var.Q12	0.0%
Var.Q13	0.0%
Var.Q22	0.0%
Var.V1	1786.8%
Var.V2	0.0%