



Universidade Federal de Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Bárbara da Silva Medeiros

**Proposição de Modelos de Fluxo de Potência Polar Intervalar mediante
Utilização de Métodos de Compensação**

Dissertação de Mestrado

Juiz de Fora

2018

Bárbara da Silva Medeiros

**Proposição de Modelos de Fluxo de Potência Polar Intervalar mediante
Utilização de Métodos de Compensação**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Vander Menengoy da Costa, D.Sc.

Juiz de Fora

2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

da Silva Medeiros, Bárbara.

Proposição de Modelos de Fluxo de Potência Polar Intervalar mediante Utilização de Métodos de Compensação / Bárbara da Silva Medeiros. -- 2018.

138 f.

Orientador: Vander Menengoy da Costa

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.

1. Fluxo de potência intervalar. 2. Análise de incertezas. 3. Métodos de Compensação. I. Menengoy da Costa, Vander, orient. II. Título.

Bárbara da Silva Medeiros

Proposição de Modelos de Fluxo de Potência Polar Intervalar mediante
Utilização de Métodos de Compensação

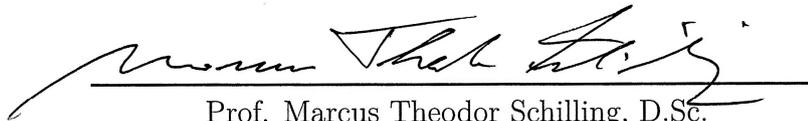
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 19 de Julho de 2018.

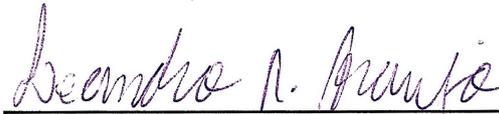
BANCA EXAMINADORA



Prof. Vander Menengoy da Costa, D.Sc. - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Marcus Theodor Schilling, D.Sc.
Universidade Federal Fluminense



Prof. Leandro Ramos de Araujo, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

*Dedico este trabalho à minha amada família
e aos meus amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por sempre me conceder a força necessária nas provações que se apresentam em meu caminho, assim como pelas oportunidades tão valiosas para minha formação.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Vander Menengoy da Costa, que com sua sabedoria, experiência e dedicação incessante, foi de fundamental importância para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado. Agradeço a ele também pela confiança prestada a mim para realizar este trabalho.

Aos meus pais, Paulo de Tarso Medeiros e Sandra Helena da Silva, que são o alicerce da minha vida pessoal. A eles agradeço por todo amor, dedicação, paciência, incentivo, apoio e compreensão incondicionais em todos os momentos da minha vida.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, que, através dos conhecimentos transmitidos a mim durante a graduação e a pós-graduação, contribuíram para o meu crescimento profissional e, também, para a minha capacitação necessária para o desenvolvimento deste mestrado.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao PPEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo suporte financeiro.

Por fim, gostaria de agradecer a todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

"Avalia-se a inteligência de um indivíduo
pela quantidade de incertezas que ele é
capaz de suportar."
(Immanuel Kant)

RESUMO

Nesta dissertação, duas novas estratégias são propostas para calcular o problema do fluxo de potência sujeito às incertezas nos parâmetros das linhas de transmissão e das cargas dos sistemas elétricos. No estudo de fluxo de potência tradicional, os parâmetros dos sistemas de potência são tratados como quantidades determinísticas. Entretanto, esses dados, como a impedância das linhas de transmissão e a potência aparente das cargas conectadas às barras, podem apresentar incertezas associadas à medição ou à variação ao longo do tempo. Técnicas baseadas em amostragem, como Monte Carlo, apresentam resultados excelentes, porém demandam elevado tempo de processamento computacional. Por isso, atualmente, técnicas *soft-computing*, que apresentam resultados confiáveis de maneira eficiente, sem necessitar de muitos recursos computacionais, têm sido pesquisadas. O objetivo deste trabalho é, neste sentido, adaptar metodologias existentes na literatura, que não são utilizadas, a princípio, para este fim, para a solução do fluxo de potência intervalar e avaliar se os resultados são confiáveis e eficientes. A adaptação é realizada considerando pequenas incertezas, como geralmente ocorre na realidade, resultando em métodos aproximados de análise de fluxo de potência intervalar. O primeiro método desenvolvido é baseado na técnica de montagem direta da matriz impedância de barras, sem recorrer à inversão da matriz admitância de barras. O segundo método é baseado no Teorema da Compensação, utilizado na análise de sensibilidade. O algoritmo é desenvolvido e testado em Matlab, considerando diferentes casos de incerteza, com os seguintes sistemas-testes: brasileiro de 33 barras, IEEE de 57 barras e brasileiro de 107 barras. Os resultados são comparados com aqueles gerados pela simulação de Monte Carlo, a fim de validação. Em geral, os métodos apresentam desempenho satisfatório, pois resultados intervalares viáveis de tensão e fluxo de potência, assim como perdas nas linhas, são encontrados como esperado, sem a aplicação de técnicas existentes na literatura, como a matemática intervalar ou aritmética *affine*.

Palavras-chave: Fluxo de potência intervalar. Análise de incertezas. Métodos de compensação.

ABSTRACT

In this dissertation, two new strategies are proposed to calculate the problem of power flow subjected to uncertainties in the parameters of transmission lines and loads of electrical systems. In traditional power flow analysis, power system parameters are treated as deterministic quantities. However some data, such as the impedance of transmission lines and the apparent power of loads connected to buses, may present uncertainties associated with measurement or variation over time. Sampling techniques, such as Monte Carlo, present excellent results, but require a high processing time. Therefore, nowadays, *soft-computing* techniques, which present reliable results in an efficient manner, without the need of many computational resources, have been researched. In this sense, the objective of this work is to adapt existing methodologies in the literature, which are not used for this purpose, for the solution of interval power flow and to evaluate if the results are reliable and efficient. The adaptation is performed considering small uncertainties, as usually occurs in reality, resulting in approximate methods of interval power flow analysis. The first method developed is based on the technique of direct assembly of the bus impedance matrix, without resorting to the inversion of the bus admittance matrix. The second method is based on the Compensation Theorem, used in the sensitivity analysis. The algorithm is developed and tested in Matlab, considering different cases of uncertainty, with the following test systems: Brazilian 33-bus, IEEE 57-bus and Brazilian 107-bus. The results are compared with those generated by the Monte Carlo simulation for validation. In general, the methods present satisfactory performance, as viable intervals of voltage and power flow, as well as losses in the lines, are found as expected, without application of techniques existing in the literature, such as interval mathematics or arithmetic *affine*.

Key-words: Interval power flow. Uncertainties analysis. Compensation methods.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de um sistema elétrico genérico.	27
Figura 2 – Estratégia para a adição de um ramo entre dois nós do sistema.	28
Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema-exemplo de 3 barras.	33
Figura 4 – Diagrama unifilar do sistema-exemplo de 3 barras com a inserção de uma linha.	34
Figura 5 – Teorema da Compensação.	36
Figura 6 – Representação gráfica da impedância intervalar de um ramo genérico k – m	41
Figura 7 – Representação gráfica da admitância intervalar de uma carga genérica conectada à barra k	44
Figura 8 – Fluxograma dos algoritmos propostos para análise do fluxo de potência intervalar.	46
Figura 9 – Tensões nodais intervalares do sistema-exemplo de 3 barras com incer- teza de $\pm 10\%$ na linha $1 - 2$ e na carga da barra 2	69
Figura 10 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-exemplo de 3 barras com incerteza de $\pm 10\%$ na linha $1 - 2$ e na carga da barra 2	70
Figura 11 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.	73
Figura 12 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.	75
Figura 13 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.	77
Figura 14 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.	79
Figura 15 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.	81
Figura 16 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.	83
Figura 17 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.	87
Figura 18 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.	89
Figura 19 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.	91

Figura 20 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.	93
Figura 21 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.	95
Figura 22 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.	97
Figura 23 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.	100
Figura 24 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.	102
Figura 25 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.	104
Figura 26 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.	106
Figura 27 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.	108
Figura 28 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.	110
Figura 29 – Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 33 barras.	143
Figura 30 – Diagrama unifilar do sistema-teste IEEE de 57 barras.	147
Figura 31 – Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 107 barras.	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de barra do sistema 3 barras	33
Tabela 2 – Dados de linha do sistema 3 barras	33
Tabela 3 – Tensões nodais intervalares do sistema-exemplo de 3 barras com incerteza de $\pm 10\%$ na linha 1 – 2 e na carga da barra 2	68
Tabela 4 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-exemplo de 3 barras com incerteza de $\pm 10\%$ na linha 1 – 2 e na carga da barra 2	68
Tabela 5 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas	72
Tabela 6 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas	74
Tabela 7 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas	76
Tabela 8 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas	78
Tabela 9 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas	80
Tabela 10 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas	82
Tabela 11 – Tensões intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas	86
Tabela 12 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas	88
Tabela 13 – Tensões intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas	90
Tabela 14 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas	92
Tabela 15 – Tensões intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas	94
Tabela 16 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas	96
Tabela 17 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas	99
Tabela 18 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas	101
Tabela 19 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas	103

Tabela 20 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas	105
Tabela 21 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas	107
Tabela 22 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas	109
Tabela 23 – Tempo médio de processamento computacional para o sistema-teste brasileiro de 33 barras	112
Tabela 24 – Tempo médio de processamento computacional para o sistema-teste IEEE de 57 barras	112
Tabela 25 – Tempo médio de processamento computacional para o sistema-teste brasileiro de 107 barras	112
Tabela 26 – Dados de barra do sistema-teste brasileiro de 33 barras	143
Tabela 27 – Dados de linha do sistema-teste brasileiro de 33 barras	144
Tabela 28 – Dados de barra do sistema-teste IEEE de 57 barras	147
Tabela 29 – Dados de linha do sistema-teste IEEE de 57 barras	149
Tabela 30 – Dados de barra do sistema-teste brasileiro de 107 barras	153
Tabela 31 – Dados de linha do sistema-teste brasileiro de 107 barras	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCOR	Compensação de Correntes
CMIB	Compensação da Matriz Impedância de Barras
MC	Monte Carlo
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta b_{k,min}$	Limite inferior da variação em susceptância intervalar da carga conectada à barra k
$\Delta b_{k,max}$	Limite superior da variação em susceptância intervalar da carga conectada à barra k
$\Delta g_{k,min}$	Limite inferior da variação em condutância intervalar da carga conectada à barra k
$\Delta g_{k,max}$	Limite superior da variação em condutância intervalar da carga conectada à barra k
$\Delta y_{k,lim_i}$	Limites i da variação em admitância intervalar da carga conectada à barra k , $i = 1, 2, 3, 4$
θ_i	Ângulo de fase da tensão da barra $i = 1, 2, 3, \dots, n$
a	Número de amostras das variáveis de entrada do fluxo de potência intervalar via métodos CMIB e CCOR
a_{tap}	Tap do transformador
b_k	Susceptância da carga conectada à barra k
C	Matriz definida no Lema da Matriz Inversa
C_a	Matriz definida no Lema da Matriz Inversa para cada amostra dos métodos CMIB e CCOR, $a = 1, 2, 3, 4$ ou $a = 1, 2, 3, \dots, 16$
D	Matriz diagonal contendo as impedâncias a serem inseridas
D_a	Matriz diagonal contendo as impedâncias a serem inseridas para cada amostra dos métodos CMIB e CCOR, $a = 1, 2, 3, 4$ ou $a = 1, 2, 3, \dots, 16$
g_k	Condutância da carga conectada à barra k
\underline{I}	Vetor de correntes fasoriais injetadas nas barras
\underline{I}_0	Vetor de correntes fasoriais injetadas nas barras do caso base
I_i	Módulo da corrente injetada na barra $i = 1, 2, 3, \dots, n$
\dot{I}_i	Corrente fasorial injetada na barra $i = 1, 2, 3, \dots, n$

\underline{I}_{comp}	Vetor de correntes fasoriais injetadas nas barras compensadas
\underline{I}_{comp_a}	Vetor de correntes fasoriais injetadas nas barras compensadas para cada amostra dos métodos CMIB e CCOR, $a = 1, 2, 3, 4$ ou $a = 1, 2, 3, \dots, 16$
$\mathbf{I_d}$	Matriz identidade
\mathbf{M}	Matriz incidência
n	Número de barras do sistema elétrico de potência
P_k	Potência ativa da carga conectada à barra k
$P_{k,min}$	Limite inferior da potência ativa intervalar da carga conectada à barra k
$P_{k,det}$	Valor determinístico da potência ativa da carga conectada à barra k
$P_{k,max}$	Limite superior da potência ativa intervalar da carga conectada à barra k
Q_k	Potência reativa da carga conectada à barra k
$Q_{k,min}$	Limite inferior da potência reativa intervalar da carga conectada à barra k
$Q_{k,det}$	Valor determinístico da potência reativa da carga conectada à barra k
$Q_{k,max}$	Limite superior da potência reativa intervalar da carga conectada à barra k
r_{km}	Resistência do ramo $k - m$
$r_{km,min}$	Limite inferior da resistência intervalar do ramo $k - m$
$r_{km,det}$	Valor determinístico da resistência do ramo $k - m$
$r_{km,max}$	Limite superior da resistência intervalar do ramo $k - m$
S_k	Potência aparente da carga conectada à barra k
\bar{t}_{CCOR}	Tempo médio de processamento computacional demandado pelo método CCOR
\bar{t}_{CMIB}	Tempo médio de processamento computacional demandado pelo método CMIB

u	Número de elementos do sistema elétrico sujeitos às incertezas, linhas e cargas
\underline{V}	Vetor de tensões nodais fasoriais
\underline{V}_0	Vetor de tensões nodais fasoriais do caso base
\underline{V}_a	Vetor de tensões nodais fasoriais para cada amostra dos métodos CMIB e CCOR, $a = 1, 2, 3, 4$ ou $a = 1, 2, 3, \dots, 16$
V_i	Módulo da tensão da barra $i = 1, 2, 3, \dots, n$
\dot{V}_i	Tensão fasorial da barra $i = 1, 2, 3, \dots, n$
V_{km}	Módulo da tensão entre as barras k e m
\dot{V}_{km}	Tensão fasorial entre as barras k e m
x_{km}	Reatância do ramo $k - m$
$x_{km,min}$	Limite inferior da reatância intervalar do ramo $k - m$
$x_{km,det}$	Valor determinístico da reatância do ramo $k - m$
$x_{km,max}$	Limite superior da reatância intervalar do ramo $k - m$
\mathbf{Y}_0	Matriz admitância de barras do caso base
\mathbf{Y}_{barra}	Matriz admitância de barras
y_k	Admitância da carga conectada à barra k
y_{km}	Admitância do ramo $k - m$
\mathbf{Z}_0	Matriz impedância de barras do caso base
\mathbf{Z}_{barra}	Matriz impedância de barras
$\mathbf{Z}_{barra,atual}$	Matriz impedância de barras após a redução de Kron
$\mathbf{Z}_{barra,atual_a}$	Matriz impedância de barras após a redução de Kron para cada amostra dos métodos CMIB e CCOR, $a = 1, 2, 3, 4$ ou $a = 1, 2, 3, \dots, 16$
$\mathbf{Z}_{barra,aum}$	Matriz impedância de barras com a adição de um ramo
\mathbf{Z}_{barra,aum_a}	Matriz impedância de barras com a adição de um ramo para cada amostra dos métodos CMIB e CCOR, $a = 1, 2, 3, 4$ ou $a = 1, 2, 3, \dots, 16$
Z_{ij}	Elemento da matriz impedância de barras, $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$

z_{km}	Impedância do ramo $k - m$
$z_{km,det}$	Valor determinístico da impedância do ramo $k - m$
$z_{km,inserido_i}$	Impedância do ramo i a ser inserido em paralelo ao ramo $k - m$, para equivaler a um valor de z_{km,lim_i} , $i = 1, 2, 3, 4$
z_{km,lim_i}	Limites i da impedância intervalar do ramo $k - m$, $i = 1, 2, 3, 4$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2	REVISÃO DE LITERATURA	20
1.3	MOTIVAÇÃO	25
1.4	OBJETIVOS	25
1.5	PUBLICAÇÕES	26
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2	METODOLOGIAS TRADICIONAIS	27
2.1	MONTAGEM DIRETA DA MATRIZ IMPEDÂNCIA DE BARRAS	27
2.1.1	Exemplo Numérico	32
2.2	TEOREMA DA COMPENSAÇÃO	35
2.2.1	Exemplo Numérico	38
3	ALGORITMOS PROPOSTOS PARA ANÁLISE DE INCERTEZAS EM FLUXO DE POTÊNCIA	40
3.1	TRATAMENTO DAS INCERTEZAS	40
3.2	DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS	45
3.2.1	Compensação da Matriz Impedância de Barras	49
3.2.2	Compensação de Correntes	50
3.3	EXEMPLO NUMÉRICO	51
4	RESULTADOS	71
4.1	RESULTADOS NUMÉRICOS DAS VARIÁVEIS DO FLUXO DE POTÊNCIA	72
4.1.1	Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras	72
4.1.1.1	Incerteza sobre Todas as Linhas	72
4.1.1.2	Incerteza sobre Todas as Cargas	76
4.1.1.3	Incerteza sobre Todas as Linhas e Todas as Cargas	80
4.1.1.4	Comentários	84
4.1.2	Sistema-Teste IEEE de 57 Barras	86
4.1.2.1	Incerteza sobre Todas as Linhas	86
4.1.2.2	Incerteza sobre Todas as Cargas	90
4.1.2.3	Incerteza sobre Todas as Linhas e Todas as Cargas	94
4.1.2.4	Comentários	98

4.1.3	Sistema-Teste Brasileiro de 107 Barras	99
4.1.3.1	Incerteza sobre Todas as Linhas	99
4.1.3.2	Incerteza sobre Todas as Cargas	103
4.1.3.3	Incerteza sobre Todas as Linhas e Todas as Cargas	107
4.1.3.4	Comentários	111
4.2	TEMPO DE PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL	112
5	CONCLUSÃO	114
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	115
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A – Código em Matlab dos Algoritmos Propostos	120
A.1	Código principal	120
A.2	Função fluxo_de_potencia	135
A.3	Função kron	139
A.4	Função fluxo	139
A.5	Função compensacao_zbarra	139
A.6	Função compensacao_correntes	140
	ANEXO A – Dados dos Sistemas em Análise	142
A.1	Sistema-teste brasileiro de 33 barras	142
A.2	Sistema-teste IEEE de 57 barras	146
A.3	Sistema-teste brasileiro de 107 barras	152

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A análise de fluxo de potência permite determinar as tensões e correntes em estado estacionário de um sistema elétrico de potência. Por isso, é uma ferramenta fundamental e amplamente utilizada em engenharia de energia, na análise de segurança, no controle de tensão, entre outros [1].

No estudo de fluxo de potência tradicional, os parâmetros do sistema elétrico de potência são, geralmente, tratados como quantidades determinísticas. Esta abordagem fornece a solução para um único estado do sistema. Entretanto, os dados podem apresentar erros de medição. E, além disso, a operação do sistema elétrico é dinâmica, estando submetida a diversas variações ao longo do tempo. Tais fatores configuram incertezas que podem estar associadas, por exemplo, à impedância das linhas de transmissão ou às cargas conectadas nas barras.

Incertezas nos dados de entrada em estudos de fluxo de potência, apresentadas na forma de intervalos, fazem com que as respostas, ou seja, as tensões nas barras e os fluxos nas linhas em regime permanente, também sejam representados por intervalos. Portanto, a consideração de incertezas na análise de fluxo de potência é de extrema importância para a determinação da realidade dos sistemas elétricos.

As metodologias mais citadas na literatura, para resolver o fluxo de potência considerando as variáveis de entrada como variáveis intervalares, propõem o uso de métodos probabilísticos, considerando a variabilidade e a natureza estocástica dos dados de entrada [2]. Em particular, os métodos de propagação de incerteza baseados em amostragem, como a simulação de Monte Carlo (MC), exigem inúmeras simulações para avaliar diferentes combinações possíveis dos valores de entrada. Na simulação de MC, amostras aleatórias das variáveis de entrada são geradas e, em seguida, o problema determinístico é resolvido para cada amostra [3]. Portanto, quanto mais amostras, mais preciso é o resultado. Uma vez que o número de simulações é bastante elevado, os recursos computacionais necessários para esses tipos de modelos podem ser significativamente dispendiosos, uma vez que, para cada cenário, é preciso executar um estudo de fluxo de potência. Além disso, por se basear em eventos aleatórios, o modelo probabilístico torna-se incapaz de representar integralmente todas as possibilidades.

Por isso, técnicas que utilizam metodologias baseadas em *soft-computing* para representação de incertezas em estudos de fluxo de potência, alternativamente aos métodos

baseados em amostragem e estatística, têm sido apresentadas na literatura [4]. Os exemplos mais citados na literatura são a matemática intervalar, a aritmética *affine* e a lógica *fuzzy*.

A matemática intervalar é um método numérico simples, baseado em operações intervalares, desenvolvido na década de 90 [5]. Um método melhorado da matemática intervalar é conhecido como aritmética *affine*, em que as quantidades de interesse são representadas como combinações afins das variáveis que representam as fontes de incerteza ou aproximações, em uma análise numérica de auto-validação [4]. Na modelagem baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*, os parâmetros sujeitos às incertezas são considerados como números *fuzzy* e os resultados são obtidos como distribuições de possibilidade.

Neste sentido, a proposta deste trabalho é desenvolver estratégias aproximadas e confiáveis de análise de incertezas em estudos de fluxo de potência, a fim de se obter resultados satisfatórios de maneira rápida e eficiente.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

Publicações recentes na área de estudo de fluxo de potência considerando incertezas nos dados de entrada merecem destaque.

Referência [4] apresenta uma metodologia baseada em aritmética *affine* para análise de fluxo de potência na presença de incerteza de dados. A aritmética *affine* é um modelo de análise numérica auto-validada em que as quantidades de interesse são representadas como combinações afins de variáveis primitivas que representam as incertezas dos dados ou aproximações realizadas durante o cálculo. Resultados para o sistema-teste IEEE de 57 barras são apresentados e comparados com aqueles obtidos via simulação de MC.

Referência [6] aborda a aritmética intervalar incorporada ao método de injeção de corrente para análise de fluxo de potência sob incertezas nos dados de carga e de linha, utilizando o método de Krawczyk para a solução do sistema de equações não-lineares intervalares. Resultados são apresentados e comparados com aqueles obtidos via simulação de MC, utilizando os sistemas-testes IEEE de 14 barras e de 300 barras e o sistema brasileiro da região sul-sudeste.

Referência [7] propõe um modelo de otimização baseado em aritmética intervalar para análise de fluxo de potência sob incertezas. Resultados para o sistema-teste IEEE de 57 barras são apresentados e comparados com aqueles obtidos via simulação de MC.

Referência [8] apresenta uma análise intervalar aplicada ao ponto de máximo carregamento de sistemas de energia elétrica, considerando incertezas nos dados de carga. O sistema de equações não-lineares é resolvido pelo método de Krawczyk. Sistema-teste

IEEE de 30 barras e sistema brasileiro sul-sudeste são usados para validar a metodologia proposta, também, comparando os resultados obtidos com a simulação de MC.

Referência [9] sugere a solução do fluxo de potência intervalar, em coordenadas cartesianas, através de um modelo de programação quadrática formulado a partir das equações de balanço de energia. Resultados para os sistemas-testes IEEE de 9 barras, 30 barras, 57 barras e 118 barras são comparados com aqueles obtidos via simulação de MC, a fim de validação.

Referência [10] sugere a aplicação de um método de aproximação estocástica para resolver o problema ótimo de despacho de potência sob incerteza de carga, utilizando um modelo mais realista para cargas aleatórias. Simulações são realizadas com sistema-teste IEEE de 30 barras e os resultados são comparados com a simulação de MC.

Referência [11] apresenta um processo de inicialização, a ser utilizado no fluxo de potência intervalar por injeção de corrente, no ponto de máximo carregamento, considerando incertezas nos dados de carga e linha. Resultados são apresentados e comparados com aqueles obtidos via simulação de MC, utilizando o sistema brasileiro da região sul-sudeste.

Referência [12] propõe um método baseado na expansão da série de Taylor aplicada às equações do fluxo de potência, expressas em termos das coordenadas retangulares das tensões nas barras, para solução de fluxo de potência intervalar. O modelo matemático intervalar é, primeiramente, estabelecido e a solução das equações algébricas não-lineares com variáveis intervalares é transformada na solução de três conjuntos de equações. Para verificar a eficiência da metodologia proposta, os sistemas-testes IEEE de 9 barras e de 57 barras são utilizados e os resultados são comparados com aqueles gerados pela simulação de MC e pela matemática intervalar.

Referência [13] propõe uma estrutura, baseada em aritmética *affine*, para soluções intervalares de fluxo de potência convencional e ótimo, considerando incertezas nos dados. A idéia principal consiste na formulação de um problema de programação matemática única e na identificação das formas afins que descrevem a incerteza dos dados, por meio de uma técnica de processamento de sinais. Resultados para os sistemas-testes IEEE de 30 barras, 57 barras e 118 barras são comparados com aqueles obtidos via simulação de MC e via métodos *affine* propostos em [4] e em [7], a fim de validação.

Referência [14] apresenta um método de análise de fluxo de potência intervalar retangular e um método misto de análise de fluxo de potência intervalar polar e retangular, baseado em aritmética *affine*. Como nenhuma aproximação é realizada, o método retangular obtém intervalos mais estreitos de ângulo de fase e de fluxo de potência ativa, em relação ao método polar. No entanto, apresenta faixas mais largas do módulo da tensão. Portanto, o método misto é desenvolvido no intuito de melhorar os resultados entre a análise do

fluxo de potência polar e retangular. Resultados para os sistemas-testes IEEE de 30 barras e de 118 barras são mostrados e comparados com aqueles gerados via simulação de MC e método *affine* polar, apresentado em [4].

Análise de incertezas em sistemas elétricos tem sido pesquisada em diferentes áreas, como abordam as publicações a seguir.

Referência [15] apresenta uma abordagem difusa da simulação de MC para o cálculo de dois índices de confiabilidade de sistemas de energia, considerando incertezas nos dados de entrada. Para obter resultados mais realistas, os dados de falha (tempo de reparo e taxa de falha) dos elementos possuem incerteza. O sistema-teste IEEE de 14 barras é utilizado para avaliar a eficácia do método apresentado.

Referência [16] aborda a compensação de potência reativa para controlar a tensão na presença de incertezas em redes de distribuição. Uma abordagem probabilística é adotada, considerando equações linearizadas para modelar o sistema de distribuição. Resultados são obtidos com o sistema-teste de distribuição IEEE de 13 barras.

Referência [17] propõe um planejamento de compensação dinâmica de potência reativa para melhorar o nível de estabilidade de tensão de curto prazo sob incertezas, incluindo o nível de carga de pico, a proporção máxima de carga dinâmica, o tempo de eliminação de falhas e o desvio da capacidade real da capacidade nominal de compensadores VAR dinâmicos durante contingências. O problema de planejamento VAR dinâmico é formulado como um modelo de otimização multiobjetivo que inclui o custo de investimento, a expectativa e a robustez do nível de estabilidade de tensão de curto prazo. Simulações são realizadas com o sistema-teste IEEE de 39 barras.

Referência [18] sugere um método de análise de incertezas para estudo de faltas assimétricas, através de matemática intervalar e do método de Krawczyk para a solução do sistema de equações lineares intervalares. Resultados obtidos pelo método proposto, utilizando o sistema-teste IEEE de 14 barras e o brasileiro de 1768 barras, são comparados com os obtidos via simulação de MC.

Em relação a energias renováveis, as seguintes publicações podem ser destacadas.

Referência [19] apresenta um método, baseado em aritmética *affine*, para resolver o problema do fluxo de potência ótimo, considerando os dados de geração sob incertezas. O método é utilizado para determinar as margens operacionais dos geradores térmicos em sistemas com geração eólica e solar. Os resultados são apresentados para o sistema-teste IEEE de 30 barras e para o sistema europeu real de 1211 barras e são comparados com os intervalos gerados via simulação de MC.

Referência [20] propõe um modelo de fluxo de potência trifásico desequilibrado

com varredura *forward-backward*, baseado em aritmética complexa *affine*, para estudar os impactos de incertezas em sistemas desequilibrados de distribuição com geração eólica e solar. O método é avaliado no sistema-teste de distribuição IEEE de 13 barras modificado. Os resultados são comparados com aqueles da simulação de MC.

Referência [21] desenvolve um método probabilístico para resolver problemas de *unit commitment* incorporando incertezas devido à integração de energia renovável. O método apresentado baseia-se na solução do problema do despacho econômico, considerando a função de distribuição de probabilidade da potência de saída dos geradores térmicos, energia não suprida, excesso de eletricidade, custo de geração e reserva giratória.

Referência [22] aborda uma reconfiguração ótima de sistemas elétricos de distribuição para minimizar as perdas, considerando incertezas de carga e de geração eólica em sistemas de geração distribuída. Resultados são apresentados para os sistemas de 33 barras, 69 barras, 94 barras e 135 barras e são comparados com aqueles gerados pela simulação de MC.

Referência [23] apresenta um método, baseado em transformada *fuzzy* e redes neurais, para estudo de fluxo de potência probabilístico em microrredes, incluindo incertezas associadas a cargas, geração eólica e solar e veículos elétricos híbridos. Simulações são realizadas para validação do método proposto, utilizando sistemas de 6 barras, IEEE de 14 barras e IEEE de 118 barras modificados.

Referência [24] sugere uma análise de fluxo de potência probabilístico trifásico para sistemas de transmissão, baseada no método de estimativa de pontos, utilizando o modelo trifásico desequilibrado de gerador de indução para parque eólico. O método proposto é testado com o sistema IEEE de 118 barras modificado e os resultados são validados através da comparação com aqueles obtidos pela simulação de MC.

Referência [25] estuda um modelo estocástico multiobjetivo de despacho ótimo de potência reativa sob incertezas de carga e de geração de energia eólica. As funções objetivo consideradas são as perdas reais de energia e o custo de operação e manutenção dos parques eólicos. Resultados são obtidos com os sistemas-testes IEEE de 30 barras e de 118 barras.

Referência [26] apresenta um algoritmo, baseado em intervalos correlacionados, para cálculo de fluxo de potência em sistemas de distribuição, considerando incertezas de carga e de geração baseada em fontes renováveis. As correlações são geradas a partir de padrões históricos de variáveis de entrada e diretamente integradas ao algoritmo de fluxo de potência de distribuição *forward-backward*. Simulações são realizadas com sistemas de 6 barras e de 1003 barras e os resultados são verificados com a simulação de MC.

Referência [27] sugere um método de estudo de fluxo de potência intervalar, através

da aritmética *affine* de múltiplos estágios, para abordar o impacto da potência de saída e da incerteza de carga na solução do fluxo de potência de sistemas desequilibrados de geração distribuída. Resultados são apresentados para o sistema-teste de distribuição IEEE de 123 barras modificado e são comparados com aqueles obtidos pelos métodos aritmética *affine* e MC.

Referência [28] sugere um modelo para avaliação da margem de capacidade de transmissão de energia elétrica, de modo a quantificar o nível de segurança de transmissão com geração eólica incerta. O problema é modelado como uma programação linear inteira mista. Resultados são obtidos utilizando o sistema-teste IEEE de 31 barras.

Referência [29] aborda um modelo de fluxo de potência ótimo incorporando as incertezas da geração eólica e carga. As variáveis incertas são expressas em termos de intervalos limitados formando um conjunto poliédrico. O modelo proposto é validado usando os sistemas-testes IEEE de 300 barras e polônês de 2746 barras.

Referência [30] introduz um índice probabilístico de estabilidade de tensão para redes de distribuição radial com presença de geração eólica incerta. Este índice identifica o barramento mais sensível ao colapso de tensão. Incertezas de demanda de carga, também, são levadas em consideração no cálculo do índice. A metodologia proposta é aplicada aos sistemas-testes de distribuição radial IEEE de 33 barras e de 69 barras.

Referência [31] propõe uma solução de fluxo de potência ótimo considerando as incertezas presentes na geração eólica e nos parâmetros da rede. Um algoritmo aprimorado de otimização, baseado em enxame de partículas, é utilizado na solução desse problema. O método proposto é aplicado no sistema-teste IEEE de 30 barras e em um sistema real de 183 barras.

Referência [32] apresenta um modelo de fluxo de potência harmônico trifásico, baseado em aritmética complexa *affine*, para rastrear as contribuições harmônicas de gerações distribuídas individuais em sistemas de distribuição. Resultados são apresentados para o sistema-teste de distribuição IEEE de 33 barras.

Referência [33] propõe um método de gerenciamento em tempo real para uma microrrede, considerando gerações renováveis incertas e diferentes escalas de tempo. Um modelo de otimização dinâmica, baseado em controle preditivo, é aplicado para minimizar o custo da operação e manter o balanço de energia, considerando as incertezas impostas pelos lados da oferta e da demanda em uma microrrede.

1.3 MOTIVAÇÃO

Na análise convencional de fluxo de potência, os parâmetros das linhas e cargas são considerados sempre constantes e precisos, sendo tratados como variáveis determinísticas. Desse modo, as tensões nas barras e os fluxos de potência, assim como as perdas, nas linhas são calculados como valores únicos para um dado perfil de geração e carga. No entanto, muitas incertezas estão associadas aos dados dos sistemas de potência. Por exemplo, as cargas são fornecidas por dispositivos de medição, frequentemente, imprecisos. Além disso, tanto as cargas como as impedâncias das linhas variam ao longo do tempo.

A partir dessas informações, é possível observar que os resultados do fluxo de potência determinístico não condizem com a realidade do sistema. Neste caso, os dados dos sistemas, mais realistas, são representados por faixas de valores possíveis, isto é, intervalos.

Uma alternativa de solução do fluxo de potência intervalar é a simulação de Monte Carlo, na qual um conjunto vasto de amostras é analisado, na tentativa de abranger o maior número de combinações possíveis. Isso, contudo, requer elevado tempo de processamento computacional, não sendo viável em tomadas de decisão em curto prazo. É mais eficiente, portanto, incluir o efeito das incertezas na solução do fluxo de potência. Os métodos mais citados na literatura são a matemática intervalar, matemática *affine* e a lógica *fuzzy*.

Assim, a motivação deste trabalho constitui-se na busca de novos métodos, mais simples e confiáveis, de análise de fluxo de potência intervalar, para contribuir com a literatura já existente.

1.4 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é propor dois modelos aproximados para análise de fluxo de potência polar intervalar, sujeito a pequenas incertezas associadas aos parâmetros de linha e de carga. Além disso, após o desenvolvimento dos modelos, avaliar os resultados. Os métodos são baseados em duas estratégias de compensação formuladas a partir da adaptação de métodos já existentes na literatura: o método de montagem direta da matriz impedância de barras e o Teorema da Compensação. Ambas as linhas e as cargas são modeladas como ramos. Todos os testes e simulações são desenvolvidos em Matlab. Os sistemas-testes utilizados são: brasileiro de 33 barras, IEEE de 57 barras e brasileiro de 107 barras. Os resultados são comparados com aqueles obtidos via simulação de MC, para validação dos desenvolvimentos apresentados.

1.5 PUBLICAÇÕES

Em decorrência deste trabalho de mestrado, o seguinte artigo foi submetido e aprovado:

MEDEIROS, B. S.; DA COSTA, V. M. Análise de Incertezas em Estudos de Fluxo de Potência via Métodos de Compensação. In: *Congresso Brasileiro de Automática*, 2018.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos e um anexo, os quais serão descritos resumidamente a seguir.

O Capítulo 2 apresenta as duas metodologias existentes na literatura, posteriormente adaptadas para o objetivo deste trabalho. O primeiro método refere-se à montagem direta da matriz impedância de barras Z_{barra} . O segundo método, denominado Teorema da Compensação, refere-se a uma análise de sensibilidade para verificar como a variação na admitância de um ramo de uma rede elétrica afeta as tensões e correntes. Para cada método, um exemplo numérico é apresentado, para facilitar o entendimento.

O Capítulo 3 apresenta as duas estratégias propostas de análise de incertezas em estudo de fluxo de potência, denominadas Compensação da Matriz Impedância de Barras e Compensação de Correntes, desenvolvidas com base nas metodologias apresentadas no Capítulo 2. Há, também, o desenvolvimento de um exemplo numérico.

O Capítulo 4 apresenta os resultados do algoritmo desenvolvido em Matlab aplicado aos sistemas-testes brasileiro de 33 barras, IEEE de 57 barras e brasileiro de 107 barras. São apresentados, também, os resultados da simulação de MC, a fim de comparação para validação dos métodos propostos.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão deste trabalho, em relação aos resultados obtidos, e a proposição de assuntos para trabalhos futuros.

Por fim, este trabalho apresenta um anexo, onde estão apresentados todos os dados determinísticos de barra e de linha dos sistemas em regime permanente.

2 METODOLOGIAS TRADICIONAIS

Para o desenvolvimento das técnicas propostas de análise de fluxo de potência sujeito às incertezas nos parâmetros de linha e de carga, dois métodos, já existentes na literatura, servem como base: o método de montagem direta da matriz impedância de barras, Z_{barra} , apresentado em [34] e [35], e o método de análise de sensibilidade através do Teorema da Compensação, apresentado em [36].

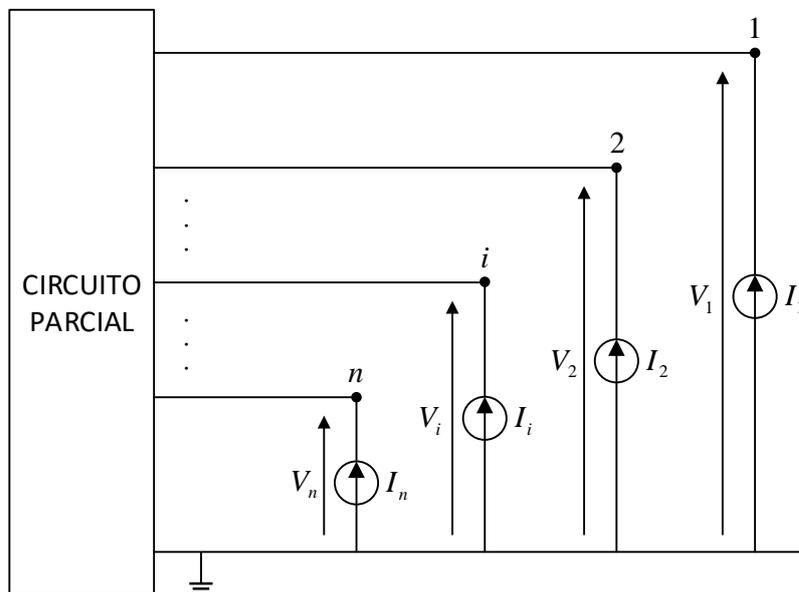
Ambos os métodos abordam, com enfoques diferentes, a variação na topologia de sistemas elétricos.

2.1 MONTAGEM DIRETA DA MATRIZ IMPEDÂNCIA DE BARRAS

A referência [34] e [35] sugerem a montagem direta da matriz impedância de barras, Z_{barra} , utilizando, uma a uma, cada impedância de ramo que compõe a topologia do sistema elétrico, ao invés de recorrer à inversão da matriz admitância de barras, Y_{barra} . De maneira análoga, quando se deseja inserir um ramo em um sistema existente, é possível alterar a matriz impedância de barras. Esta técnica é descrita a seguir, para cada ramo a ser inserido.

Seja a representação de um circuito parcial com n nós mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Representação de um sistema elétrico genérico.



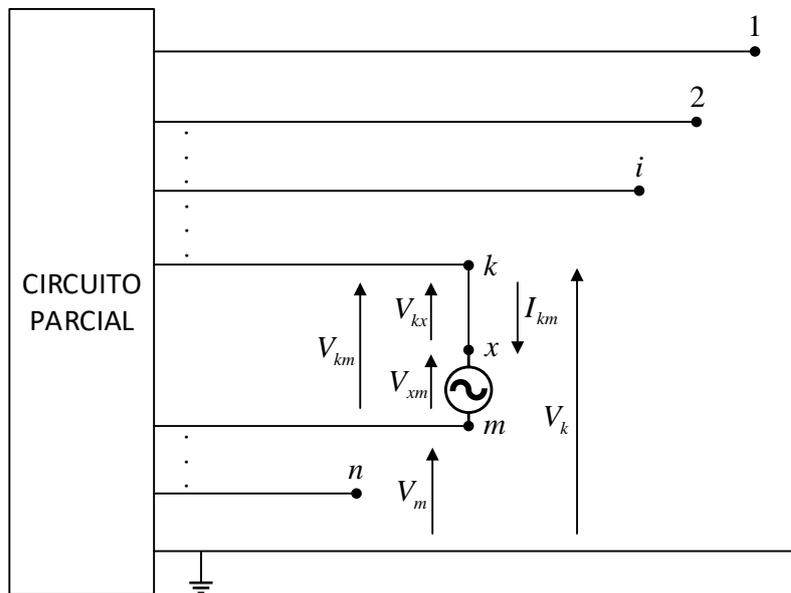
Logo, as tensões nodais deste sistema são obtidas a partir do sistema de equações (2.1).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_i \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2i} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Z_{i1} & Z_{i2} & \cdots & Z_{ii} & \cdots & Z_{in} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_i \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

em que \dot{V}_i e \dot{I}_i são, respectivamente, os fasores tensão na barra i e corrente injetada na barra i , para todo $i = 1, 2, \dots, n$, e Z_{ij} são os elementos da matriz impedância de barras, para todo $i, j = 1, 2, \dots, n$.

A técnica utilizada para a inserção de um ramo $k - m$, de acordo com [34] e [35], consiste em inserir uma fonte de tensão de magnitude V_{xm} em série com o novo ramo $k - x$, conforme ilustrado pela Figura 2.

Figura 2 – Estratégia para a adição de um ramo entre dois nós do sistema.



Dessa forma, ocorre o aparecimento temporário de um nó fictício x , a ser posteriormente eliminado, e a matriz impedância de barras torna-se a matriz $Z_{barra,aum}$ de ordem $(n + 1) \times (n + 1)$, com a inserção de uma linha e uma coluna adicionais, referentes ao nó

fictício, como mostra a equação (2.2).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_i \\ \vdots \\ \dot{V}_n \\ \hline \dot{V}_{xm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1n} & Z_{1x} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2i} & \cdots & Z_{2n} & Z_{2x} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ Z_{i1} & Z_{i2} & \cdots & Z_{ii} & \cdots & Z_{in} & Z_{ix} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & Z_{nn} & Z_{nx} \\ \hline Z_{x1} & Z_{x2} & \cdots & Z_{xi} & \cdots & Z_{xn} & Z_{xx} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_i \\ \vdots \\ \dot{I}_n \\ \hline \dot{I}_x \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

De acordo com [34], o ramo $k - x$ pode estar acoplado magneticamente com um ou mais elementos do circuito parcial. Para simplificar, sem, contudo, perder a generalidade, suponha-se que haja acoplamentos com os ramos genéricos $\alpha - \beta$ e $\gamma - \eta$, pertencentes ao circuito parcial, e que estes acoplamentos ocorrem com a mesma polaridade, ou seja, o sentido da corrente que flui em cada ramo que se acopla é o mesmo. Assim:

$$\begin{cases} \dot{V}_{kx} = z_{kx} \dot{I}_{kx} + z_{kx,\alpha\beta} \dot{I}_{\alpha\beta} + z_{kx,\gamma\eta} \dot{I}_{\gamma\eta} \\ \dot{V}_{\alpha\beta} = z_{\alpha\beta,kx} \dot{I}_{kx} + z_{\alpha\beta} \dot{I}_{\alpha\beta} + z_{\alpha\beta,\gamma\eta} \dot{I}_{\gamma\eta} \\ \dot{V}_{\gamma\eta} = z_{\gamma\eta,kx} \dot{I}_{kx} + z_{\gamma\eta,\alpha\beta} \dot{I}_{\alpha\beta} + z_{\gamma\eta} \dot{I}_{\gamma\eta} \end{cases} \quad (2.3)$$

em que z_{kx} , $z_{\alpha\beta}$ e $z_{\gamma\eta}$ são as impedâncias próprias dos ramos $k - x$, $\alpha - \beta$ e $\gamma - \eta$, respectivamente. As outras impedâncias referem-se às mútuas entre os mesmos ramos.

Em termos de admitâncias e na forma matricial, a equação (2.3) pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{kx} \\ \dot{I}_{\alpha\beta} \\ \dot{I}_{\gamma\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{kx} & y_{kx,\alpha\beta} & y_{kx,\gamma\eta} \\ y_{\alpha\beta,kx} & y_{\alpha\beta} & y_{\alpha\beta,\gamma\eta} \\ y_{\gamma\eta,kx} & y_{\gamma\eta,\alpha\beta} & y_{\gamma\eta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{kx} \\ \dot{V}_{\alpha\beta} \\ \dot{V}_{\gamma\eta} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

em que y_{kx} , $y_{\alpha\beta}$ e $y_{\gamma\eta}$ são as admitâncias próprias dos ramos $k - x$, $\alpha - \beta$ e $\gamma - \eta$, respectivamente. As outras admitâncias referem-se às mútuas entre os mesmos ramos.

Sendo o circuito em estudo constituído apenas por elementos passivos, então $Z_{xi} = Z_{ix}$ para todo $i = 1, 2, \dots, n$ e $i \neq x$. Então, da Figura 2:

$$\dot{V}_k = \dot{V}_m + \dot{V}_{xm} + \dot{V}_{kx} \quad (2.5)$$

ou ainda,

$$\dot{V}_{xm} = \dot{V}_k - \dot{V}_m - \dot{V}_{kx} \quad (2.6)$$

em que $\dot{V}_{xm} = \dot{V}_x - \dot{V}_m$.

A equação (2.6) é genérica e válida para qualquer valor de corrente \dot{I}_{km} . Por questão de simplicidade, portanto, seja $\dot{I}_{km} = 0$. Se $\dot{I}_{kx} = \dot{I}_{km}$, então $\dot{I}_{kx} = 0$. Da equação (2.4):

$$y_{kx}\dot{V}_{kx} + y_{kx,\alpha\beta}\dot{V}_{\alpha\beta} + y_{kx,\gamma\eta}\dot{V}_{\gamma\eta} = 0 \quad (2.7)$$

Manipulando a equação (2.7) em função de \dot{V}_{kx} :

$$\dot{V}_{kx} = \frac{-y_{kx,\alpha\beta}\dot{V}_{\alpha\beta} - y_{kx,\gamma\eta}\dot{V}_{\gamma\eta}}{y_{kx}} \quad (2.8)$$

Reescrevendo a equação (2.8) em notação matricial:

$$\dot{V}_{kx} = -\frac{\begin{bmatrix} y_{kx,\alpha\beta} & y_{kx,\gamma\eta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{\alpha} - \dot{V}_{\beta} \\ \dot{V}_{\gamma} - \dot{V}_{\eta} \end{bmatrix}}{y_{kx}} \quad (2.9)$$

Uma vez que a fonte é fictícia, sua magnitude pode ser considerada nula, ou seja, $V_{xm} = 0$. Então:

$$\begin{cases} y_{kx} = y_{km} \\ y_{kx,\alpha\beta} = y_{km,\alpha\beta} \\ y_{kx,\gamma\eta} = y_{km,\gamma\eta} \end{cases} \quad (2.10)$$

Substituindo (2.10) em (2.9):

$$\dot{V}_{kx} = -\frac{\begin{bmatrix} y_{km,\alpha\beta} & y_{km,\gamma\eta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{\alpha} - \dot{V}_{\beta} \\ \dot{V}_{\gamma} - \dot{V}_{\eta} \end{bmatrix}}{y_{km}} \quad (2.11)$$

Com o objetivo de calcular as impedâncias referentes à barra x da matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra,aum}}$ da equação (2.2), ou seja, Z_{xi} e Z_{ix} , uma corrente de 1 p.u. é injetada em uma barra genérica i e todas as correntes injetadas em outras barras são nulas. Portanto:

$$\begin{cases} \dot{V}_k = Z_{ki} \\ \dot{V}_{xm} = Z_{xi} \\ \dot{V}_{\alpha} = Z_{\alpha i} \\ \dot{V}_{\beta} = Z_{\beta i} \\ \dot{V}_{\gamma} = Z_{\gamma i} \\ \dot{V}_{\eta} = Z_{\eta i} \end{cases} \quad (2.12)$$

A substituição de (2.11) e (2.12) em (2.6) resulta na expressão para o cálculo dos elementos Z_{xi} da nova matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra,aum}}$:

$$Z_{xi} = Z_{ki} - Z_{mi} + \frac{\begin{bmatrix} y_{km,\alpha\beta} & y_{km,\gamma\eta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{\alpha i} - Z_{\beta i} \\ Z_{\gamma i} - Z_{\eta i} \end{bmatrix}}{y_{km}} \quad (2.13)$$

para todo $i = 1, 2, \dots, n$ e $i \neq x$.

Da mesma forma, para calcular o elemento Z_{xx} da matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra,aum}}$ da equação (2.2), uma corrente de 1 *p.u.* é injetada na barra x e todas as correntes injetadas nas outras barras são nulas. Então:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_k = Z_{kx} \\ \dot{V}_m = Z_{mx} \\ \dot{V}_\alpha = Z_{\alpha x} \\ \dot{V}_\beta = Z_{\beta x} \\ \dot{V}_\gamma = Z_{\gamma x} \\ \dot{V}_\eta = Z_{\eta x} \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Além disso, da Figura 2:

$$\dot{I}_{km} = -\dot{I}_{kx} = -1 \quad (2.15)$$

Substituindo (2.15) em (2.4):

$$y_{kx} \dot{V}_{kx} + y_{kx,\alpha\beta} \dot{V}_{\alpha\beta} + y_{kx,\gamma\eta} \dot{V}_{\gamma\eta} = -1 \quad (2.16)$$

Manipulando a equação (2.16) em função de V_{kx} e já considerando as relações de (2.10):

$$\dot{V}_{kx} = \frac{-1 - y_{km,\alpha\beta} \dot{V}_{\alpha\beta} - y_{km,\gamma\eta} \dot{V}_{\gamma\eta}}{y_{km}} \quad (2.17)$$

Reescrevendo a equação (2.17) em notação matricial:

$$\dot{V}_{kx} = \frac{1 + \begin{bmatrix} y_{km,\alpha\beta} & y_{km,\gamma\eta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_\alpha - \dot{V}_\beta \\ \dot{V}_\gamma - \dot{V}_\eta \end{bmatrix}}{y_{km}} \quad (2.18)$$

A substituição de (2.14) e (2.18) em (2.6) resulta na expressão para o cálculo do elemento Z_{xx} da nova matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra,aum}}$:

$$Z_{xx} = Z_{kx} - Z_{mx} + \frac{1 + \begin{bmatrix} y_{km,\alpha\beta} & y_{km,\gamma\eta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{\alpha x} - Z_{\beta x} \\ Z_{\gamma x} - Z_{\eta x} \end{bmatrix}}{y_{km}} \quad (2.19)$$

Caso não haja acoplamento mútuo entre o elemento a ser inserido, ramo $k - m$, e os elementos do circuito parcial, as equações (2.13) e (2.19) podem ser simplificadas como segue:

$$Z_{xi} = Z_{ki} - Z_{mi} \quad (2.20)$$

para todo $i = 1, 2, \dots, n$ e $i \neq x$.

$$Z_{xx} = Z_{kx} - Z_{mx} + z_{km} \quad (2.21)$$

em que z_{km} é a impedância própria do ramo a ser inserido $k - m$.

Além disso, se o nó m é a referência de tensão do sistema, ou seja, se o elemento a ser inserido é uma carga, então:

$$Z_{xi} = Z_{ki} \quad (2.22)$$

para todo $i = 1, 2, \dots, n$ e $i \neq x$.

$$Z_{xx} = Z_{kx} + z_{km} \quad (2.23)$$

Por fim, para calcular a nova matriz \mathbf{Z}_{barra} do sistema em estudo, sendo a matriz $\mathbf{Z}_{barra,aum}$ completamente conhecida, é preciso eliminar o nó fictício x . Como $V_{xm} = 0$, da equação (2.2):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_i \\ \vdots \\ \dot{V}_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & \cdots & Z_{1n} & Z_{1x} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2i} & \cdots & \cdots & Z_{2n} & Z_{2x} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ Z_{i1} & Z_{i2} & \cdots & Z_{ii} & \cdots & \cdots & Z_{in} & Z_{ix} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & \cdots & Z_{nn} & Z_{nx} \\ Z_{x1} & Z_{x2} & \cdots & Z_{xi} & \cdots & \cdots & Z_{xn} & Z_{xx} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_i \\ \vdots \\ \dot{I}_n \\ \dot{I}_x \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Neste caso, resolvendo o sistema da equação (2.24), cada elemento da nova matriz \mathbf{Z}_{barra} , atualizada com a inserção do ramo $k - m$, é dado pela redução de *Kron*. A redução de *Kron* é apresentada em [37] e é realizada como segue:

$$Z_{ij,novo} = Z_{ij} - \frac{Z_{ix} \cdot Z_{xj}}{Z_{xx}} \quad (2.25)$$

em que $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Para o caso de alterações múltiplas, isto é, inserção de mais de um ramo, todo o procedimento deve ser repetido, para cada um dos ramos seguintes, a partir da matriz $\mathbf{Z}_{barra,atual}$ do desenvolvimento referente à alteração anterior.

2.1.1 Exemplo Numérico

Um exemplo numérico é apresentado a seguir para validar o método de montagem direta da matriz \mathbf{Z}_{barra} , descrito anteriormente.

Considere um sistema-exemplo constituído por 3 barras, extraído da referência [36], como mostra a Figura 3. Os dados de barra e de linha em regime permanente encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2. Tais dados são resultantes do fluxo de potência determinístico do caso base, executado com tolerância para convergência de $\epsilon = 10^{-6}$ p.u..

Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema-exemplo de 3 barras.

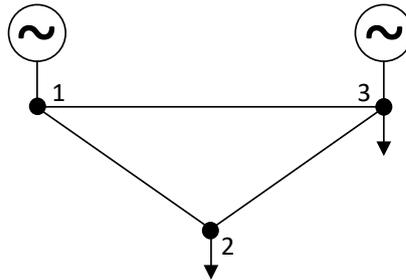


Tabela 1 – Dados de barra do sistema 3 barras

Barra	Tipo ¹	Módulo da Tensão (p.u.)	Ângulo de Fase (°)	Potência Ativa (p.u.)	Potência Reativa (p.u.)
1	2	1,00	0,00	0,2033	-0,0086
2	0	0,9828	-6,6049	-0,5	-0,02
3	1	0,98	-10,3622	-0,15	-0,0163

Tabela 2 – Dados de linha do sistema 3 barras

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Shunt (p.u.)
1	1	2	0,1	1,00	0,01
2	1	3	0,2	2,00	0,02
3	2	3	0,1	1,00	0,01

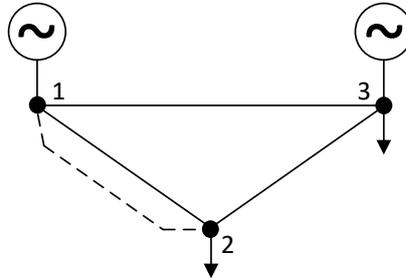
A matriz impedância de barras deste sistema é:

$$\mathbf{Z}_0 = \begin{bmatrix} 0,0289 - 12,2147j & -0,0095 - 12,5945j & -0,0226 - 12,7223j \\ -0,0095 - 12,5945j & 0,0286 - 12,2166j & -0,0095 - 12,5945j \\ -0,0226 - 12,7223j & -0,0095 - 12,5945j & 0,0289 - 12,2147j \end{bmatrix} p.u.$$

¹ Os tipos das barras são definidos como: 0 correspondente ao tipo PQ; 1 correspondente ao tipo PV e 2 correspondente ao tipo V θ .

Um novo ramo deve ser inserido entre os terminais do ramo 1 - 2, cuja impedância é $z_{12} = 0,2 + 1,5j$ p.u., como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Diagrama unifilar do sistema-exemplo de 3 barras com a inserção de uma linha.



Com a inserção desse novo ramo, como na equação (2.2), a matriz impedância de barras aumentada é expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{Z}_{\text{barra,aum}} = \left[\begin{array}{ccc|c} 0,0289 - 12,2147j & -0,0095 - 12,5945j & -0,0226 - 12,7223j & Z_{1x} \\ -0,0095 - 12,5945j & 0,0286 - 12,2166j & -0,0095 - 12,5945j & Z_{2x} \\ -0,0226 - 12,7223j & -0,0095 - 12,5945j & 0,0289 - 12,2147j & Z_{3x} \\ \hline & Z_{x1} & Z_{x2} & Z_{x3} \\ & & & Z_{xx} \end{array} \right]$$

Portanto, para o cálculo dos elementos adicionais da matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra,aum}}$, as equações (2.20) e (2.21) são utilizadas, sendo $k = 1$ e $m = 2$. De acordo com a equação (2.20), os elementos Z_{xi} são dados por:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{x1} = Z_{11} - Z_{21} = 0,0289 - 12,2147j - (-0,0095 - 12,5945j) = 0,0385 + 0,3797j \text{ p.u.} \\ Z_{x2} = Z_{12} - Z_{22} = -0,0095 - 12,5945j - (0,0286 - 12,2166j) = -0,0381 - 0,3778j \text{ p.u.} \\ Z_{x3} = Z_{13} - Z_{23} = -0,0226 - 12,7223j - (-0,0095 - 12,5945j) = -0,0131 - 0,1278j \text{ p.u.} \end{array} \right.$$

E, de acordo com a equação (2.21), o elemento Z_{xx} é dado por:

$$\begin{aligned} Z_{xx} &= Z_{1x} - Z_{2x} + z_{12} \\ &= 0,0385 + 0,3797j - (-0,0381 - 0,3778j) + 0,2 + 1,5j \\ &= 0,2765 + 2,2575j \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Logo, a matriz impedância de barras aumentada é:

$$\mathbf{Z}_{\text{barra,aum}} = \left[\begin{array}{ccc|c} 0,0289 - 12,2147j & -0,0095 - 12,5945j & -0,0226 - 12,7223j & 0,0385 + 0,3797j \\ -0,0095 - 12,5945j & 0,0286 - 12,2166j & -0,0095 - 12,5945j & -0,0381 - 0,3778j \\ -0,0226 - 12,7223j & -0,0095 - 12,5945j & 0,0289 - 12,2147j & -0,0131 - 0,1278j \\ \hline 0,0385 + 0,3797j & -0,0381 - 0,3778j & -0,0131 - 0,1278j & 0,2765 + 2,2575j \end{array} \right] \text{ p.u.}$$

Aplicando a redução de *Kron*, equação (2.25), a nova matriz impedância de barras, atualizada com o ramo inserido, é dada por:

$$\mathbf{Z}_{\text{barra,atual}} = \begin{bmatrix} 0,0238 - 12,2786j & -0,0045 - 12,5309j & -0,0209 - 12,7008j \\ -0,0045 - 12,5309j & 0,0236 - 12,2798j & -0,0112 - 12,6158j \\ -0,0209 - 12,7008j & -0,0112 - 12,6158j & 0,0283 - 12,2220j \end{bmatrix} p.u.$$

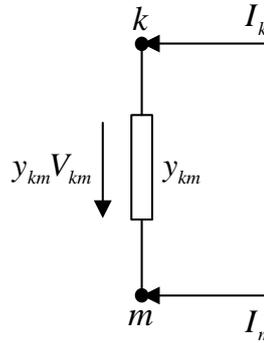
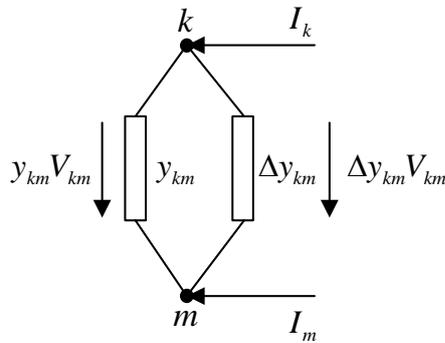
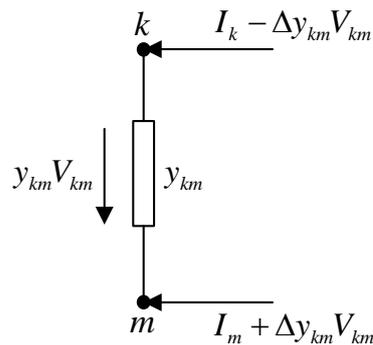
Para conferir o resultado, o ramo $1 - 2$, de impedância $z_{12} = 0,2 + 1,5j p.u.$, é inserido manualmente nos dados de linha do sistema e a matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ é calculada a partir da inversa da matriz admitância de barras, $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$, como é feito usualmente. O resultado encontrado é exatamente igual ao anterior, garantindo validade ao método de montagem direta da matriz impedância de barras. O mesmo raciocínio pode ser aplicado para inserção de mais de um ramo.

2.2 TEOREMA DA COMPENSAÇÃO

A referência [36] propõe a análise de sensibilidade em redes de transmissão de energia para determinar como a inserção, a remoção ou a variação na admitância afeta a distribuição de correntes. O Teorema da Compensação, que é uma propriedade física das redes elétricas, é proposto como uma técnica de análise.

Segundo este teorema, a alteração na admitância de um ramo de uma rede elétrica tem o mesmo efeito que a ligação de uma fonte de corrente de intensidade conveniente nos nós terminais da admitância. Isto é, o efeito da alteração da admitância de um ramo pode ser compensado por uma fonte de corrente apropriada, conforme mostra a Figura 5. Esta técnica é descrita a seguir, já generalizada para alterações múltiplas.

Figura 5 – Teorema da Compensação.

(a) Situação inicial: $\underline{I}_0 = \mathbf{Y}_0 \cdot \underline{V}_0$.(b) Situação final: $\underline{I} = (\mathbf{Y}_0 + \Delta\mathbf{Y})\underline{V}$.(c) Situação final compensada:
 $\underline{I}_{comp} = \mathbf{Y}_0 \cdot \underline{V}$.

Seja uma rede inicial, de n barras, dada pela equação (2.26).

$$\underline{I}_0 = \mathbf{Y}_0 \cdot \underline{V}_0 \quad (2.26)$$

em que \underline{I}_0 , \mathbf{Y}_0 e \underline{V}_0 são, respectivamente, vetor de correntes injetadas nas barras, matriz

admitância de barras e vetor de tensões nodais do caso base.

Após a alteração da impedância do ramo $k - m$, o modelo do sistema passa a ser dado por (2.27).

$$\underline{I} = (\mathbf{Y}_0 + \Delta\mathbf{Y}) \underline{V} \quad (2.27)$$

em que \underline{I} e \underline{V} são, respectivamente, vetores de correntes injetadas e de tensões nodais após a alteração.

Por definição, supondo que serão feitas alterações em u ramos diferentes:

$$\Delta\mathbf{Y} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{M}^t \quad (2.28)$$

em que \mathbf{D} é uma matriz diagonal contendo as u impedâncias que devem ser inseridas para resultar na alteração dos u ramos. Ou seja:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} z_{k_1 m_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & z_{k_2 m_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & z_{k_u m_u} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

e \mathbf{M} é uma matriz incidência, cujos elementos são iguais a 1 nas barras k , iguais a -1 nas barras m e iguais a 0 nas demais barras e cuja dimensão é $n \times u$. Ou seja:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Caso a barra m seja a barra de referência, então o elemento referente a essa barra deve, também, ser igual a 0 .

Substituindo (2.28) em (2.27) e considerando a aproximação básica que consiste em igualar as correntes antes e depois da alteração de um ramo, ou seja, $\underline{I} = \underline{I}_0$, então:

$$\underline{V} = \left(\mathbf{Y}_0 + \mathbf{M} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{M}^t \right)^{-1} \underline{I}_0 \quad (2.31)$$

Utilizando o *Lema da Matriz Inversa*:

$$\left(\mathbf{Y}_0 + \mathbf{M} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{M}^t \right)^{-1} = \mathbf{Y}_0^{-1} - \mathbf{Y}_0^{-1} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{M}^t \cdot \mathbf{Y}_0^{-1} \quad (2.32)$$

em que, por definição:

$$\mathbf{C} = \left(\mathbf{D} + \mathbf{M}^t \cdot \mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{M} \right)^{-1} \quad (2.33)$$

Substituindo (2.32) em (2.31):

$$\underline{V} = \left(\mathbf{Y}_0^{-1} - \mathbf{Y}_0^{-1} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{M}^t \cdot \mathbf{Y}_0^{-1} \right) \underline{I}_0 \quad (2.34)$$

Portanto, da equação (2.34), as tensões são calculadas em função da matriz impedância de barras como segue:

$$\underline{V} = \mathbf{Z}_0 \left[(\mathbf{I}_d - \mathbf{M} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{M}^t \cdot \mathbf{Z}_0) \underline{I}_0 \right] \quad (2.35)$$

em que \mathbf{I}_d é uma matriz Identidade de ordem $n \times n$. O vetor de correntes compensadas é dado por:

$$\underline{I}_{comp} = \left(\mathbf{I}_d - \mathbf{M} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{M}^t \cdot \mathbf{Z}_0 \right) \underline{I}_0 \quad (2.36)$$

2.2.1 Exemplo Numérico

Um exemplo numérico é, também, realizado para validar o Teorema da Compensação, explicado anteriormente.

Considere, novamente, o sistema-exemplo de 3 barras, da referência [36], ilustrado pela Figura 3 e representado pelos dados de barra e de linha das Tabelas 1 e 2. Este sistema pode ser modelado pela equação (2.26), em que a matriz impedância de barras é \mathbf{Z}_0 , exposta na subseção 2.1.1, e o vetor correntes injetadas nas barras, resultante do fluxo de potência determinístico do caso base, é:

$$\underline{I}_0 = \begin{bmatrix} 0,2033 + 0,0086j \\ -0,0482 + 0,0260j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

A inserção de um ramo de impedância $z_{12} = 0,2 + 1,5j$ p.u., em paralelo ao ramo 1 - 2, resulta em uma variação nas correntes injetadas nas barras. O valor das correntes compensadas é fornecido pela equação (2.36) e o valor das novas tensões nodais é dado pela equação (2.35).

Para calcular tais elementos é preciso, primeiramente, definir o valor da matriz diagonal de impedâncias inseridas \mathbf{D} , através da equação (2.29), e da matriz incidência \mathbf{M} , através da equação (2.30). Considerando que apenas um ramo é inserido e que $k = 1$ e $m = 2$:

$$\mathbf{D} = [0,2 + 1,5j] p.u.$$

e

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Com as matrizes \mathbf{D} e \mathbf{M} definidas, a matriz \mathbf{C} é calculada através da equação (2.33):

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \left([0,2 + 1,5j] + [1 \quad -1 \quad 0] \cdot [\mathbf{Z}_0] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} \\ &= [0,0535 - 0,4364j] p.u. \end{aligned}$$

Então, da equação (2.36), o vetor de correntes compensadas é:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{comp} &= \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [0,0535 - 0,4364j] \cdot [1 \quad -1 \quad 0] \cdot [\mathbf{Z}_0] \right) \cdot \begin{bmatrix} 0,2033 + 0,0086j \\ -0,0482 + 0,0260j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0,1527 + 0,0129j \\ 0,0024 + 0,0217j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u. \end{aligned}$$

As novas tensões nodais são dadas pela equação (2.35):

$$\begin{aligned} \underline{V} &= \begin{bmatrix} 0,0289 - 12,2147j & -0,0095 - 12,5945j & -0,0226 - 12,7223j \\ -0,0095 - 12,5945j & 0,0286 - 12,2166j & -0,0095 - 12,5945j \\ -0,0226 - 12,7223j & -0,0095 - 12,5945j & 0,0289 - 12,2147j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,1527 + 0,0129j \\ 0,0024 + 0,0217j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0,9964 - 0,0190j \\ 0,9798 - 0,0941j \\ 0,9652 - 0,1699j \end{bmatrix} p.u. \end{aligned}$$

Para conferir o resultado, a matriz $\mathbf{Z}_{barra,atual}$ é multiplicada pelas correntes nodais \underline{I}_0 resultantes do fluxo de potência determinístico do caso base. O valor encontrado é exatamente igual ao anterior, garantindo validade ao Teorema da Compensação.

3 ALGORITMOS PROPOSTOS PARA ANÁLISE DE INCERTEZAS EM FLUXO DE POTÊNCIA

Neste trabalho, dois algoritmos de análise de fluxo de potência são propostos, considerando incertezas relacionadas aos parâmetros de linha e de carga. As incertezas referem-se, então, ao valor da impedância das linhas e ao valor da potência aparente das cargas.

Nos algoritmos desenvolvidos, no entanto, tanto as linhas como as cargas são tratadas como ramos. A linha é um ramo entre duas barras do sistema e a carga é um ramo entre uma barra do sistema e a referência de tensão. Portanto, ambas são representadas por impedâncias.

3.1 TRATAMENTO DAS INCERTEZAS

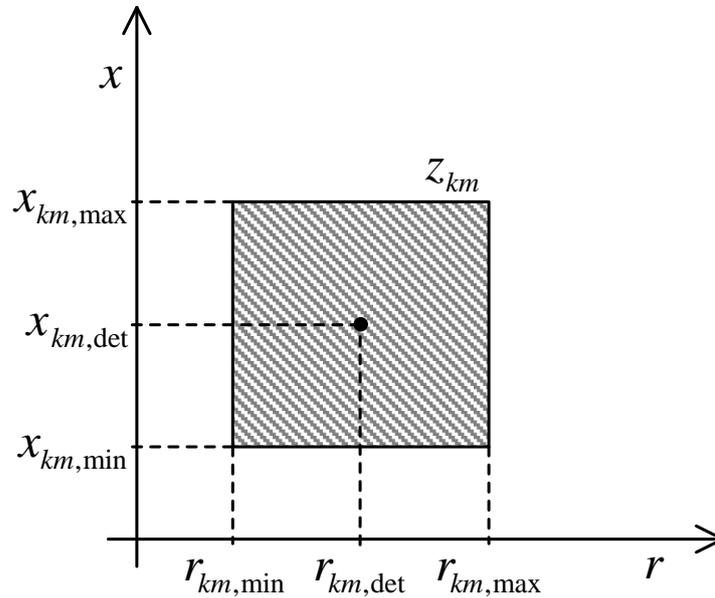
Considere um ramo genérico $k - m$. A impedância desse ramo é dada por:

$$z_{km} = r_{km} + x_{km}j \quad (3.1)$$

em que r_{km} é a resistência e x_{km} é a reatância do ramo.

As impedâncias dos ramos são grandezas complexas, como mostra a equação (3.1). Se tanto os dados de resistência como os de reatância estão sujeitos às incertezas, então esses parâmetros são números intervalares $r_{km} = (r_{km,min}, r_{km,max})$ e $x = (x_{km,min}, x_{km,max})$, em torno dos seus valores determinísticos $r_{km,det}$ e $x_{km,det}$. Portanto, a impedância intervalar, z_{km} , é representada por uma área retangular de valores possíveis, como na Figura 6.

Figura 6 – Representação gráfica da impedância intervalar de um ramo genérico $k - m$.



A impedância intervalar é, então, delimitada pelos seguintes pontos:

$$\begin{cases} z_{km,lim_1} = r_{km,min} + x_{km,min}j \\ z_{km,lim_2} = r_{km,max} + x_{km,min}j \\ z_{km,lim_3} = r_{km,min} + x_{km,max}j \\ z_{km,lim_4} = r_{km,max} + x_{km,max}j \end{cases} \quad (3.2)$$

Como indicado no Capítulo 2, uma alteração na impedância de um ramo genérico $k - m$, de impedância z_{km} , pode ser representada pela inserção de um novo ramo, de impedância $z_{km,inserido}$, entre os terminais k e m do sistema elétrico original, de modo que a associação em paralelo das impedâncias seja equivalente ao novo valor da impedância. Igualmente, as incertezas podem ser assim representadas.

Os limites de uma impedância intervalar, z_{km,lim_i} , são, portanto, calculados através da inserção de um novo ramo em paralelo ao ramo de impedância determinística $z_{km,det}$. A associação dos ramos em paralelo é dada por:

$$\frac{1}{z_{km,lim_i}} = \frac{1}{z_{km,inserido_i}} + \frac{1}{z_{km,det}} \quad (3.3)$$

em que z_{km,lim_i} é o valor de um dos limites $i = 1, 2, 3, 4$ do intervalo de impedância.

Portanto, a impedância do ramo a ser inserido para corresponder a cada um dos limites i é dada por:

$$z_{km,inserido_i} = \left(\frac{1}{z_{km,lim_i}} - \frac{1}{z_{km,det}} \right)^{-1} \quad (3.4)$$

Para ambos os algoritmos propostos, é necessário calcular as impedâncias dos ramos inseridos, $z_{km,inserido}$, que configuram os limites do intervalo das impedâncias dos ramos referentes às linhas e cargas sujeitas às incertezas. Esse procedimento está explicado a seguir:

- Linhas:

Considerando uma incerteza de $-A\%$ a $+B\%$ sobre ambas as resistência e reatância de uma linha genérica $k - m$, é possível encontrar os limites dos intervalos de r_{km} e x_{km} :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{km,min} = (100 - A)/100 \cdot r_{km,det} \\ r_{km,max} = (100 + B)/100 \cdot r_{km,det} \\ x_{km,min} = (100 - A)/100 \cdot x_{km,det} \\ x_{km,max} = (100 + B)/100 \cdot x_{km,det} \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Os valores de $z_{km,inserido}$, para incertezas nos parâmetros de linha, são facilmente encontrados, uma vez que os valores determinísticos de impedância, $z_{km,det}$, e os limites da impedância intervalar, z_{km,lim_i} , já são conhecidos.

Portanto, para cada linha sujeita às incertezas nos parâmetros, quatro impedâncias a serem inseridas, $z_{km,inserido_i}$, uma para cada z_{km,lim_i} , $i = 1, 2, 3, 4$, são calculadas através das equações (3.2) e (3.4).

- Cargas:

Já os parâmetros de carga são dados em relação à sua potência aparente, sendo necessário calcular $z_{km,inserido}$ referentes às cargas, conforme demonstrado a seguir.

Considere uma carga genérica, conectada à barra k , cuja potência aparente é dada por:

$$S_k = P_k + Q_k.j \quad (3.6)$$

em que P_k é a potência ativa e Q_k é a potência reativa da carga.

Tanto os dados de potência ativa como de potência reativa estão sujeitos às incertezas. Esses parâmetros são, portanto, números intervalares $P_k = (P_{k,min}, P_{k,max})$ e

$Q = (Q_{k,min}, Q_{k,max})$, em torno dos seus valores determinísticos $P_{k,det}$ e $Q_{k,det}$. Considerando uma incerteza de $-C\%$ a $+D\%$ sobre ambas as potências ativa e reativa de uma carga, é possível calcular os limites dos intervalos de P_k e Q_k da seguinte forma:

$$\begin{cases} P_{k,min} = (100 - C)/100 \cdot P_{k,det} \\ P_{k,max} = (100 + D)/100 \cdot P_{k,det} \\ Q_{k,min} = (100 - C)/100 \cdot Q_{k,det} \\ Q_{k,max} = (100 + D)/100 \cdot Q_{k,det} \end{cases} \quad (3.7)$$

Da análise de circuitos lineares, a potência aparente S de uma carga conectada em uma barra genérica k é dada por:

$$S_k = \dot{V}_k \cdot \dot{I}_k^* = V_k^2 \cdot y_k^* \quad (3.8)$$

em que V_k é a tensão de operação no caso base nos terminais da carga e y_k é a admitância correspondente. Ou seja:

$$y_k = \frac{S_k^*}{V_k^2} \quad (3.9)$$

Substituindo (3.6) em (3.9):

$$y_k = \frac{P_k - Q_k j}{V_k^2} \quad (3.10)$$

Portanto, sendo a admitância $y_k = g_k + b_k j$:

$$g_k = \frac{P_k}{V_k^2} \quad (3.11)$$

e

$$b_k = -\frac{Q_k}{V_k^2} \quad (3.12)$$

em que g_k é a condutância e b_k é a susceptância do ramo, referente à carga em estudo.

As expressões para a variação em condutância e em susceptância, a partir das incertezas sobre os dados de potência, são obtidas linearizando as equações (3.11) e (3.12):

$$\Delta g_k = -\left(\frac{2P_k}{V_k^3}\right) \Delta V_k + \left(\frac{1}{V_k^2}\right) \Delta P_k \quad (3.13)$$

e

$$\Delta b_k = \left(\frac{2Q_k}{V_k^3}\right) \Delta V_k - \left(\frac{1}{V_k^2}\right) \Delta Q_k \quad (3.14)$$

Uma vez que a variação em tensão é inicialmente desconhecida e consideravelmente pequena, pode ser desconsiderada do cálculo de Δg_k e Δb_k . Então:

$$\Delta g_k = \left(\frac{1}{V_k^2} \right) \Delta P_k \quad (3.15)$$

e

$$\Delta b_k = - \left(\frac{1}{V_k^2} \right) \Delta Q_k \quad (3.16)$$

Expressando ΔP_k e ΔQ_k em função dos valores mínimos, máximos e determinísticos:

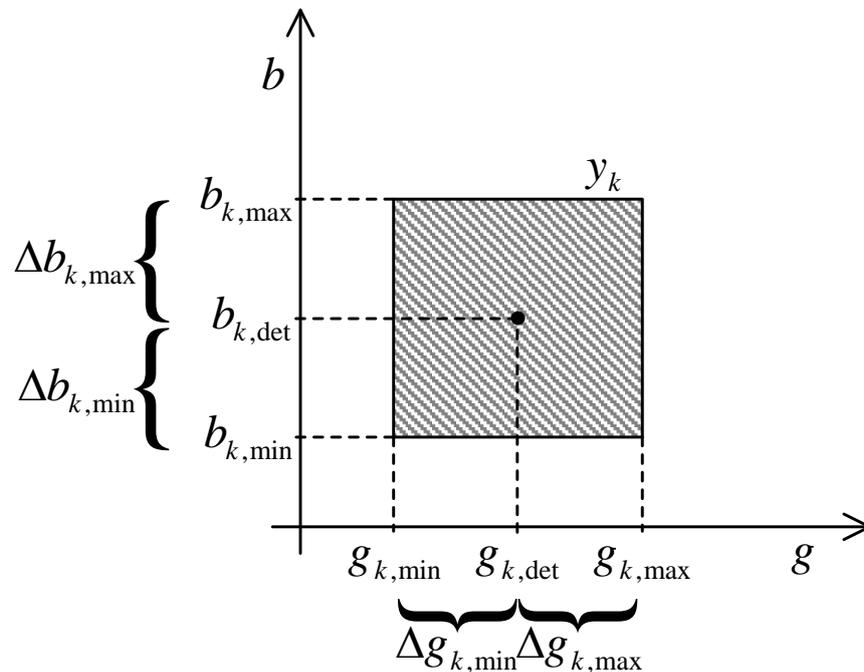
$$\begin{cases} \Delta g_{k,min} = \left(\frac{1}{V_k^2} \right) (P_{k,min} - P_{k,det}) \\ \Delta g_{k,max} = \left(\frac{1}{V_k^2} \right) (P_{k,max} - P_{k,det}) \end{cases} \quad (3.17)$$

e

$$\begin{cases} \Delta b_{k,min} = - \left(\frac{1}{V_k^2} \right) (Q_{k,min} - Q_{k,det}) \\ \Delta b_{k,max} = - \left(\frac{1}{V_k^2} \right) (Q_{k,max} - Q_{k,det}) \end{cases} \quad (3.18)$$

Assim como as impedâncias, as admitâncias são grandezas complexas. Logo, a admitância também é representada por uma área retangular, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Representação gráfica da admitância intervalar de uma carga genérica conectada à barra k .



A variação em admitância intervalar, Δy_k , é, então, delimitada pelos seguintes pontos:

$$\begin{cases} \Delta y_{k,lim_1} = \Delta g_{k,min} + \Delta b_{k,min}j \\ \Delta y_{k,lim_2} = \Delta g_{k,max} + \Delta b_{k,min}j \\ \Delta y_{k,lim_3} = \Delta g_{k,min} + \Delta b_{k,max}j \\ \Delta y_{k,lim_4} = \Delta g_{k,max} + \Delta b_{k,max}j \end{cases} \quad (3.19)$$

A equação (3.4) pode, também, ser reescrita em função de admitâncias, em que m é a referência de tensão do sistema:

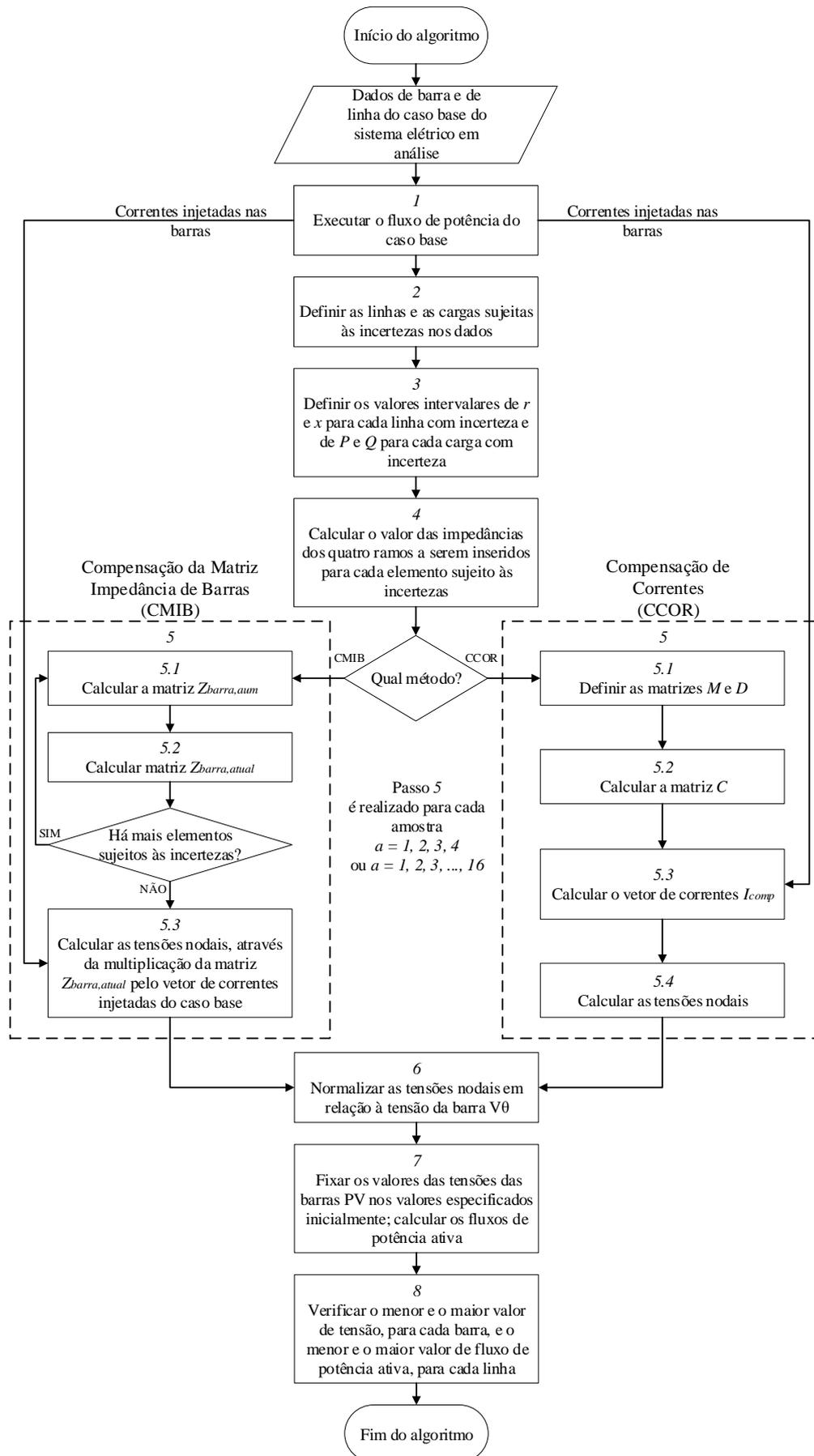
$$\begin{aligned} z_{k,inserido_i} &= (y_{k,lim_i} - y_{k,det})^{-1} \\ &= (\Delta y_{k,lim_i})^{-1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Portanto, para cada carga sujeita às incertezas nos parâmetros, quatro impedâncias a serem inseridas, $z_{k,inserido_i}$, uma para cada $\Delta y_{k,lim_i}$, $i = 1, 2, 3, 4$, são calculadas através das equações (3.19) e (3.20).

3.2 DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS

Os algoritmos propostos são descritos pelo fluxograma da Figura 8. O algoritmo à esquerda é baseado no método de montagem direta da matriz impedância de barras, explicado na seção 2.1, denominado Compensação da Matriz Impedância de Barras (CMIB). O algoritmo à direita é baseado no Teorema da Compensação, explicado na seção 2.2, denominado Compensação de Correntes (CCOR).

Figura 8 – Fluxograma dos algoritmos propostos para análise do fluxo de potência intervalar.



Inicialmente, para ambos os algoritmos, os dados de barra e de linha do sistema elétrico em estudo são adquiridos.

Os passos de 1 a 4 e de 6 a 8, também, são comuns a ambos os métodos. Os passos estão descritos a seguir.

O passo 1 refere-se à execução da análise do fluxo de potência do caso base, obtendo como resultado as tensões e as correntes injetadas nas barras do sistema determinístico. O vetor de correntes injetadas nas barras, resultante do fluxo de potência do caso base, será utilizado no passo 5, referente ao cálculo das tensões nodais intervalares.

O passo 2 refere-se à definição das linhas e barras que possuem incertezas de dados.

O passo 3 refere-se à especificação dos valores percentuais de incerteza de $-A\%$ a $+B\%$ sobre a resistência r e a reatância x das linhas e dos valores percentuais de incerteza de $-C\%$ a $+D\%$ sobre a potência ativa P e a potência reativa Q das cargas com incerteza. Logo, as equações (3.5) são utilizadas para calcular os valores intervalares de $r_{km} = (r_{km,min}, r_{km,max})$ e de $x_{km} = (x_{km,min}, x_{km,max})$ para cada linha com incerteza e as equações (3.7) são utilizadas para calcular os valores intervalares de $P_k = (P_{k,min}, P_{k,max})$ e de $Q_k = (Q_{k,min}, Q_{k,max})$ para cada carga com incerteza.

No passo 4, a impedância intervalar de cada linha z_{km,lim_i} , $i = 1, 2, 3, 4$, é calculada através das equações (3.2) e as impedâncias dos ramos a serem inseridos $z_{km,inserido_i}$ são calculadas através da equação (3.4). E, para cada carga, os valores intervalares de Δb_k e Δg_k são calculados através das equações (3.17) e (3.18), a variação em admitância intervalar Δy_k é calculada pelas equações (3.19) e as impedâncias dos ramos a serem inseridos $z_{k,inserido_i}$ são calculadas através da equação (3.20). Portanto, para cada ramo sujeito às incertezas, quatro valores de $z_{km,inserido_i}$ são calculados.

O passo 5 refere-se, propriamente, ao cálculo das tensões nodais através dos métodos CMIB ou CCOR, que são explicados nas subseções 3.2.1 e 3.2.2, respectivamente. Resumidamente, para o cálculo das tensões nodais intervalares, o método CMIB incorpora as incertezas na matriz impedância de barras e o método CCOR, no vetor de correntes injetadas nas barras. Neste passo, os métodos são executados para o número a de amostras geradas, resultando no mesmo número a de vetores de tensões nodais. A geração de amostras depende dos seguintes casos:

- Se apenas os dados de linha possuem incertezas: quatro amostras são geradas, combinando os limites da impedância intervalar. Ou seja, o método é executado quatro vezes, inserindo de cada vez os ramos calculados para cada caso:
 1. r_{min} e x_{min} de todas as linhas com incerteza
 2. r_{max} e x_{min} de todas as linhas com incerteza

3. r_{min} e x_{max} de todas as linhas com incerteza
 4. r_{max} e x_{max} de todas as linhas com incerteza
- Se apenas os dados de carga possuem incertezas: quatro amostras são geradas, combinando os limites da potência aparente intervalar. Ou seja, o método é executado quatro vezes, inserindo de cada vez os ramos calculados para cada caso:
 1. P_{min} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 2. P_{max} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 3. P_{min} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza
 4. P_{max} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza
 - Se tanto os dados de linha como os dados de carga possuem incertezas: dezesseis amostras são geradas, combinando os limites da impedância e da potência aparente intervalares. Ou seja, o método é executado dezesseis vezes, inserindo de cada vez os ramos calculados para a cada caso:
 1. r_{min} e x_{min} de todas as linhas e P_{min} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 2. r_{min} e x_{min} de todas as linhas e P_{max} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 3. r_{min} e x_{min} de todas as linhas e P_{min} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza
 4. r_{min} e x_{min} de todas as linhas e P_{max} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza
 5. r_{max} e x_{min} de todas as linhas e P_{min} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 6. r_{max} e x_{min} de todas as linhas e P_{max} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 7. r_{max} e x_{min} de todas as linhas e P_{min} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza
 8. r_{max} e x_{min} de todas as linhas e P_{max} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza
 9. r_{min} e x_{max} de todas as linhas e P_{min} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 10. r_{min} e x_{max} de todas as linhas e P_{max} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 11. r_{min} e x_{max} de todas as linhas e P_{min} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza
 12. r_{min} e x_{max} de todas as linhas e P_{max} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza
 13. r_{max} e x_{max} de todas as linhas e P_{min} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 14. r_{max} e x_{max} de todas as linhas e P_{max} e Q_{min} de todas as cargas com incerteza
 15. r_{max} e x_{max} de todas as linhas e P_{min} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza
 16. r_{max} e x_{max} de todas as linhas e P_{max} e Q_{max} de todas as cargas com incerteza

É possível, porém, gerar outras amostras além das mencionadas. No entanto, neste trabalho, as amostras, tais como estão apresentadas, são as escolhidas para a realização dos testes.

No passo 6, para cada vetor de tensões nodais \underline{V}_a , resultante do passo 5, a tensão fasorial de cada barra é normalizada em relação à tensão da barra de referência especificada para o caso base. A tensão normalizada em uma barra k é igual a tensão na barra k dada pelos métodos propostos multiplicada pela relação entre a tensão na barra de referência do caso base e a tensão na barra de referência dada pelos métodos propostos.

No passo 7, para cada vetor de tensões nodais \underline{V}_a , resultante do passo 6, os módulos das tensões das barras PV são fixados nos valores especificados para o caso base. Após isso, os fluxos de potência e as perdas intervalares podem ser calculados através das equações (3.21), (3.22) e (3.23), a seguir.

$$P_{km} = (a_{tap} \cdot V_k)^2 g_{km} - (a_{tap} \cdot V_k) V_m [g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{mk} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (3.21)$$

$$P_{mk} = V_m^2 \cdot g_{km} - (a_{tap} \cdot V_k) V_m \cdot [g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - b_{mk} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} P_{perdas} &= P_{km} + P_{mk} \\ &= [(a_{tap} \cdot V_k)^2 + V_m^2] g_{km} - 2(a_{tap} \cdot V_k) V_m [g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \end{aligned} \quad (3.23)$$

em que a_{tap} é o valor do tap do transformador da linha $k - m$, se houver; V_k é o módulo da tensão da barra k ; V_m é o módulo da tensão da barra m ; θ_k é o ângulo de fase da tensão da barra k ; θ_m é o ângulo de fase da tensão da barra m ; g_{km} é a condutância da linha $k - m$; e b_{km} é a susceptância da linha $k - m$.

No passo 8, os vetores \underline{V}_a são comparados entre si e o menor e o maior valor de módulo e de ângulo de fase da tensão, para cada barra, definem a tensão intervalar resultante da análise do fluxo de potência. O mesmo é realizado com os vetores de fluxos de potência e de perdas.

3.2.1 Compensação da Matriz Impedância de Barras

A estratégia da Compensação da Matriz Impedância de Barras (CMIB) para cálculo do fluxo de potência intervalar é descrita a seguir. Este desenvolvimento refere-se ao passo 5 do algoritmo proposto, ilustrado pelo fluxograma da Figura 8.

No passo 5.1 do CMIB, a matriz de impedância de barras aumentada, \mathbf{Z}_{barra,aum_a} , é montada, como mostra a equação (2.2), para cada amostra, utilizando as impedâncias $z_{km,inserido_i}$, calculadas no passo 4. Para linha, os elementos Z_{xi} e Z_{xx} são calculados

através das equações (2.20) e (2.21). Para carga, os elementos Z_{xi} e Z_{xx} são calculados através das equações (2.22) e (2.23).

No passo 5.2 do CMIB, a matriz \mathbf{Z}_{barra,aum_a} , encontrada no passo anterior, para cada amostra, é reduzida para a matriz $\mathbf{Z}_{barra,atual_a}$, através da equação (2.25). Se existem mais elementos, linhas ou cargas, sujeito às incertezas de dados, o algoritmo retorna ao passo anterior e calcula a nova matriz \mathbf{Z}_{barra,aum_a} , a partir da matriz $\mathbf{Z}_{barra,atual_a}$ calculada neste passo. Caso contrário, segue para o próximo passo.

No passo 5.3 do CMIB, o vetor de tensões nodais, para cada amostra, é calculado através da seguinte equação:

$$\underline{V}_a = \mathbf{Z}_{barra,atual_a} \cdot \underline{I}_0 \quad (3.24)$$

em que \underline{V}_a é o vetor de tensões nodais, $\mathbf{Z}_{barra,atual_a}$ é a matriz impedância de barras, calculada ao final do passo 5.2 do CMIB, para $a = 1, 2, 3, 4$ ou $a = 1, 2, 3, \dots, 16$, e \underline{I}_0 é o vetor de correntes injetadas nas barras resultante do fluxo de potência do caso base.

Importante ressaltar que, como o efeito das incertezas é inserido na matriz impedância de barras e as correntes injetadas nas barras são consideradas constantes, as susceptâncias *shunt* das linhas e transformadores, também, são consideradas constantes.

3.2.2 Compensação de Correntes

A estratégia da Compensação de Correntes (CCOR) para cálculo do fluxo de potência intervalar é descrita a seguir. Este desenvolvimento refere-se ao passo 5 do algoritmo proposto, ilustrado pelo fluxograma da Figura 8.

No passo 5.1 do CCOR, a matriz de impedâncias a serem inseridas, \mathbf{D}_a , para cada amostra, é montada, como mostra a equação (2.29), com as impedâncias a serem inseridas, calculadas no passo 4. A matriz incidência, \mathbf{M} , comum a todas as amostras, é montada como mostra a equação (2.30).

No passo 5.2 do CCOR, a matriz \mathbf{C}_a é calculada para a respectiva matriz \mathbf{D}_a e \mathbf{M} , de acordo com a equação (2.33).

No passo 5.3 do CCOR, o vetor de correntes compensadas, \underline{I}_{comp_a} , para cada amostra, é calculado através da equação (2.36), com a respectiva matriz \mathbf{C}_a , calculada no passo 5.2, e a matriz \mathbf{M} , montada no passo 5.1.

No passo 5.4 do CCOR, o vetor de tensões nodais, para cada amostra, é calculado

através da seguinte equação:

$$\underline{V}_a = \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_a} \quad (3.25)$$

em que \underline{V}_a é o vetor de tensões nodais, \mathbf{Z}_0 é a matriz impedância de barras do caso base, \underline{I}_{comp_a} é o vetor de correntes compensadas injetadas nas barras, calculado no passo 5.3 do CCOR, para $a = 1, 2, 3, 4$ ou $a = 1, 2, 3, \dots, 16$.

Neste método, também, é importante lembrar da seção 2.2 que, no cálculo das correntes injetadas compensadas, as correntes injetadas nas barras são consideradas constantes. Portanto, em ambos os métodos de compensação apresentados, CMIB e CCOR, as susceptâncias *shunt* das linhas e transformadores são consideradas grandezas constantes, não intervalares.

3.3 EXEMPLO NUMÉRICO

O sistema-exemplo de 3 barras, extraído da referência [36], ilustrado pela Figura 3, será utilizado para validação dos algoritmos propostos.

Os dados de barra e de linha deste sistema encontram-se nas Tabelas 1 e 2. A matriz impedância de barras do caso base, \mathbf{Z}_0 , está calculada na subseção 2.1.1.

O passo 1 já foi realizado e o vetor de correntes injetadas nas barras, \underline{I}_0 , está apresentado na subseção 2.2.1.

No passo 2, a linha 1 - 2 e a carga da barra 2 são definidas como elementos sujeitos às incertezas.

No passo 3, os valores de incerteza são definidos como $\pm 10\%$, para resistência e reatância da linha e para potência ativa e reativa da carga. Logo, a resistência e a reatância intervalar da linha são calculadas como nas equações (3.5):

$$\begin{cases} r_{12,min} = (100 - 10)/100 \cdot 0,1 = 0,09 \text{ p.u.} \\ r_{12,max} = (100 + 10)/100 \cdot 0,1 = 0,11 \text{ p.u.} \\ x_{12,min} = (100 - 10)/100 \cdot 1 = 0,9 \text{ p.u.} \\ x_{12,max} = (100 + 10)/100 \cdot 1 = 1,1 \text{ p.u.} \end{cases}$$

E as potências intervalares ativa e reativa são calculadas como nas equações (3.7):

$$\begin{cases} P_{2,min} = (100 - 10)/100 \cdot 0,05 = 0,045 \text{ p.u.} \\ P_{2,max} = (100 + 10)/100 \cdot 0,05 = 0,055 \text{ p.u.} \\ Q_{2,min} = (100 - 10)/100 \cdot 0,02 = 0,018 \text{ p.u.} \\ Q_{2,max} = (100 + 10)/100 \cdot 0,02 = 0,022 \text{ p.u.} \end{cases}$$

No passo 4, para a linha 1 - 2, a impedância intervalar é obtida através da equação (3.2):

$$\begin{cases} z_{12,lim_1} = r_{12,min} + x_{12,min}j = 0,09 + 0,9j \text{ p.u.} \\ z_{12,lim_2} = r_{12,max} + x_{12,min}j = 0,11 + 0,9j \text{ p.u.} \\ z_{12,lim_3} = r_{12,min} + x_{12,max}j = 0,09 + 1,1j \text{ p.u.} \\ z_{12,lim_4} = r_{12,max} + x_{12,max}j = 0,11 + 1,1j \text{ p.u.} \end{cases}$$

As impedâncias dos ramos a serem inseridos para representar a impedância intervalar da linha 1 - 2, $z_{12,inserido_i}$, $i = 1, 2, 3, 4$, são calculadas através da equação (3.4):

$$\begin{cases} z_{12,inserido_1} = [1/(0,09 + 0,9j) - 1/(0,1 + 1j)]^{-1} = 0,9 + 9j \text{ p.u.} \\ z_{12,inserido_2} = [1/(0,11 + 0,9j) - 1/(0,1 + 1j)]^{-1} = 2,8604 + 8,604j \text{ p.u.} \\ z_{12,inserido_3} = [1/(0,09 + 1,1j) - 1/(0,1 + 1j)]^{-1} = -3,0604 - 10,604j \text{ p.u.} \\ z_{12,inserido_4} = [1/(0,11 + 1,1j) - 1/(0,1 + 1j)]^{-1} = -1,1 - 11j \text{ p.u.} \end{cases}$$

Já para a carga 2, os valores intervalares de Δb_2 e Δg_2 são calculados através das equações (3.17) e (3.18):

$$\begin{cases} \Delta g_{2,min} = (1/0,9828^2) (0,045 - 0,05) = -0,0052 \text{ p.u.} \\ \Delta g_{2,max} = (1/0,9828^2) (0,055 - 0,05) = 0,0052 \text{ p.u.} \end{cases}$$

e

$$\begin{cases} \Delta b_{2,min} = -(1/0,9828^2) (0,018 - 0,02) = 0,0021 \text{ p.u.} \\ \Delta b_{2,max} = -(1/0,9828^2) (0,022 - 0,02) = -0,0021 \text{ p.u.} \end{cases}$$

A variação em admitância intervalar Δy_2 é, então, calculada pelas equações (3.19):

$$\begin{cases} \Delta y_{2,lim_1} = -0,0052 + 0,0021j \text{ p.u.} \\ \Delta y_{2,lim_2} = 0,0052 + 0,0021j \text{ p.u.} \\ \Delta y_{2,lim_3} = -0,0052 - 0,0021j \text{ p.u.} \\ \Delta y_{2,lim_4} = 0,0052 - 0,0021j \text{ p.u.} \end{cases}$$

As impedâncias dos ramos a serem inseridos para representar a potência intervalar da carga 2, $z_{2,inserido_i}$, $i = 1, 2, 3, 4$, são calculadas através da equação (3.20):

$$\begin{cases} z_{2,inserido_1} = (-0,0052 + 0,0021j)^{-1} = -166,52 - 66,61j \text{ p.u.} \\ z_{2,inserido_2} = (0,0052 + 0,0021j)^{-1} = 166,52 - 66,61j \text{ p.u.} \\ z_{2,inserido_3} = (-0,0052 - 0,0021j)^{-1} = -166,52 + 66,61j \text{ p.u.} \\ z_{2,inserido_4} = (0,0052 - 0,0021j)^{-1} = 166,52 + 66,61j \text{ p.u.} \end{cases}$$

O passo 5 refere-se, propriamente, ao cálculo das tensões nodais através das estratégias propostas por este trabalho. Como tanto linha e quanto carga possuem incertezas, dezesseis vetores de tensões nodais são calculados. Os métodos são demonstrados a seguir, individualmente.

- CMIB:

Os passos do CMIB são demonstrados, apenas, para a inserção dos ramos de impedância $z_{12,inserido_1} = 0,9 + 9j \text{ p.u.}$ e $z_{2,inserido_1} = -166,52 - 66,61j \text{ p.u.}$. Para os outros casos de inserção, os mesmos procedimentos são realizados.

No passo 5.1 do CMIB, as matrizes \mathbf{Z}_{barra,aum_a} , $a = 1, 2, 3, 4$, são calculadas, inicialmente para a linha 1 - 2, através das equações (2.20) e (2.21). Os elementos Z_{xi} são comuns às matrizes, e já foram calculados na subseção 2.1.1. A diferença está, somente, no valor de Z_{xx} . Para inserção de $z_{12,inserido_1}$:

$$\begin{aligned} Z_{xx} &= Z_{1x} - Z_{2x} + z_{12,inserido_1} \\ &= 0,0385 + 0,3797j - (-0,0381 - 0,3778j) + 0,9 + 9j \\ &= 0,9765 + 9,7575j \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Logo, a matriz impedância de barras aumentada para inserção de $z_{12,inserido_1}$ é:

$$\mathbf{Z}_{barra,aum_1} = \left[\begin{array}{ccc|c} 0,0289 - 12,2147j & -0,0095 - 12,5945j & -0,0226 - 12,7223j & 0,0385 + 0,3797j \\ -0,0095 - 12,5945j & 0,0286 - 12,2166j & -0,0095 - 12,5945j & -0,0381 - 0,3778j \\ -0,0226 - 12,7223j & -0,0095 - 12,5945j & 0,0289 - 12,2147j & -0,0131 - 0,1278j \\ \hline 0,0385 + 0,3797j & -0,0381 - 0,3778j & -0,0131 - 0,1278j & 0,9765 + 9,7575j \end{array} \right] \text{ p.u.}$$

No passo 5.2 do CMIB, as matrizes \mathbf{Z}_{barra,aum_a} , encontradas no passo anterior, são reduzidas para matrizes $\mathbf{Z}_{barra,atual_a}$, $a = 1, 2, 3, 4$, através da equação (2.25):

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_1} = \left[\begin{array}{ccc|c} 0,0274 - 12,2295j & -0,0080 - 12,5797j & -0,0221 - 12,7173j & \\ -0,0080 - 12,5797j & 0,0271 - 12,2313j & -0,0100 - 12,5994j & \\ -0,0221 - 12,7173j & -0,0100 - 12,5994j & 0,0288 - 12,2164j & \end{array} \right] \text{ p.u.}$$

Uma vez que há, também, a carga da barra 2 sujeita à incerteza, é necessário voltar ao passo 5.1, para calcular as matrizes \mathbf{Z}_{barra,aum_a} , $a = 1, 2, 3, \dots, 16$, através das equações (2.22) e (2.23), a partir das respectivas $\mathbf{Z}_{barra,atual_a}$, $a = 1, 2, 3, 4$, calculadas para linha 1 - 2. Então, para inserção, agora, de $z_{2,inscrito_1}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{x1} = Z_{21} = -0,0080 - 12,5797j \text{ p.u.} \\ Z_{x2} = Z_{22} = 0,0271 - 12,2313j \text{ p.u.} \\ Z_{x3} = Z_{23} = -0,0100 - 12,5994j \text{ p.u.} \\ Z_{xx} = Z_{2x} + z_{2,inscrito_1} = 0,0271 - 12,2313j + (-166,52 - 66,61j) = -166,49 - 78,84j \text{ p.u.} \end{array} \right.$$

Logo, a matriz impedância de barras aumentada para inserção de $z_{2,inscrito_1}$, após a inserção de $z_{12,inscrito_1}$, é:

$$\mathbf{Z}_{barra,aum_1} = \left[\begin{array}{ccc|c} 0,0274 - 12,2295j & -0,0080 - 12,5797j & -0,0221 - 12,7173j & -0,0080 - 12,5797j \\ -0,0080 - 12,5797j & 0,0271 - 12,2313j & -0,0100 - 12,5994j & 0,0271 - 12,2313j \\ -0,0221 - 12,7173j & -0,0100 - 12,5994j & 0,0288 - 12,2164j & -0,0100 - 12,5994j \\ \hline -0,0080 - 12,5797j & 0,0271 - 12,2313j & -0,0100 - 12,5994j & -166,49 - 78,84j \end{array} \right] \text{ p.u.}$$

Novamente, no passo 5.2, as matrizes \mathbf{Z}_{barra,aum_a} , encontradas no passo anterior, são reduzidas para matrizes $\mathbf{Z}_{barra,atual_a}$, $a = 1, 2, 3, \dots, 16$, através da equação (2.25):

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_1} = \left[\begin{array}{ccc} -0,7485 - 11,8609j & -0,7635 - 12,2235j & -0,7992 - 12,3480j \\ -0,7635 - 12,2235j & -0,7084 - 11,8870j & -0,7666 - 12,2424j \\ -0,7992 - 12,3480j & -0,7666 - 12,2424j & -0,7495 - 11,8464j \end{array} \right] \text{ p.u.}$$

Da mesma forma, inserindo $z_{12,inscrito_1} = 0,9 + 9j \text{ p.u.}$ e $z_{2,inscrito_2} = 166,52 - 66,61j \text{ p.u.}$:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_2} = \left[\begin{array}{ccc} 0,8041 - 11,8631j & 0,7462 - 12,2213j & 0,7559 - 12,3504j \\ 0,7462 - 12,2213j & 0,7594 - 11,8807j & 0,7454 - 12,2405j \\ 0,7559 - 12,3504j & 0,7454 - 12,2405j & 0,8080 - 11,8491j \end{array} \right] \text{ p.u.}$$

Inserindo $z_{12,inscrito_1} = 0,9 + 9j \text{ p.u.}$ e $z_{2,inscrito_3} = -166,52 + 66,61j \text{ p.u.}$:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_3} = \left[\begin{array}{ccc} -0,8318 - 12,5089j & -0,8427 - 12,8538j & -0,8827 - 12,9970j \\ -0,8427 - 12,8538j & -0,7837 - 12,5001j & -0,8460 - 12,8738j \\ -0,8827 - 12,9970j & -0,8460 - 12,8738j & -0,8332 - 12,4964j \end{array} \right] \text{ p.u.}$$

Inserindo $z_{12,inscrito_1} = 0,9 + 9j \text{ p.u.}$ e $z_{2,inscrito_4} = 166,52 + 66,61j \text{ p.u.}$:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_4} = \left[\begin{array}{ccc} 0,8857 - 12,5110j & 0,8273 - 12,8510j & 0,8375 - 12,9993j \\ 0,8273 - 12,8510j & 0,8400 - 12,4927j & 0,8265 - 12,8712j \\ 0,8375 - 12,9993j & 0,8265 - 12,8712j & 0,8897 - 12,4990j \end{array} \right] \text{ p.u.}$$

Inserindo $z_{12,inscrito_2} = 2,8604 + 8,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_1} = -166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_5} = \begin{bmatrix} -0,7453 - 11,8605j & -0,7665 - 12,2235j & -0,8001 - 12,3478j \\ -0,7665 - 12,2235j & -0,7056 - 11,8873j & -0,7657 - 12,2427j \\ -0,8001 - 12,3478j & -0,7657 - 12,2427j & -0,7492 - 11,8465j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_2} = 2,8604 + 8,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_2} = 166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_6} = \begin{bmatrix} 0,8073 - 11,8634j & 0,7431 - 12,2213j & 0,7549 - 12,3505j \\ 0,7431 - 12,2213j & 0,7622 - 11,8803j & 0,7463 - 12,2403j \\ 0,7549 - 12,3505j & 0,7463 - 12,2403j & 0,8083 - 11,8489j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_2} = 2,8604 + 8,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_3} = -166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_7} = \begin{bmatrix} -0,8289 - 12,5085j & -0,8457 - 12,8538j & -0,8838 - 12,9969j \\ -0,8457 - 12,8538j & -0,7806 - 12,5004j & -0,8449 - 12,8740j \\ -0,8838 - 12,9969j & -0,8449 - 12,8740j & -0,8329 - 12,4966j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_2} = 2,8604 + 8,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_4} = 166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_8} = \begin{bmatrix} 0,8886 - 12,5114j & 0,8243 - 12,8510j & 0,8364 - 12,9995j \\ 0,8243 - 12,8510j & 0,8431 - 12,4923j & 0,8276 - 12,8709j \\ 0,8364 - 12,9995j & 0,8276 - 12,8709j & 0,8900 - 12,4989j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_3} = -3,0604 - 10,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_1} = -166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_9} = \begin{bmatrix} -0,7519 - 11,8304j & -0,7637 - 12,2523j & -0,8005 - 12,3572j \\ -0,7637 - 12,2523j & -0,7049 - 11,8601j & -0,7643 - 12,2340j \\ -0,8005 - 12,3572j & -0,7643 - 12,2340j & -0,7484 - 11,8438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_3} = -3,0604 - 10,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_2} = 166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_{10}} = \begin{bmatrix} 0,8080 - 11,8326j & 0,7460 - 12,2501j & 0,7571 - 12,3597j \\ 0,7460 - 12,2501j & 0,7562 - 11,8538j & 0,7432 - 12,2320j \\ 0,7571 - 12,3597j & 0,7432 - 12,2320j & 0,8070 - 11,8464j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_3} = -3,0604 - 10,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_3} = -166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_{11}} = \begin{bmatrix} -0,8355 - 12,4814j & -0,8427 - 12,8826j & -0,8840 - 13,0073j \\ -0,8427 - 12,8826j & -0,7797 - 12,4704j & -0,8433 - 12,8634j \\ -0,8840 - 13,0073j & -0,8433 - 12,8634j & -0,8318 - 12,4929j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inserido_3} = -3,0604 - 10,604j$ p.u. e $z_{2,inserido_4} = 166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_{12}} = \begin{bmatrix} 0,8898 - 12,4835j & 0,8270 - 12,8798j & 0,8386 - 13,0096j \\ 0,8270 - 12,8798j & 0,8363 - 12,4630j & 0,8239 - 12,8608j \\ 0,8386 - 13,0096j & 0,8239 - 12,8608j & 0,8883 - 12,4954j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inserido_4} = -1,1 - 11j$ p.u. e $z_{2,inserido_1} = -166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_{13}} = \begin{bmatrix} -0,7490 - 11,8301j & -0,7665 - 12,2523j & -0,8014 - 12,3571j \\ -0,7665 - 12,2523j & -0,7024 - 11,8604j & -0,7635 - 12,2342j \\ -0,8014 - 12,3571j & -0,7635 - 12,2342j & -0,7481 - 11,8439j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inserido_4} = -1,1 - 11j$ p.u. e $z_{2,inserido_2} = 166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_{14}} = \begin{bmatrix} 0,8109 - 11,8330j & 0,7433 - 12,2501j & 0,7562 - 12,3598j \\ 0,7433 - 12,2501j & 0,7588 - 11,8535j & 0,7440 - 12,2318j \\ 0,7562 - 12,3598j & 0,7440 - 12,2318j & 0,8072 - 11,8463j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inserido_4} = -1,1 - 11j$ p.u. e $z_{2,inserido_3} = -166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_{15}} = \begin{bmatrix} -0,8328 - 12,4811j & -0,8455 - 12,8826j & -0,8850 - 13,0072j \\ -0,8455 - 12,8826j & -0,7768 - 12,4707j & -0,8423 - 12,8636j \\ -0,8850 - 13,0072j & -0,8423 - 12,8636j & -0,8315 - 12,4930j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inserido_4} = -1,1 - 11j$ p.u. e $z_{2,inserido_4} = 166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\mathbf{Z}_{barra,atual_{16}} = \begin{bmatrix} 0,8924 - 12,4839j & 0,8242 - 12,8798j & 0,8377 - 13,0097j \\ 0,8242 - 12,8798j & 0,8391 - 12,4626j & 0,8249 - 12,8606j \\ 0,8377 - 13,0097j & 0,8249 - 12,8606j & 0,8886 - 12,4953j \end{bmatrix} p.u.$$

Como não há mais elementos sujeitos às incertezas, segue-se para o passo 5.3.

No passo 5.3 do CMIB, as tensões nodais são calculadas pela equação (3.24), ou seja:

$$\begin{aligned} \underline{V}_1 &= \mathbf{Z}_{barra,atual_1} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0,9638 - 0,0615j \\ 0,9430 - 0,1643j \\ 0,9290 - 0,2320j \end{bmatrix} p.u. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{V}_2 &= \mathbf{Z}_{barra,atual_2} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0,9773 + 0,0591j \\ 0,9558 - 0,0470j \\ 0,9425 - 0,1112j \end{bmatrix} p.u. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_3 &= \mathbf{Z}_{\text{barra,atual}_3} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 1,0134 - 0,0735j \\ 0,9913 - 0,1759j \\ 0,9787 - 0,2440j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_4 &= \mathbf{Z}_{\text{barra,atual}_4} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 1,0283 + 0,0599j \\ 1,0054 - 0,0461j \\ 0,9936 - 0,1104j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_5 &= \mathbf{Z}_{\text{barra,atual}_5} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0,9647 - 0,0615j \\ 0,9421 - 0,1642j \\ 0,9287 - 0,2319j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_6 &= \mathbf{Z}_{\text{barra,atual}_6} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0,9782 + 0,0589j \\ 0,9549 - 0,0470j \\ 0,9422 - 0,1112j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_7 &= \mathbf{Z}_{\text{barra,atual}_7} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 1,0143 - 0,0736j \\ 0,9904 - 0,1757j \\ 0,9784 - 0,2440j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_8 &= \mathbf{Z}_{\text{barra,atual}_8} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 1,0292 + 0,0597j \\ 1,0045 - 0,0461j \\ 0,9933 - 0,1105j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_9 &= \mathbf{Z}_{\text{barra,atual}_9} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0,9642 - 0,0527j \\ 0,9416 - 0,1725j \\ 0,9282 - 0,2346j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{V}_{10} &= \underline{Z}_{\text{barra,atual}_{10}} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0,9788 + 0,0681j \\ 0,9554 - 0,0556j \\ 0,9428 - 0,1140j \end{bmatrix} \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{V}_{11} &= \underline{Z}_{\text{barra,atual}_{11}} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 1,0138 - 0,0651j \\ 0,9897 - 0,1845j \\ 0,9777 - 0,2470j \end{bmatrix} \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{V}_{12} &= \underline{Z}_{\text{barra,atual}_{12}} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 1,0299 + 0,0684j \\ 1,0049 - 0,0551j \\ 0,9938 - 0,1137j \end{bmatrix} \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{V}_{13} &= \underline{Z}_{\text{barra,atual}_{13}} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0,9650 - 0,0527j \\ 0,9408 - 0,1724j \\ 0,9279 - 0,2345j \end{bmatrix} \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{V}_{14} &= \underline{Z}_{\text{barra,atual}_{14}} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0,9796 + 0,0680j \\ 0,9546 - 0,0556j \\ 0,9425 - 0,1140j \end{bmatrix} \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{V}_{15} &= \underline{Z}_{\text{barra,atual}_{15}} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 1,0146 - 0,0652j \\ 0,9889 - 0,1843j \\ 0,9774 - 0,2469j \end{bmatrix} \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{V}_{16} &= \underline{Z}_{\text{barra,atual}_{16}} \cdot \underline{I}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 1,0308 + 0,0683j \\ 1,0041 - 0,0551j \\ 0,9935 - 0,1137j \end{bmatrix} \text{ p.u.} \end{aligned}$$

- CCOR:

Os passos do CCOR, também, são demonstrados, apenas, para a inserção dos ramos de impedância de $z_{12,inserido_1} = 0,9 + 9j$ p.u. e $z_{2,inserido_1} = -166,52 - 66,61j$ p.u.. Para os outros casos de inserção, os mesmos procedimentos são realizados.

No passo 5.1 do CCOR, as matrizes de impedâncias a serem inseridas, \mathbf{D}_a , $a = 1, 2, 3, \dots, 16$, são montadas como mostra a equação (2.29). Para $z_{12,inserido_1}$ e $z_{2,inserido_1}$:

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0,9 + 9j & 0 \\ 0 & -166,52 - 66,61j \end{bmatrix} p.u.$$

E a matriz incidência, \mathbf{M} , é montada como mostra a equação (2.30):

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

No passo 5.2 do CCOR, as matrizes \mathbf{C}_a , $a = 1, 2, 3, \dots, 16$, são calculadas de acordo com a equação (2.33). Para \mathbf{D}_1 :

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_1 &= \left(\begin{bmatrix} 0,9 + 9j & 0 \\ 0 & -166,52 - 66,61j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot [\mathbf{Z}_0] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 0,0101 - 0,1015j & -0,0002 + 0,0001j \\ -0,0002 + 0,0001j & -0,0049 + 0,0023j \end{bmatrix} \end{aligned}$$

No passo 5.3 do CCOR, os vetores de correntes compensadas, \underline{I}_{comp_a} , $a = 1, 2, 3, \dots, 16$, são calculados através da equação (2.36). Para \mathbf{C}_1 :

$$\begin{aligned} \underline{I}_{comp_1} &= \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,0101 - 0,1015j & -0,0002 + 0,0001j \\ -0,0002 + 0,0001j & -0,0049 + 0,0023j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. \cdot [\mathbf{Z}_0] \right) \cdot [\underline{I}_0] \\ &= \begin{bmatrix} 0,1918 + 0,0097j \\ -0,0321 + 0,0221j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u. \end{aligned}$$

Da mesma forma, inserindo $z_{12,inserido_1} = 0,9 + 9j$ p.u. e $z_{2,inserido_2} = 166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_2} = \begin{bmatrix} 0,1914 + 0,0098j \\ -0,0413 + 0,0231j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_1} = 0,9 + 9j$ p.u. e $z_{2,inscrito_3} = -166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_3} = \begin{bmatrix} 0,1918 + 0,0099j \\ -0,0312 + 0,0259j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_1} = 0,9 + 9j$ p.u. e $z_{2,inscrito_4} = 166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_4} = \begin{bmatrix} 0,1914 + 0,0099j \\ -0,0414 + 0,0270j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_2} = 2,8604 + 8,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_1} = -166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_5} = \begin{bmatrix} 0,1918 + 0,0074j \\ -0,0321 + 0,0244j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_2} = 2,8604 + 8,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_2} = 166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_6} = \begin{bmatrix} 0,1914 + 0,0073j \\ -0,0413 + 0,0255j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_2} = 2,8604 + 8,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_3} = -166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_7} = \begin{bmatrix} 0,1918 + 0,0075j \\ -0,0312 + 0,0282j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_2} = 2,8604 + 8,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_4} = 166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_8} = \begin{bmatrix} 0,1914 + 0,0075j \\ -0,0414 + 0,0294j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_3} = -3,0604 - 10,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_1} = -166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_9} = \begin{bmatrix} 0,2143 + 0,0096j \\ -0,0547 + 0,0221j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_3} = -3,0604 - 10,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_2} = 166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_{10}} = \begin{bmatrix} 0,2147 + 0,0096j \\ -0,0646 + 0,0233j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_3} = -3,0604 - 10,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_3} = -166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_{11}} = \begin{bmatrix} 0,2143 + 0,0095j \\ -0,0537 + 0,0262j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_3} = -3,0604 - 10,604j$ p.u. e $z_{2,inscrito_4} = 166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_{12}} = \begin{bmatrix} 0,2147 + 0,0095j \\ -0,0647 + 0,0275j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_4} = -1,1 - 11j$ p.u. e $z_{2,inscrito_1} = -166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_{13}} = \begin{bmatrix} 0,2143 + 0,0075j \\ -0,0547 + 0,0243j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_4} = -1,1 - 11j$ p.u. e $z_{2,inscrito_2} = 166,52 - 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_{14}} = \begin{bmatrix} 0,2147 + 0,0074j \\ -0,0646 + 0,0255j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_4} = -1,1 - 11j$ p.u. e $z_{2,inscrito_3} = -166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_{15}} = \begin{bmatrix} 0,2143 + 0,0073j \\ -0,0536 + 0,0284j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

Inserindo $z_{12,inscrito_4} = -1,1 - 11j$ p.u. e $z_{2,inscrito_4} = 166,52 + 66,61j$ p.u.:

$$\underline{I}_{comp_{16}} = \begin{bmatrix} 0,2147 + 0,0073j \\ -0,0646 + 0,0297j \\ -0,1476 + 0,0438j \end{bmatrix} p.u.$$

No passo 5.4 do CCOR, os vetores de tensões nodais \underline{V}_a , $a = 1, 2, 3, \dots, 16$, são calculados através da equação (2.35), para \mathbf{Z}_0 calculado na subseção 2.1.1:

$$\begin{aligned}\underline{V}_1 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_1} \\ &= \begin{bmatrix} 0,9638 - 0,0615j \\ 0,9430 - 0,1643j \\ 0,9290 - 0,2320j \end{bmatrix} p.u.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_2 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_2} \\ &= \begin{bmatrix} 0,9773 + 0,0591j \\ 0,9558 - 0,0470j \\ 0,9425 - 0,1112j \end{bmatrix} p.u.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_3 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_3} \\ &= \begin{bmatrix} 1,0134 - 0,0735j \\ 0,9913 - 0,1759j \\ 0,9787 - 0,2440j \end{bmatrix} p.u.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_4 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_4} \\ &= \begin{bmatrix} 1,0283 + 0,0599j \\ 1,0054 - 0,0461j \\ 0,9936 - 0,1104j \end{bmatrix} p.u.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_5 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_5} \\ &= \begin{bmatrix} 0,9647 - 0,0615j \\ 0,9421 - 0,1642j \\ 0,9287 - 0,2319j \end{bmatrix} p.u.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_6 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_6} \\ &= \begin{bmatrix} 0,9782 + 0,0589j \\ 0,9549 - 0,0470j \\ 0,9422 - 0,1112j \end{bmatrix} p.u.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_7 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_7} \\ &= \begin{bmatrix} 1,0143 - 0,0736j \\ 0,9904 - 0,1757j \\ 0,9784 - 0,2440j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_8 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_8} \\ &= \begin{bmatrix} 1,0292 + 0,0597j \\ 1,0045 - 0,0461j \\ 0,9933 - 0,1105j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_9 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_9} \\ &= \begin{bmatrix} 0,9642 - 0,0527j \\ 0,9416 - 0,1725j \\ 0,9282 - 0,2346j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_{10} &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_{10}} \\ &= \begin{bmatrix} 0,9788 + 0,0681j \\ 0,9554 - 0,0556j \\ 0,9428 - 0,1140j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_{11} &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_{11}} \\ &= \begin{bmatrix} 1,0138 - 0,0651j \\ 0,9897 - 0,1845j \\ 0,9777 - 0,2470j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_{12} &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_{12}} \\ &= \begin{bmatrix} 1,0299 + 0,0684j \\ 1,0049 - 0,0551j \\ 0,9938 - 0,1137j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_{13} &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_{13}} \\ &= \begin{bmatrix} 0,9650 - 0,0527j \\ 0,9408 - 0,1724j \\ 0,9279 - 0,2345j \end{bmatrix} \text{ p.u.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_{14} &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_{14}} \\ &= \begin{bmatrix} 0,9796 + 0,0680j \\ 0,9546 - 0,0556j \\ 0,9425 - 0,1140j \end{bmatrix} p.u.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_{15} &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_{15}} \\ &= \begin{bmatrix} 1,0146 - 0,0652j \\ 0,9889 - 0,1843j \\ 0,9774 - 0,2469j \end{bmatrix} p.u.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{V}_{16} &= \mathbf{Z}_0 \cdot \underline{I}_{comp_{16}} \\ &= \begin{bmatrix} 1,0308 + 0,0683j \\ 1,0041 - 0,0551j \\ 0,9935 - 0,1137j \end{bmatrix} p.u.\end{aligned}$$

É importante ressaltar que as tensões encontradas por ambos os métodos são idênticas, garantindo validade aos algoritimos propostos.

No passo 6, cada um dos vetores de tensões nodais tem, individualmente, suas tensões normalizadas em relação à tensão da barra de referência, tipo $V\theta$, especificada inicialmente. As tensões normalizadas, então, são:

$$\underline{V}_1 = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9853 - 0,1076j \\ 0,9753 - 0,1785j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9912/\underline{-6,2312^\circ} \\ 0,9915/\underline{-10,3697^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_2 = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9716 - 0,1068j \\ 0,9541 - 0,1715j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9774/\underline{-6,2749^\circ} \\ 0,9693/\underline{-10,1890^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_3 = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9856 - 0,1020j \\ 0,9781 - 0,1698j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9908/\underline{-5,9088^\circ} \\ 0,9927/\underline{-9,8514^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_4 = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9718 - 0,1014j \\ 0,9568 - 0,1631j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9771/\underline{-5,9570^\circ} \\ 0,9706/\underline{-9,6738^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_5 = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9835 - 0,1074j \\ 0,9741 - 0,1783j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9893/\underline{-6,2335^\circ} \\ 0,9902/\underline{-10,3704^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_6 = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9697 - 0,1064j \\ 0,9529 - 0,1711j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9756/\underline{-6,2637^\circ} \\ 0,9681/\underline{-10,1808^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_7 = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9838 - 0,1019j \\ 0,9769 - 0,1697j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9891/\underline{-5,9105^\circ} \\ 0,9915/\underline{-9,8520^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_8 = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9701 - 0,1010j \\ 0,9557 - 0,1628j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9753/\underline{-5,9452^\circ} \\ 0,9694/\underline{-9,6655^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_9 = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9834 - 0,1252j \\ 0,9730 - 0,1901j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9914/\underline{-7,2559^\circ} \\ 0,9914/\underline{-11,0570^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_{10} = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9675 - 0,1241j \\ 0,9505 - 0,1826j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9754/\underline{-7,3105^\circ} \\ 0,9679/\underline{-10,8743^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_{11} = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9838 - 0,1187j \\ 0,9760 - 0,1810j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9910/\underline{-6,8811^\circ} \\ 0,9927/\underline{-10,5037^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_{12} = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9679 - 0,1178j \\ 0,9534 - 0,1737j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9750/\underline{-6,9417^\circ} \\ 0,9691/\underline{-10,3260^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_{13} = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9818 - 0,1250j \\ 0,9719 - 0,1899j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9897/\underline{-7,2570^\circ} \\ 0,9903/\underline{-11,0565^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_{14} = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9658 - 0,1237j \\ 0,9494 - 0,1822j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9737/\underline{-7,2993^\circ} \\ 0,9668/\underline{-10,8657^\circ} \end{bmatrix} \quad p.u.$$

$$\underline{V}_{15} = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9822 - 0,1185j \\ 0,9750 - 0,1808j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9894/\underline{-6,8818^\circ} \\ 0,9916/\underline{-10,5033^\circ} \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\underline{V}_{16} = \begin{bmatrix} 1,0000 - 0,0000j \\ 0,9663 - 0,1175j \\ 0,9524 - 0,1734j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9734/\underline{-6,9301^\circ} \\ 0,9681/\underline{-10,3175^\circ} \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

No passo 7, para cada vetor \underline{V}_a , encontrado no passo 6, o módulo da tensão das barras do tipo PV são fixadas nos valores especificados inicialmente para o caso base. Os vetores de tensões nodais, então, são:

$$\underline{V}_1 = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9912/\underline{-6,2312^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,3697^\circ} \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\underline{V}_2 = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9774/\underline{-6,2749^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,1890^\circ} \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\underline{V}_3 = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9908/\underline{-5,9088^\circ} \\ 0,9800/\underline{-9,8514^\circ} \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\underline{V}_4 = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9771/\underline{-5,9570^\circ} \\ 0,9800/\underline{-9,6738^\circ} \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\underline{V}_5 = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9893/\underline{-6,2335^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,3704^\circ} \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\underline{V}_6 = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9756/\underline{-6,2637^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,1808^\circ} \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\underline{V}_7 = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9891/\underline{-5,9105^\circ} \\ 0,9800/\underline{-9,8520^\circ} \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\underline{V}_8 = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9753/\underline{-5,9452^\circ} \\ 0,9694/\underline{-9,6655^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_9 = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9914/\underline{-7,2559^\circ} \\ 0,9800/\underline{-11,0570^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_{10} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9754/\underline{-7,3105^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,8743^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_{11} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9910/\underline{-6,8811^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,5037^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_{12} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9750/\underline{-6,9417^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,3260^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_{13} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9897/\underline{-7,2570^\circ} \\ 0,9800/\underline{-11,0565^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_{14} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9737/\underline{-7,2993^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,8657^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_{15} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9894/\underline{-6,8818^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,5033^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

$$\underline{V}_{16} = \begin{bmatrix} 1,0000/0^\circ \\ 0,9734/\underline{-6,9301^\circ} \\ 0,9800/\underline{-10,3175^\circ} \end{bmatrix} p.u.$$

No passo 8, os vetores \underline{V}_a , $a = 1, 2, 3, \dots, 16$, são comparados entre si e os menores e maiores valores de módulo de tensão e de ângulo de fase, para cada barra, definem as tensões intervalares resultantes e estão mostradas na Tabela 3. Os resultados da simulação de Monte Carlo (MC), com 10 mil amostras, também, são apresentados, a fim de validação.

Tabela 3 – Tensões nodais intervalares do sistema-exemplo de 3 barras com incerteza de $\pm 10\%$ na linha 1 – 2 e na carga da barra 2

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	2	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(0,0000; 0,0000)	(0,0000; 0,0000)
2	0	(0,9805; 0,9849)	(0,9734; 0,9914)	(-7,3329; -5,8915)	(-7,3105; -5,9088)
3	1	(0,9800; 0,9800)	(0,9800; 0,9800)	(-10,8569; -9,8741)	(-11,0570; -9,6655)

Os fluxos nas linhas P_{km} e as perdas P_{perdas} também são calculados, utilizando as equações (3.21) e (3.23), no passo 7 e, no passo 8, são comparados entre si e os menores e maiores valores de fluxo de potência e de perdas, para cada linha, definem os fluxos de potência e perdas intervalares resultantes. Os seguintes valores intervalares são obtidos com os métodos propostos e com a simulação de MC, com 10 mil amostras:

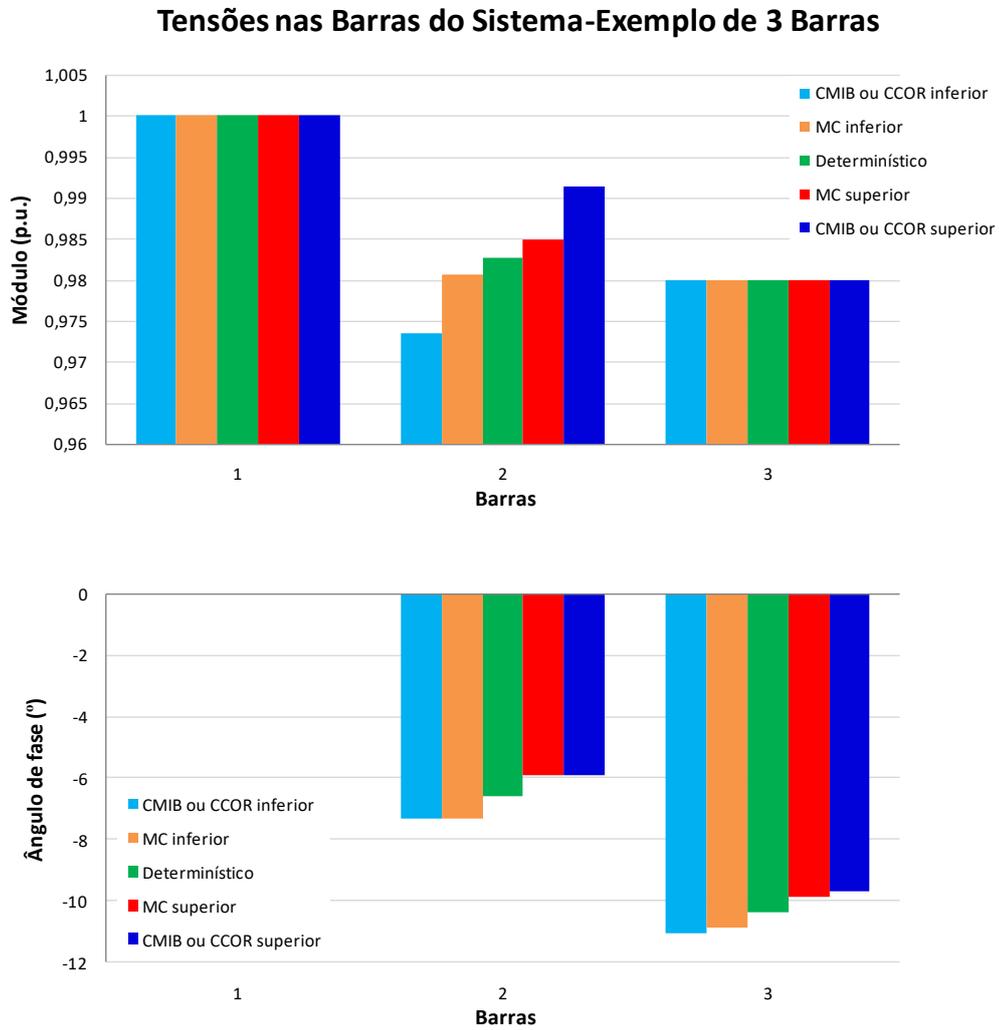
Tabela 4 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-exemplo de 3 barras com incerteza de $\pm 10\%$ na linha 1 – 2 e na carga da barra 2

Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (p.u.)		Perda Ativa (p.u.)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	2	(0,10210; 0,12666)	(0,10242; 0,12611)	(0,00105; 0,00162)	(0,00105; 0,00163)
1	3	(0,08490; 0,09324)	(0,08313; 0,09493)	(0,00146; 0,00176)	(0,00140; 0,00182)
2	3	(0,05887; 0,06701)	(0,05534; 0,07075)	(0,00036; 0,00046)	(0,00033; 0,00051)

O algoritmo, então, chega ao fim.

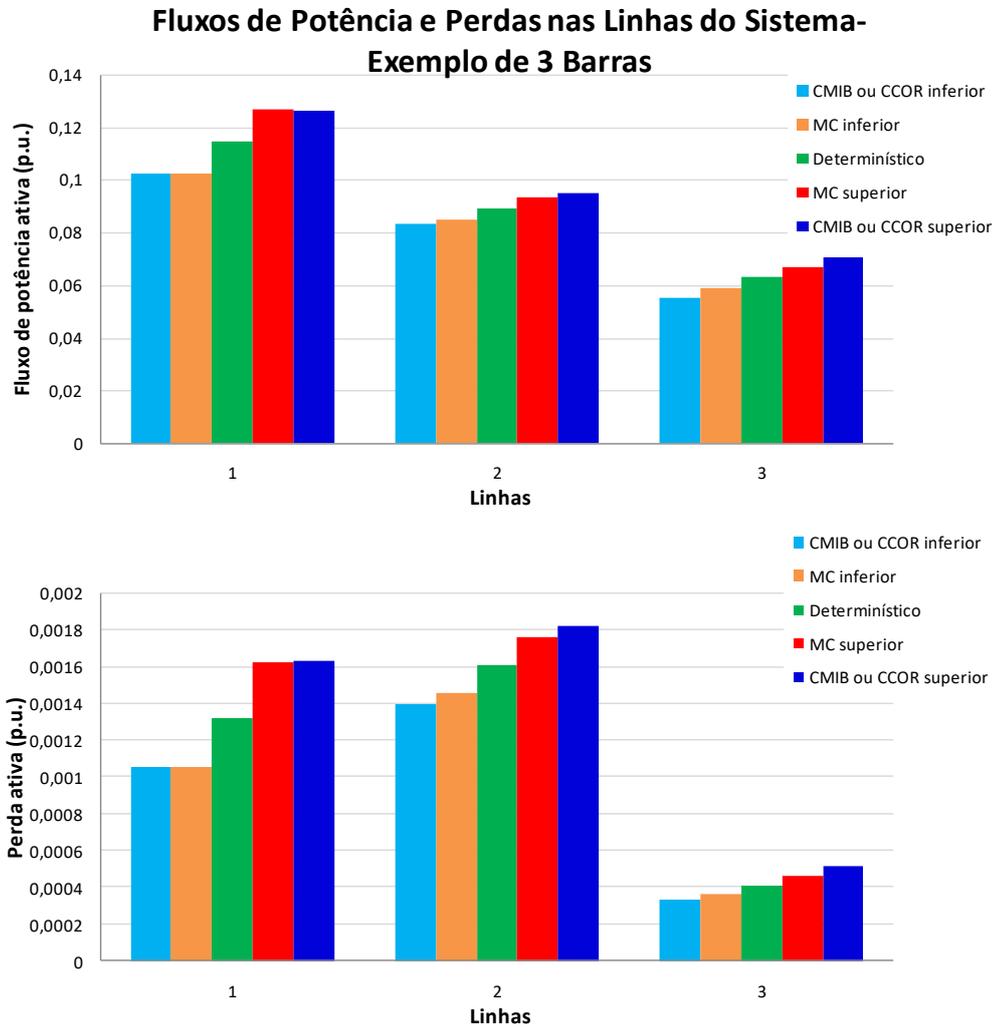
Os resultados de tensão, apresentados na Tabela 3, podem ser observados nos gráficos da Figura 9.

Figura 9 – Tensões nodais intervalares do sistema-exemplo de 3 barras com incerteza de $\pm 10\%$ na linha 1 – 2 e na carga da barra 2.



Os resultados de fluxo de potência e perda ativas, apresentados na Tabela 4, podem ser observados nos gráficos da Figura 10.

Figura 10 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-exemplo de 3 barras com incerteza de $\pm 10\%$ na linha 1 – 2 e na carga da barra 2.



Conforme mostrado nas Tabelas 3 e 4 e nas Figuras 9 e 10, para todas as variáveis em análise, todos os limites inferiores gerados via CMIB ou CCOR são menores que os respectivos limites gerados via simulação de MC e todos os limites superiores gerados via CMIB ou CCOR são maiores que os respectivos limites gerados via simulação de MC, como desejado.

4 RESULTADOS

Os métodos apresentados, no Capítulo 3, para análise do fluxo de potência sujeito às incertezas, Compensação da Matriz Impedância de Barras (CMIB) e Compensação de Correntes (CCOR), são desenvolvidos em Matlab e simulados com os dados dos seguintes sistemas-testes: brasileiro de 33 barras, IEEE de 57 barras, brasileiro de 107 barras.

Os valores de operação em regime permanente para o caso base determinístico, assim como a topologia, desses sistemas são extraídos de [38] e [39] e encontram-se no Anexo A.

Para cada sistema, diferentes cenários são simulados: incertezas sobre todas as linhas; incertezas sobre todas as cargas; e incertezas sobre todas as linhas e todas as cargas. Em todos os cenários, as incertezas são $\pm 3\%$ nos parâmetros citados. Este valor de incerteza é aleatório, escolhido, apenas, para testar os métodos.

Todos os resultados obtidos com os métodos propostos são comparados com aqueles gerados pela simulação de Monte Carlo (MC), a fim de validação. Na simulação de MC, 10 mil amostras são utilizadas.

Os resultados intervalares das variáveis do fluxo de potência, tensão nas barras e fluxo de potência ativa e de perda ativa nas linhas, estão apresentados nas seções 4.1, por meio de tabelas e gráficos. Apenas alguns resultados são expostos, devido ao grande número de barras e linhas dos sistemas.

Nos gráficos, os limites inferiores das faixas geradas via CMIB ou CCOR estão representados pela cor azul claro, os limites inferiores das faixas geradas via simulação de MC estão representados pela cor laranja, os resultados do problema determinístico estão representados pela cor verde, os limites superiores das faixas geradas via simulação de MC estão representados pela cor vermelha e os limites superiores das faixas geradas via CMIB ou CCOR estão representados pela cor azul escuro. Comentários sobre esses resultados estão dados ao final de cada uma das subseções referentes aos sistemas.

O desejado é que os limites inferiores gerados via CMIB ou CCOR sejam ligeiramente menores que os respectivos limites gerados via simulação de MC e que os limites superiores gerados via CMIB ou CCOR sejam ligeiramente maiores que os respectivos limites gerados via simulação de MC.

Os tempos médios de processamento computacional demandados pelas duas metodologias propostas, assim como a razão entre eles, estão apresentados na seção 4.2.

4.1 RESULTADOS NUMÉRICOS DAS VARIÁVEIS DO FLUXO DE POTÊNCIA

4.1.1 Sistema-Teste Brasileiro de 33 Barras

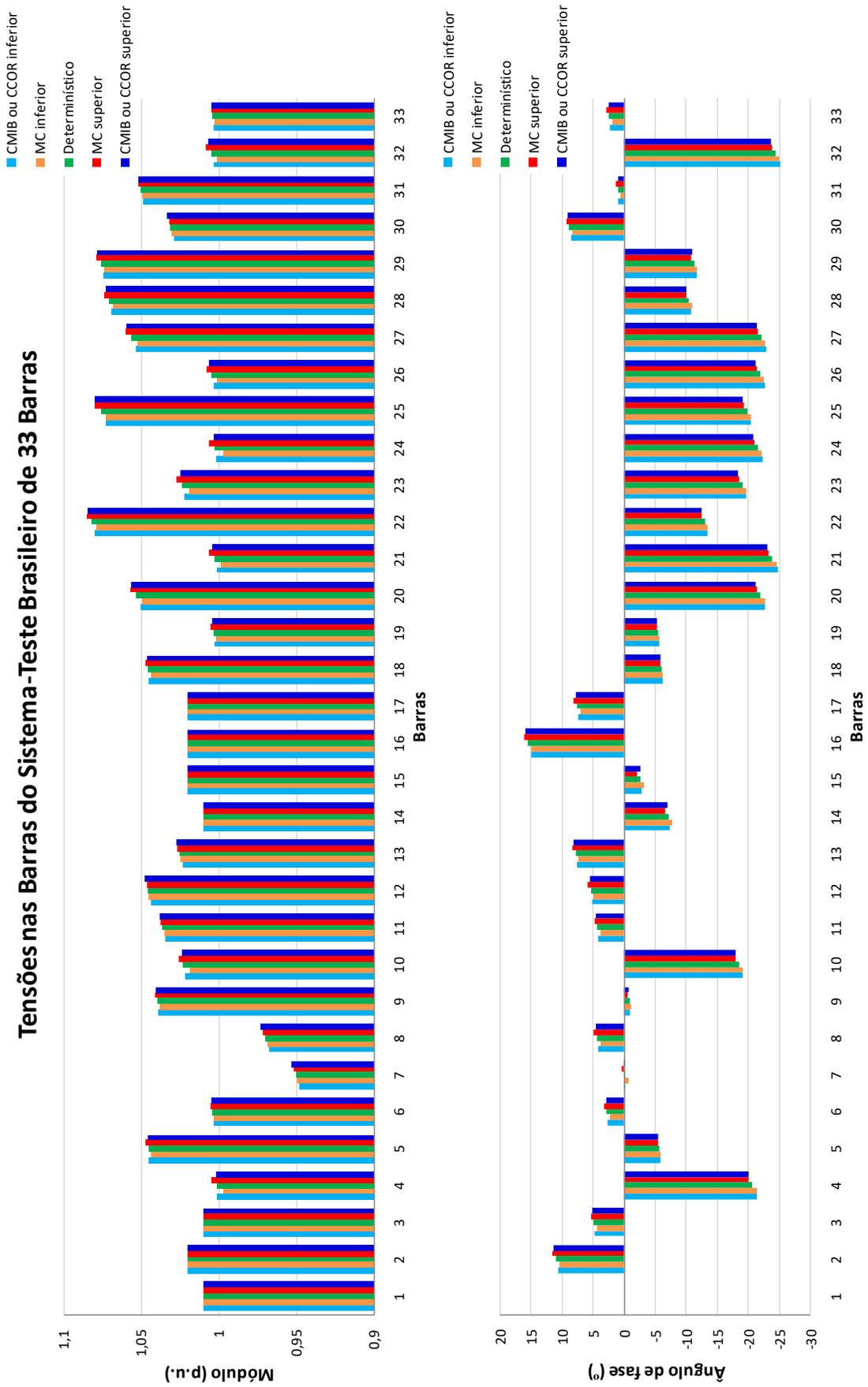
4.1.1.1 Incerteza sobre Todas as Linhas

As tensões nodais intervalares, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas do sistema, estão mostradas na Tabela 5 e nos gráficos da Figura 11.

Tabela 5 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
800 (1)	2	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(0,0000; 0,0000)	(0,0000; 0,0000)
808 (2)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(10,4991; 11,6098)	(10,6741; 11,3925)
810 (3)	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(4,4529; 5,3913)	(4,7469; 5,0892)
814 (4)	0	(0,9967; 1,0048)	(1,0005; 1,0018)	(-21,3696; -20,1574)	(-21,4418; -20,0464)
824 (5)	0	(1,0430; 1,0469)	(1,0445; 1,0456)	(-5,9117; -5,5448)	(-5,9203; -5,5347)
839 (6)	0	(1,0027; 1,0052)	(1,0032; 1,0048)	(2,3985; 3,3147)	(2,7288; 2,9544)
840 (7)	0	(0,9491; 0,9517)	(0,9476; 0,9532)	(-0,6891; 0,3617)	(-0,2101; -0,1782)
848 (8)	0	(0,9686; 0,9713)	(0,9673; 0,9725)	(3,9018; 4,9940)	(4,2832; 4,5867)
856 (9)	0	(1,0382; 1,0410)	(1,0388; 1,0405)	(-1,1568; -0,4814)	(-0,8516; -0,7915)
895 (10)	0	(1,0181; 1,0260)	(1,0215; 1,0234)	(-19,1450; -18,0313)	(-19,2069; -17,9572)
896 (11)	0	(1,0351; 1,0369)	(1,0345; 1,0377)	(3,8891; 4,8400)	(4,2221; 4,5209)
897 (12)	0	(1,0446; 1,0461)	(1,0433; 1,0475)	(4,9289; 5,8632)	(5,2348; 5,5894)
898 (13)	0	(1,0240; 1,0262)	(1,0231; 1,0271)	(7,3687; 8,3476)	(7,6160; 8,1420)
904 (14)	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(-7,6868; -6,5855)	(-7,3992; -6,9208)
915 (15)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(-3,2735; -1,9700)	(-2,7196; -2,5296)
919 (16)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(14,9714; 16,1853)	(15,0746; 16,0771)
925 (17)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(7,1070; 8,1349)	(7,3704; 7,8659)
933 (18)	0	(1,0432; 1,0473)	(1,0448; 1,0460)	(-6,2188; -5,8431)	(-6,2342; -5,8295)
934 (19)	0	(1,0012; 1,0051)	(1,0026; 1,0039)	(-5,7210; -5,2992)	(-5,6879; -5,3226)
938 (20)	0	(1,0492; 1,0566)	(1,0502; 1,0559)	(-22,7475; -21,4581)	(-22,7928; -21,3378)
939 (21)	0	(0,9989; 1,0061)	(1,0010; 1,0042)	(-24,7225; -23,3914)	(-24,7895; -23,2167)
955 (22)	0	(1,0791; 1,0850)	(1,0796; 1,0844)	(-13,4648; -12,5174)	(-13,4260; -12,5600)
959 (23)	0	(1,0190; 1,0271)	(1,0223; 1,0246)	(-19,7147; -18,5775)	(-19,7771; -18,4915)
960 (24)	0	(0,9971; 1,0062)	(1,0013; 1,0028)	(-22,2786; -21,0847)	(-22,4086; -20,9436)
964 (25)	0	(1,0725; 1,0794)	(1,0727; 1,0794)	(-20,5485; -19,2995)	(-20,5601; -19,2515)
965 (26)	0	(1,0009; 1,0076)	(1,0029; 1,0058)	(-22,6799; -21,4139)	(-22,7443; -21,3120)
976 (27)	0	(1,0524; 1,0601)	(1,0532; 1,0594)	(-22,8394; -21,5574)	(-22,9229; -21,4590)
995 (28)	0	(1,0682; 1,0734)	(1,0689; 1,0725)	(-10,9260; -9,9514)	(-10,7981; -10,0973)
1030 (29)	0	(1,0734; 1,0788)	(1,0740; 1,0780)	(-11,7510; -10,8214)	(-11,6629; -10,9056)
1047 (30)	0	(1,0301; 1,0321)	(1,0288; 1,0336)	(8,4099; 9,3927)	(8,6301; 9,2178)
1060 (31)	0	(1,0490; 1,0516)	(1,0489; 1,0518)	(0,5715; 1,3654)	(0,9371; 0,9947)
1210 (32)	0	(1,0008; 1,0085)	(1,0028; 1,0066)	(-25,0832; -23,8272)	(-25,2512; -23,6396)
2458 (33)	0	(1,0024; 1,0049)	(1,0030; 1,0045)	(2,0215; 2,9400)	(2,3608; 2,5616)

Figura 11 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.

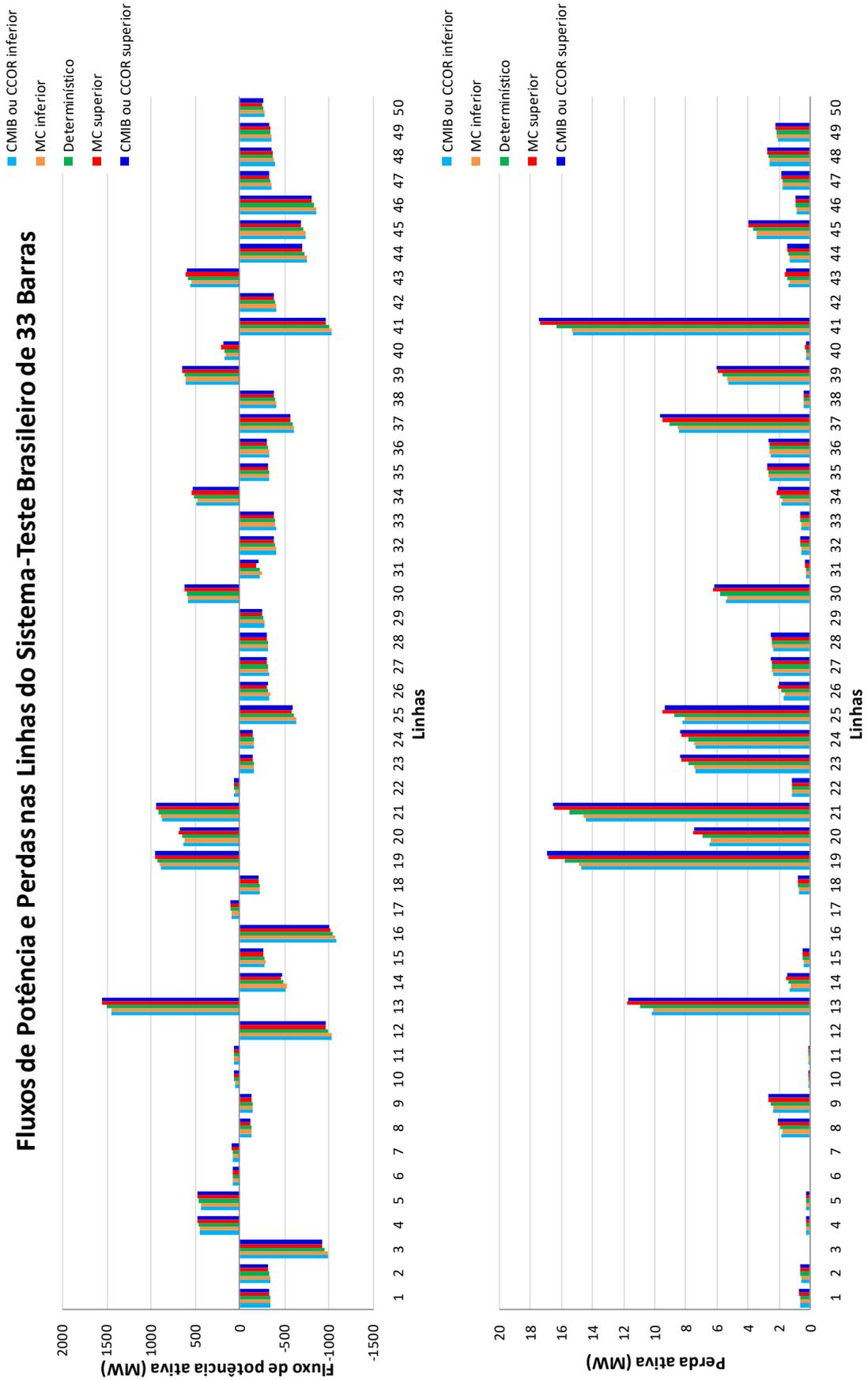


Os fluxos de potência e as perdas, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas do sistema, estão mostrados na Tabela 6 e nos gráficos da Figura 12.

Tabela 6 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas

Linha	Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (MW)		Perda Ativa (MW)	
			MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	814	895	(-350,34; -330,57)	(-352,35; -328,73)	(0,595; 0,648)	(0,591; 0,653)
2	814	895	(-344,03; -324,60)	(-346,00; -322,78)	(0,540; 0,588)	(0,536; 0,592)
3	824	800	(-993,50; -932,56)	(-995,92; -930,23)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
4	824	933	(449,14; 476,75)	(447,60; 478,04)	(0,188; 0,212)	(0,187; 0,213)
5	824	933	(442,13; 469,31)	(440,62; 470,58)	(0,182; 0,205)	(0,181; 0,206)
6	839	840	(77,02; 81,74)	(76,95; 81,80)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
7	839	840	(81,31; 86,29)	(81,23; 86,35)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
8	839	898	(-135,47; -124,25)	(-134,00; -125,67)	(1,733; 2,060)	(1,772; 2,014)
9	839	1047	(-148,71; -138,17)	(-148,00; -138,86)	(2,311; 2,681)	(2,337; 2,654)
10	839	2458	(55,06; 64,08)	(57,43; 61,66)	(0,068; 0,092)	(0,074; 0,085)
11	839	2458	(58,93; 68,60)	(61,50; 65,96)	(0,059; 0,081)	(0,065; 0,074)
12	856	810	(-1029,99; -970,01)	(-1035,43; -964,79)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
13	856	933	(1442,21; 1552,92)	(1445,49; 1550,10)	(10,082; 11,728)	(10,172; 11,632)
14	856	1060	(-531,30; -461,67)	(-514,69; -480,67)	(1,174; 1,519)	(1,257; 1,443)
15	896	897	(-291,40; -262,67)	(-285,02; -268,68)	(0,375; 0,454)	(0,388; 0,440)
16	897	808	(-1080,03; -1017,10)	(-1083,39; -1013,74)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
17	898	848	(94,97; 100,84)	(94,81; 101,00)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
18	898	1047	(-233,38; -211,36)	(-228,74; -214,71)	(0,650; 0,791)	(0,671; 0,760)
19	933	895	(893,94; 948,79)	(888,60; 952,18)	(14,825; 16,835)	(14,728; 16,859)
20	933	955	(624,83; 682,68)	(630,39; 677,11)	(6,334; 7,510)	(6,450; 7,401)
21	933	959	(886,39; 937,12)	(879,16; 942,15)	(14,574; 16,449)	(14,419; 16,507)
22	934	933	(54,05; 70,25)	(59,58; 65,37)	(1,105; 1,149)	(1,089; 1,165)
23	934	1047	(-161,17; -153,38)	(-162,62; -152,02)	(7,411; 8,241)	(7,310; 8,358)
24	934	1047	(-161,38; -153,58)	(-162,83; -152,21)	(7,420; 8,251)	(7,319; 8,368)
25	938	955	(-640,68; -591,23)	(-637,15; -592,83)	(8,024; 9,489)	(8,147; 9,308)
26	938	959	(-351,73; -302,48)	(-335,48; -315,88)	(1,600; 2,052)	(1,689; 1,942)
27	939	938	(-325,91; -308,86)	(-328,31; -306,80)	(2,381; 2,431)	(2,330; 2,486)
28	939	938	(-322,69; -305,83)	(-325,08; -303,79)	(2,403; 2,454)	(2,352; 2,509)
29	939	938	(-274,48; -259,18)	(-276,40; -257,60)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
30	955	964	(575,49; 621,75)	(576,92; 620,06)	(5,295; 6,218)	(5,365; 6,140)
31	959	895	(-257,18; -193,28)	(-231,08; -216,04)	(0,187; 0,331)	(0,233; 0,268)
32	960	959	(-407,39; -383,63)	(-410,24; -381,04)	(0,550; 0,623)	(0,548; 0,625)
33	960	959	(-406,19; -382,51)	(-409,04; -379,92)	(0,530; 0,600)	(0,528; 0,602)

Figura 12 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.



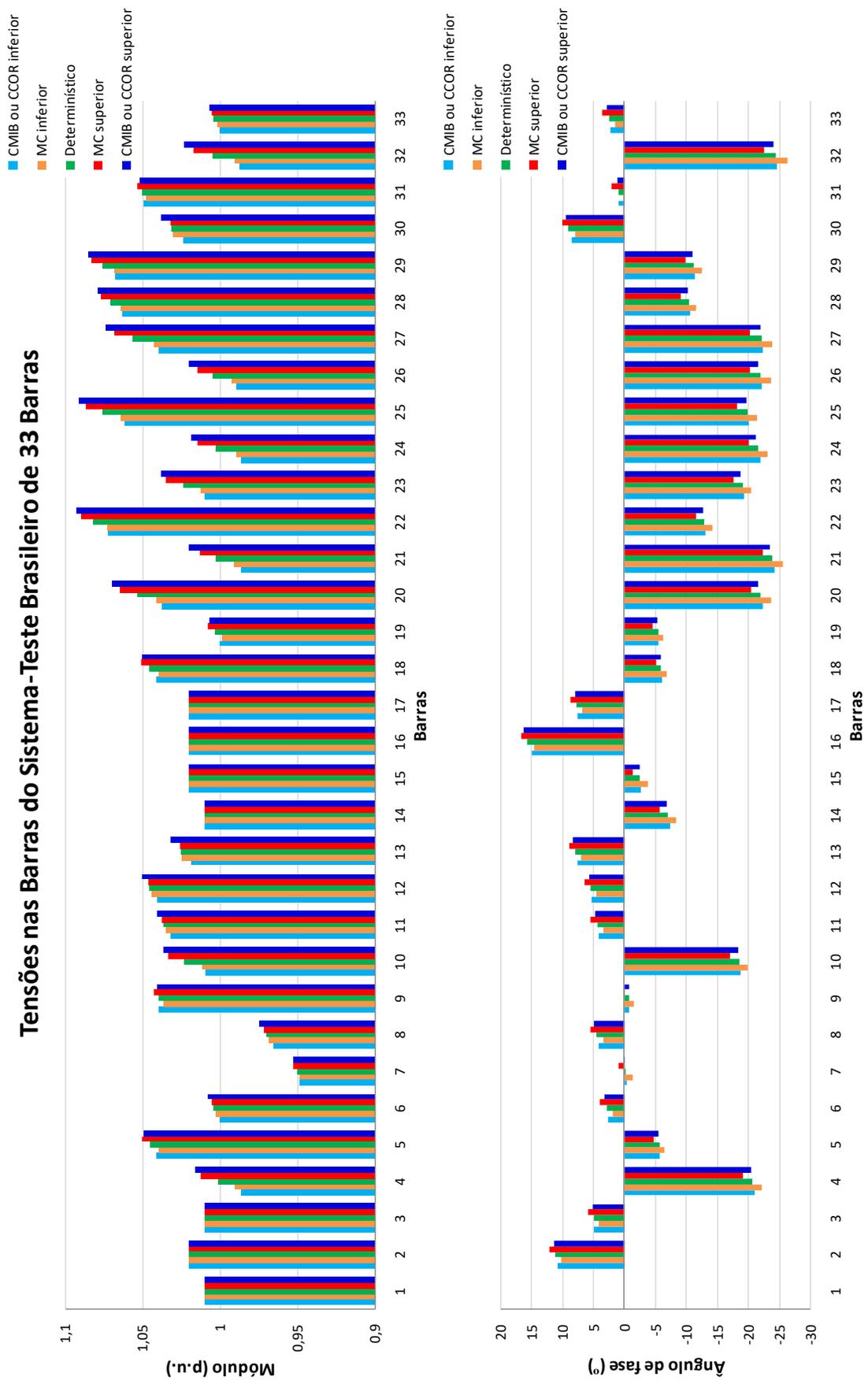
4.1.1.2 Incerteza sobre Todas as Cargas

As tensões nodais intervalares, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas do sistema, estão mostradas na Tabela 7 e nos gráficos da Figura 13.

Tabela 7 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
800 (1)	2	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(0,0000; 0,0000)	(0,0000; 0,0000)
808 (2)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(10,0733; 12,0572)	(10,7114; 11,3662)
810 (3)	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(4,0879; 5,8475)	(4,8622; 4,9684)
814 (4)	0	(0,9901; 1,0124)	(0,9865; 1,0161)	(-22,1996; -19,2318)	(-21,0277; -20,4489)
824 (5)	0	(1,0396; 1,0499)	(1,0410; 1,0493)	(-6,4640; -4,8934)	(-5,8206; -5,6362)
839 (6)	0	(1,0022; 1,0057)	(1,0003; 1,0077)	(1,7682; 3,9035)	(2,5984; 3,0834)
840 (7)	0	(0,9484; 0,9523)	(0,9483; 0,9525)	(-1,3521; 0,9429)	(-0,4414; 0,0477)
848 (8)	0	(0,9685; 0,9713)	(0,9652; 0,9744)	(3,3230; 5,5014)	(4,0486; 4,8236)
856 (9)	0	(1,0364; 1,0425)	(1,0393; 1,0400)	(-1,6641; 0,1213)	(-0,8510; -0,7938)
895 (10)	0	(1,0113; 1,0335)	(1,0091; 1,0362)	(-19,9395; -17,1693)	(-18,7980; -18,3547)
896 (11)	0	(1,0345; 1,0375)	(1,0317; 1,0403)	(3,3722; 5,4074)	(4,1789; 4,5657)
897 (12)	0	(1,0440; 1,0466)	(1,0405; 1,0501)	(4,4469; 6,4414)	(5,2323; 5,5942)
898 (13)	0	(1,0239; 1,0261)	(1,0184; 1,0315)	(6,8675; 8,8877)	(7,4936; 8,2693)
904 (14)	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(-8,4118; -5,8043)	(-7,4555; -6,8684)
915 (15)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(-3,8219; -1,3212)	(-2,7900; -2,4609)
919 (16)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(14,5893; 16,5711)	(14,9782; 16,1939)
925 (17)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(6,6980; 8,6388)	(7,4504; 7,7919)
933 (18)	0	(1,0397; 1,0505)	(1,0411; 1,0498)	(-6,8077; -5,1536)	(-6,1295; -5,9359)
934 (19)	0	(0,9983; 1,0079)	(0,9999; 1,0067)	(-6,2928; -4,5761)	(-5,5631; -5,4506)
938 (20)	0	(1,0410; 1,0641)	(1,0369; 1,0695)	(-23,6745; -20,4770)	(-22,3806; -21,7380)
939 (21)	0	(0,9911; 1,0133)	(0,9861; 1,0195)	(-25,7161; -22,3393)	(-24,3941; -23,6006)
955 (22)	0	(1,0730; 1,0896)	(1,0720; 1,0923)	(-14,2591; -11,6555)	(-13,1832; -12,8026)
959 (23)	0	(1,0119; 1,0347)	(1,0097; 1,0377)	(-20,5310; -17,6943)	(-19,3585; -18,8984)
960 (24)	0	(0,9898; 1,0142)	(0,9865; 1,0181)	(-23,2063; -20,1140)	(-21,9614; -21,3785)
964 (25)	0	(1,0635; 1,0866)	(1,0612; 1,0913)	(-21,5612; -18,2315)	(-20,0989; -19,7094)
965 (26)	0	(0,9924; 1,0142)	(0,9891; 1,0201)	(-23,7914; -20,2723)	(-22,2872; -21,7567)
976 (27)	0	(1,0423; 1,0682)	(1,0396; 1,0735)	(-23,9837; -20,4055)	(-22,4149; -21,9535)
995 (28)	0	(1,0639; 1,0765)	(1,0628; 1,0789)	(-11,7174; -9,0807)	(-10,6686; -10,2279)
1030 (29)	0	(1,0685; 1,0824)	(1,0673; 1,0849)	(-12,5427; -9,9413)	(-11,4872; -11,0818)
1047 (30)	0	(1,0301; 1,0321)	(1,0239; 1,0382)	(7,9320; 9,9232)	(8,5170; 9,3377)
1060 (31)	0	(1,0475; 1,0527)	(1,0492; 1,0515)	(0,0334; 1,9983)	(0,9469; 0,9841)
1210 (32)	0	(0,9904; 1,0169)	(0,9869; 1,0229)	(-26,3699; -22,5639)	(-24,7326; -24,1447)
2458 (33)	0	(1,0019; 1,0054)	(1,0002; 1,0072)	(1,3888; 3,5271)	(2,2365; 2,6841)

Figura 13 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.

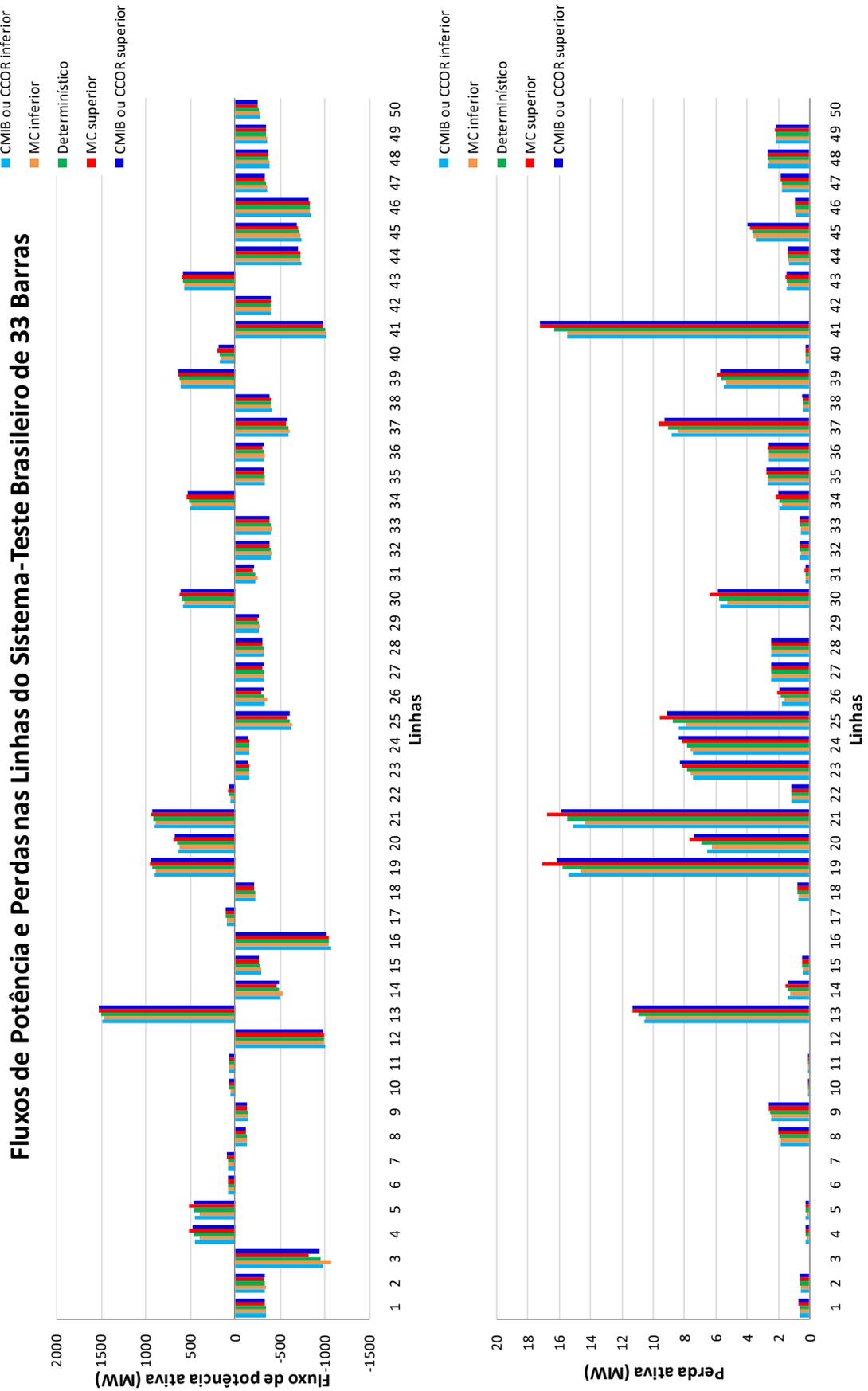


Os fluxos de potência e as perdas, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas do sistema, estão mostrados na Tabela 8 e nos gráficos da Figura 14.

Tabela 8 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas

Linha	Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (MW)		Perda Ativa (MW)	
			MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	814	895	(-350,58; -330,46)	(-345,07; -336,04)	(0,593; 0,651)	(0,596; 0,647)
2	814	895	(-344,27; -324,48)	(-338,86; -329,96)	(0,538; 0,591)	(0,540; 0,587)
3	824	800	(-1082,28; -826,38)	(-982,29; -944,36)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
4	824	933	(397,13; 520,14)	(453,86; 472,07)	(0,148; 0,252)	(0,192; 0,209)
5	824	933	(390,96; 512,00)	(446,76; 464,72)	(0,144; 0,244)	(0,186; 0,202)
6	839	840	(77,00; 81,76)	(77,79; 81,01)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
7	839	840	(81,28; 86,31)	(82,12; 85,52)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
8	839	898	(-132,90; -126,69)	(-132,36; -127,42)	(1,796; 1,988)	(1,820; 1,970)
9	839	1047	(-146,31; -140,45)	(-145,98; -141,00)	(2,385; 2,603)	(2,409; 2,588)
10	839	2458	(55,74; 63,48)	(57,03; 62,09)	(0,069; 0,090)	(0,072; 0,087)
11	839	2458	(59,69; 67,92)	(61,00; 66,50)	(0,061; 0,079)	(0,063; 0,076)
12	856	810	(-1000,00; -1000,00)	(-1014,12; -986,50)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
13	856	933	(1468,24; 1526,00)	(1476,98; 1518,87)	(10,473; 11,293)	(10,531; 11,294)
14	856	1060	(-526,00; -468,24)	(-508,71; -486,74)	(1,210; 1,486)	(1,316; 1,385)
15	896	897	(-291,47; -262,72)	(-287,15; -266,93)	(0,376; 0,454)	(0,385; 0,444)
16	897	808	(-1048,58; -1048,58)	(-1072,89; -1025,42)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
17	898	848	(94,97; 100,84)	(95,59; 100,29)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
18	898	1047	(-225,72; -217,81)	(-223,91; -219,72)	(0,688; 0,742)	(0,703; 0,730)
19	933	895	(891,33; 948,57)	(905,55; 935,41)	(14,595; 17,060)	(15,409; 16,164)
20	933	955	(614,83; 692,48)	(638,71; 668,95)	(6,203; 7,661)	(6,531; 7,334)
21	933	959	(881,68; 939,00)	(895,36; 926,15)	(14,283; 16,726)	(15,103; 15,808)
22	934	933	(52,28; 72,74)	(56,10; 68,75)	(1,098; 1,157)	(1,093; 1,161)
23	934	1047	(-159,94; -154,57)	(-161,13; -153,55)	(7,550; 8,090)	(7,400; 8,288)
24	934	1047	(-160,14; -154,76)	(-161,33; -153,75)	(7,559; 8,100)	(7,409; 8,299)
25	938	955	(-640,58; -587,82)	(-620,77; -609,04)	(7,907; 9,580)	(8,324; 9,122)
26	938	959	(-355,19; -293,96)	(-329,19; -322,16)	(1,614; 2,052)	(1,751; 1,881)
27	939	938	(-326,51; -308,54)	(-321,11; -313,97)	(2,374; 2,438)	(2,398; 2,417)
28	939	938	(-323,29; -305,52)	(-317,96; -310,88)	(2,396; 2,460)	(2,420; 2,440)
29	939	938	(-275,00; -258,95)	(-269,82; -264,14)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
30	955	964	(571,03; 625,30)	(586,75; 610,30)	(5,215; 6,328)	(5,639; 5,870)
31	959	895	(-252,41; -195,60)	(-229,49; -217,75)	(0,195; 0,318)	(0,240; 0,262)
32	960	959	(-407,46; -383,72)	(-404,45; -386,97)	(0,541; 0,634)	(0,566; 0,605)
33	960	959	(-406,26; -382,59)	(-403,28; -385,82)	(0,522; 0,611)	(0,545; 0,583)

Figura 14 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.



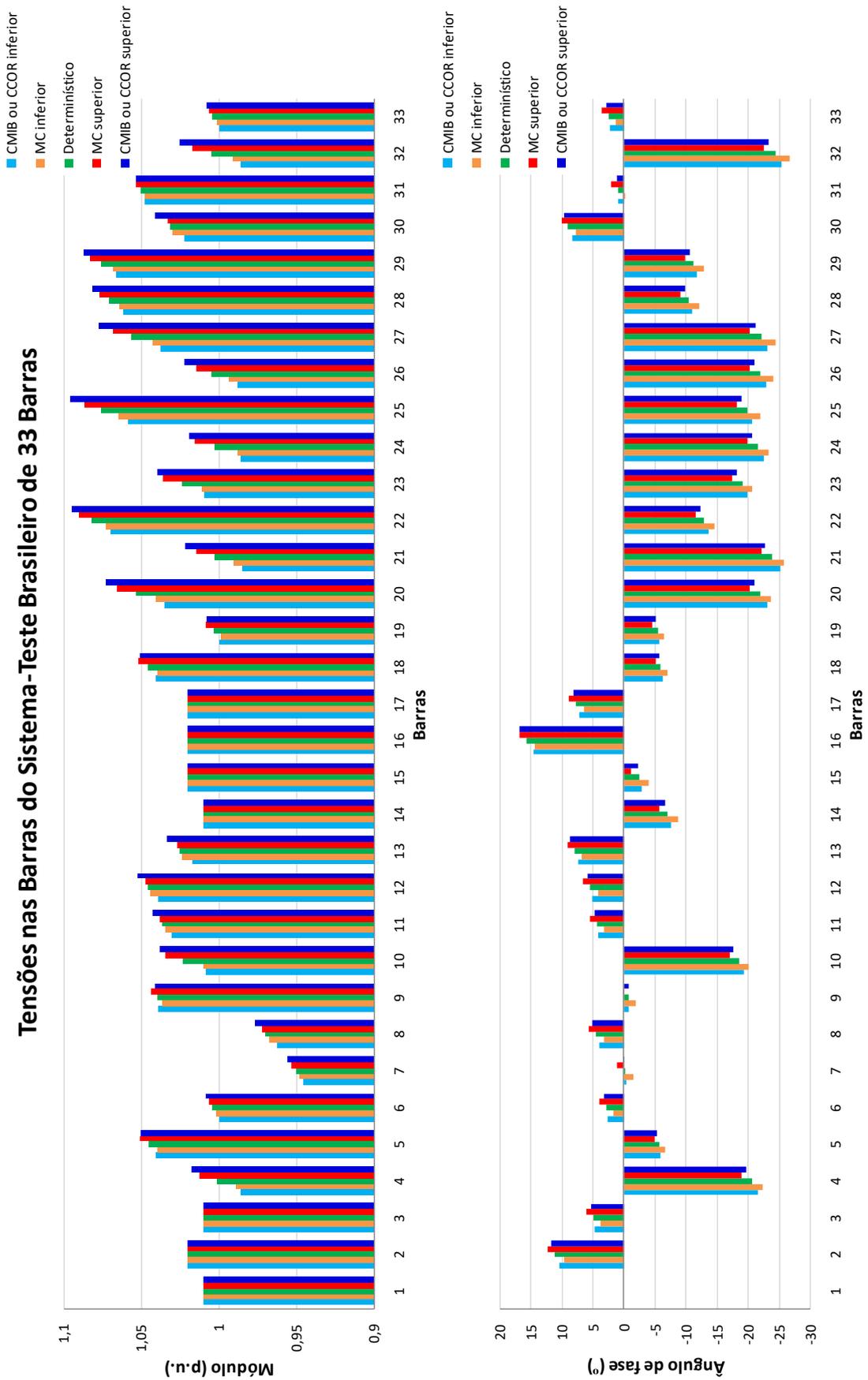
4.1.1.3 Incerteza sobre Todas as Linhas e Todas as Cargas

As tensões nodais intervalares, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas do sistema, estão mostradas na Tabela 9 e nos gráficos da Figura 15.

Tabela 9 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
800 (1)	2	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(0,0000; 0,0000)	(0,0000; 0,0000)
808 (2)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(9,6257; 12,2053)	(10,3689; 11,7436)
810 (3)	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(3,6896; 6,0115)	(4,6902; 5,1457)
814 (4)	0	(0,9886; 1,0125)	(0,9855; 1,0171)	(-22,4588; -19,1045)	(-21,7336; -19,7600)
824 (5)	0	(1,0397; 1,0506)	(1,0405; 1,0500)	(-6,6666; -4,9059)	(-6,0201; -5,4496)
839 (6)	0	(1,0013; 1,0064)	(0,9993; 1,0083)	(1,5787; 3,9772)	(2,4971; 3,2081)
840 (7)	0	(0,9476; 0,9530)	(0,9454; 0,9551)	(-1,5212; 1,0224)	(-0,4472; 0,0738)
848 (8)	0	(0,9677; 0,9718)	(0,9625; 0,9768)	(3,1774; 5,6165)	(3,9116; 4,9916)
856 (9)	0	(1,0366; 1,0430)	(1,0384; 1,0408)	(-1,9107; 0,1312)	(-0,8831; -0,7657)
895 (10)	0	(1,0102; 1,0340)	(1,0085; 1,0376)	(-20,1445; -17,0272)	(-19,4283; -17,7361)
896 (11)	0	(1,0343; 1,0379)	(1,0303; 1,0421)	(3,0816; 5,4289)	(4,0388; 4,7256)
897 (12)	0	(1,0439; 1,0468)	(1,0386; 1,0523)	(4,1643; 6,4651)	(5,0633; 5,7805)
898 (13)	0	(1,0232; 1,0266)	(1,0167; 1,0337)	(6,7332; 8,9830)	(7,2457; 8,5484)
904 (14)	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(-8,7350; -5,8433)	(-7,7080; -6,6419)
915 (15)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(-4,1213; -1,1834)	(-2,8922; -2,3727)
919 (16)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(14,3657; 16,7929)	(14,5020; 16,7221)
925 (17)	1	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(6,3004; 8,7839)	(7,2123; 8,0503)
933 (18)	0	(1,0398; 1,0512)	(1,0406; 1,0505)	(-7,0102; -5,1764)	(-6,3388; -5,7401)
934 (19)	0	(0,9982; 1,0082)	(0,9992; 1,0073)	(-6,5239; -4,6269)	(-5,7508; -5,2726)
938 (20)	0	(1,0404; 1,0649)	(1,0346; 1,0729)	(-23,8255; -20,3437)	(-23,1145; -21,0175)
939 (21)	0	(0,9905; 1,0141)	(0,9850; 1,0216)	(-25,8665; -22,1521)	(-25,1895; -22,8238)
955 (22)	0	(1,0730; 1,0902)	(1,0700; 1,0950)	(-14,6426; -11,6266)	(-13,6288; -12,3816)
959 (23)	0	(1,0109; 1,0355)	(1,0089; 1,0392)	(-20,6836; -17,5764)	(-20,0074; -18,2624)
960 (24)	0	(0,9881; 1,0152)	(0,9855; 1,0193)	(-23,3840; -19,9791)	(-22,7030; -20,6557)
964 (25)	0	(1,0641; 1,0868)	(1,0583; 1,0952)	(-21,9771; -18,2623)	(-20,7661; -19,0607)
965 (26)	0	(0,9930; 1,0146)	(0,9881; 1,0220)	(-24,1287; -20,3190)	(-23,0077; -21,0456)
976 (27)	0	(1,0427; 1,0682)	(1,0370; 1,0772)	(-24,4596; -20,4045)	(-23,1510; -21,2265)
995 (28)	0	(1,0638; 1,0769)	(1,0612; 1,0810)	(-12,1252; -9,1527)	(-11,0318; -9,8897)
1030 (29)	0	(1,0684; 1,0828)	(1,0656; 1,0872)	(-12,9674; -10,0105)	(-11,8784; -10,7152)
1047 (30)	0	(1,0293; 1,0325)	(1,0217; 1,0408)	(7,7758; 10,0340)	(8,2390; 9,6486)
1060 (31)	0	(1,0476; 1,0531)	(1,0477; 1,0530)	(-0,2119; 1,9654)	(0,9184; 1,0138)
1210 (32)	0	(0,9907; 1,0169)	(0,9856; 1,0254)	(-26,7671; -22,5449)	(-25,5454; -23,3465)
2458 (33)	0	(1,0010; 1,0061)	(0,9993; 1,0078)	(1,1822; 3,6103)	(2,1468; 2,7956)

Figura 15 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.

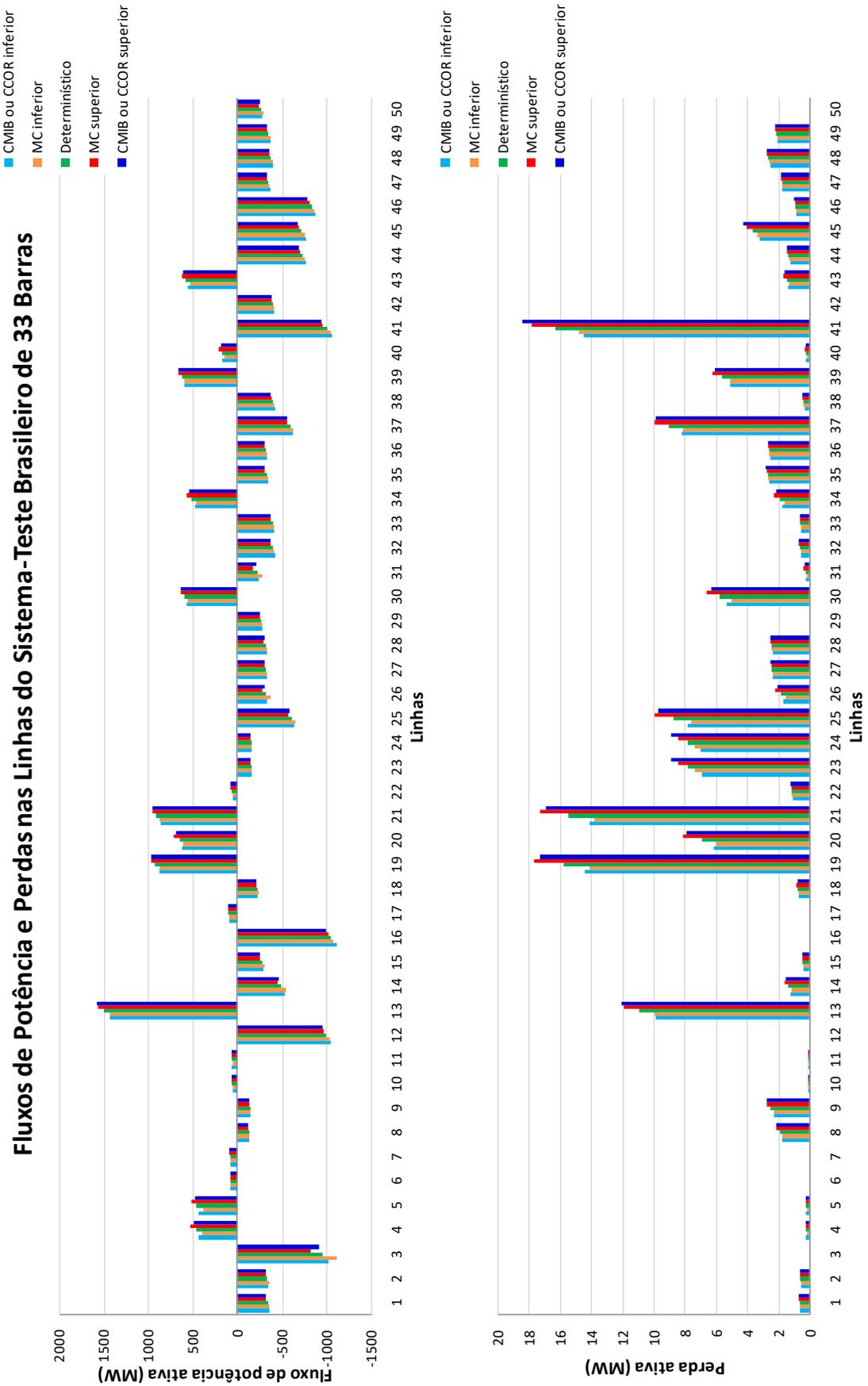


Os fluxos de potência e as perdas, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas do sistema, estão mostrados na Tabela 10 e nos gráficos da Figura 16.

Tabela 10 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas

Linha	Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (MW)		Perda Ativa (MW)	
			MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	814	895	(-360,12; -321,31)	(-357,27; -324,60)	(0,575; 0,674)	(0,566; 0,679)
2	814	895	(-353,65; -315,48)	(-350,86; -318,71)	(0,522; 0,611)	(0,514; 0,616)
3	824	800	(-1115,43; -828,36)	(-1016,48; -912,76)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
4	824	933	(394,76; 528,71)	(439,20; 487,89)	(0,146; 0,261)	(0,180; 0,222)
5	824	933	(388,63; 520,43)	(432,33; 480,29)	(0,142; 0,252)	(0,174; 0,215)
6	839	840	(75,00; 83,99)	(75,36; 83,44)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
7	839	840	(79,17; 88,67)	(79,56; 88,08)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
8	839	898	(-136,39; -122,57)	(-136,67; -123,40)	(1,687; 2,088)	(1,707; 2,099)
9	839	1047	(-149,35; -137,23)	(-150,71; -136,58)	(2,285; 2,701)	(2,260; 2,757)
10	839	2458	(53,69; 65,81)	(55,04; 64,32)	(0,064; 0,096)	(0,067; 0,093)
11	839	2458	(57,47; 70,41)	(58,89; 68,86)	(0,056; 0,085)	(0,059; 0,081)
12	856	810	(-1029,98; -970,01)	(-1050,88; -952,49)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
13	856	933	(1428,21; 1566,39)	(1426,47; 1573,11)	(9,899; 11,910)	(9,847; 12,075)
14	856	1060	(-545,31; -450,46)	(-526,34; -470,31)	(1,120; 1,599)	(1,228; 1,483)
15	896	897	(-301,96; -252,92)	(-295,41; -258,84)	(0,350; 0,487)	(0,360; 0,472)
16	897	808	(-1080,03; -1017,13)	(-1109,26; -992,03)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
17	898	848	(92,17; 103,77)	(92,51; 103,41)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
18	898	1047	(-234,32; -209,61)	(-231,11; -212,63)	(0,641; 0,798)	(0,661; 0,776)
19	933	895	(877,76; 966,71)	(874,72; 968,24)	(14,097; 17,675)	(14,376; 17,263)
20	933	955	(604,54; 711,44)	(616,35; 693,37)	(5,991; 8,113)	(6,096; 7,855)
21	933	959	(869,02; 955,12)	(864,83; 958,69)	(13,814; 17,299)	(14,090; 16,884)
22	934	933	(48,21; 76,57)	(53,50; 71,94)	(1,090; 1,166)	(1,058; 1,201)
23	934	1047	(-162,75; -152,26)	(-166,67; -148,48)	(7,304; 8,398)	(6,919; 8,860)
24	934	1047	(-162,96; -152,45)	(-166,88; -148,67)	(7,313; 8,409)	(6,927; 8,871)
25	938	955	(-654,95; -574,80)	(-643,50; -587,42)	(7,570; 9,961)	(7,774; 9,732)
26	938	959	(-368,90; -282,76)	(-339,28; -312,64)	(1,484; 2,197)	(1,633; 2,017)
27	939	938	(-333,36; -301,27)	(-332,21; -303,53)	(2,365; 2,451)	(2,322; 2,497)
28	939	938	(-330,06; -298,33)	(-328,94; -300,55)	(2,387; 2,473)	(2,344; 2,520)
29	939	938	(-281,36; -252,22)	(-279,51; -255,01)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
30	955	964	(557,47; 638,60)	(565,93; 632,68)	(4,955; 6,603)	(5,261; 6,280)
31	959	895	(-274,80; -176,83)	(-237,35; -210,57)	(0,159; 0,374)	(0,224; 0,281)
32	960	959	(-418,20; -372,78)	(-419,66; -372,94)	(0,513; 0,665)	(0,529; 0,645)
33	960	959	(-416,98; -371,68)	(-418,45; -371,83)	(0,494; 0,641)	(0,510; 0,622)

Figura 16 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 33 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.



4.1.1.4 Comentários

Incerteza em todas as linhas

A grande maioria dos intervalos de módulo e de ângulo de fase da tensão, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contempla os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Porém, para algumas barras, as faixas geradas pelos métodos propostos não abrangem integralmente as respectivas faixas estabelecidas pela simulação de MC. Por exemplo, para o módulo da tensão na barra 4, o limite inferior da faixa calculado pelos métodos propostos é 0,38% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 0,30% menor que o respectivo limite. Da mesma forma, para o ângulo de fase da tensão na barra 8, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 9,77% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 8,16% menor que o respectivo limite.

Todos os intervalos de fluxo de potência ativa e de perda ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contemplam os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC.

Incerteza em todas as cargas

A grande maioria dos intervalos de módulo da tensão, de fluxo de potência ativa e de perda ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contempla os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Porém, para algumas barras e linhas, as faixas geradas pelos métodos propostos não abrangem integralmente as respectivas faixas estabelecidas pela simulação de MC. Por exemplo, para o módulo da tensão na barra 9, o limite inferior da faixa calculado pelos métodos propostos é 0,28% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 0,24% menor que o respectivo limite. Da mesma forma, para o fluxo de potência na linha 3, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 9,24% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 14,28% menor que o respectivo limite. E para a perda na linha 19, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 5,58% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 5,25% menor que o respectivo limite.

Todos os intervalos de ângulo de fase da tensão, calculados via métodos CMIB ou CCOR, não abrangem integralmente os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Por exemplo, para a barra 21, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 5,14% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 5,64% menor que o respectivo limite.

Incerteza em todas as linhas e todas as cargas

A grande maioria dos intervalos de módulo da tensão, de fluxo de potência ativa e de

perda ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contempla os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Porém, para algumas barras e linhas, as faixas geradas pelos métodos propostos não abrangem integralmente as respectivas faixas estabelecidas pela simulação de MC. Por exemplo, para o módulo da tensão na barra 9, o limite inferior da faixa calculado pelos métodos propostos é 0,18% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 0,21% menor que o respectivo limite. Da mesma forma, para o fluxo de potência na linha 3, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 8,87% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 10,19% menor que o respectivo limite. E para a perda na linha 19, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 1,97% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 2,33% menor que o respectivo limite.

Todos os intervalos de ângulo de fase da tensão, calculados via métodos CMIB ou CCOR, não abrangem integralmente os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Por exemplo, para a barra 21, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 2,62% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 3,03% menor que o respectivo limite.

4.1.2 Sistema-Teste IEEE de 57 Barras

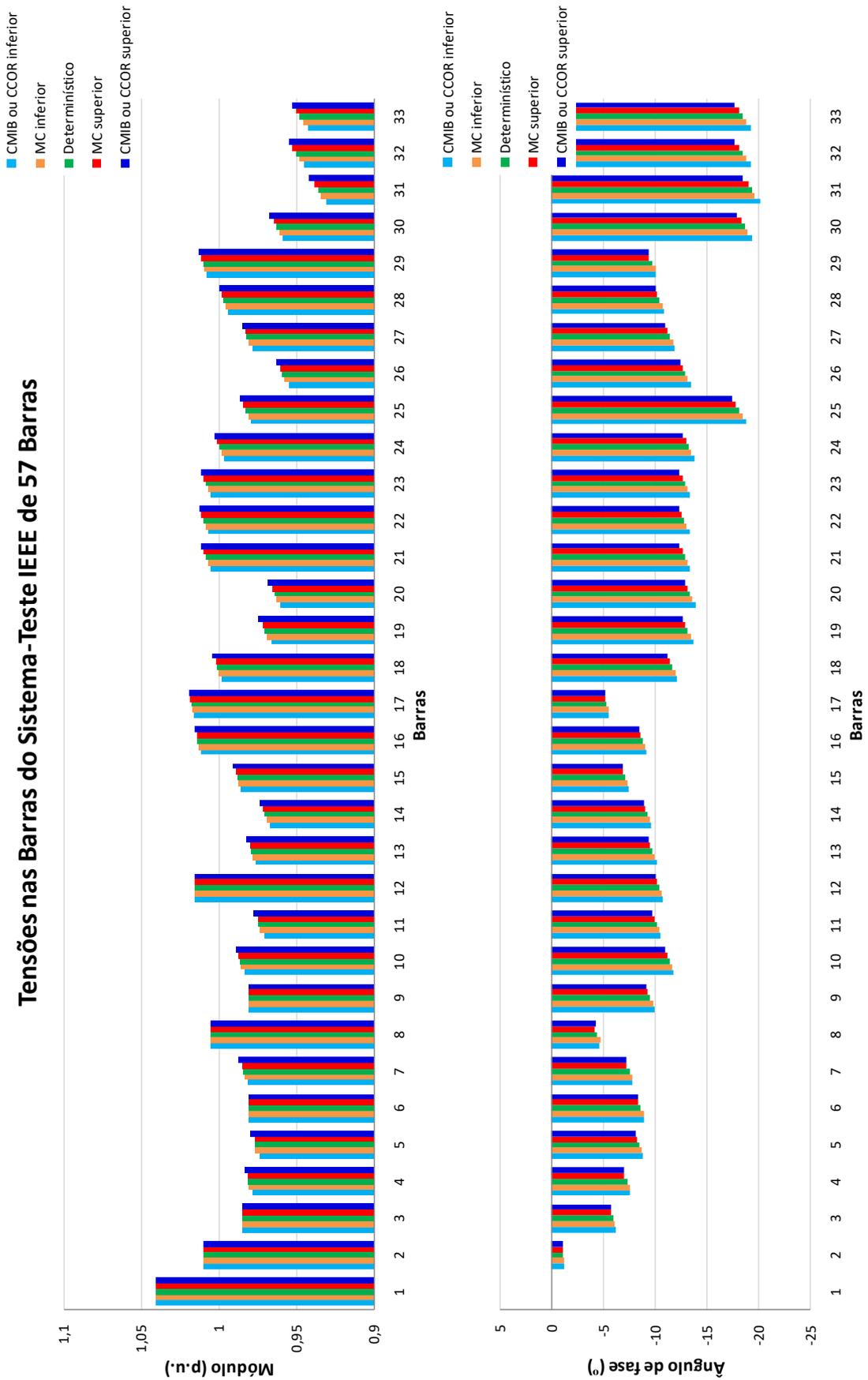
4.1.2.1 Incerteza sobre Todas as Linhas

As tensões nodais intervalares, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas do sistema, estão mostradas na Tabela 11 e nos gráficos da Figura 17.

Tabela 11 – Tensões intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	2	(1,0400; 1,0400)	(1,0400; 1,0400)	(0,0000; 0,0000)	(0,0000; 0,0000)
2	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(-1,2881; -1,1052)	(-1,2402; -1,1360)
3	1	(0,9850; 0,9850)	(0,9850; 0,9850)	(-6,1878; -5,7740)	(-6,2173; -5,7612)
4	0	(0,9805; 0,9810)	(0,9777; 0,9838)	(-7,5822; -7,0701)	(-7,6148; -7,0628)
5	0	(0,9762; 0,9767)	(0,9732; 0,9797)	(-8,7903; -8,2486)	(-8,8670; -8,2294)
6	1	(0,9800; 0,9800)	(0,9800; 0,9800)	(-8,9306; -8,3761)	(-8,9973; -8,3546)
7	0	(0,9837; 0,9846)	(0,9813; 0,9870)	(-7,8951; -7,3101)	(-7,8901; -7,3160)
8	1	(1,0050; 1,0050)	(1,0050; 1,0050)	(-4,7942; -4,1576)	(-4,6454; -4,3124)
9	1	(0,9800; 0,9800)	(0,9800; 0,9800)	(-9,8311; -9,3585)	(-9,9434; -9,2299)
10	0	(0,9855; 0,9871)	(0,9834; 0,9890)	(-11,6836; -11,2057)	(-11,8686; -11,0354)
11	0	(0,9735; 0,9744)	(0,9706; 0,9772)	(-10,4121; -9,9761)	(-10,5817; -9,8093)
12	1	(1,0150; 1,0150)	(1,0150; 1,0150)	(-10,6972; -10,2563)	(-10,8489; -10,0956)
13	0	(0,9781; 0,9797)	(0,9758; 0,9819)	(-10,0201; -9,5966)	(-10,1746; -9,4366)
14	0	(0,9692; 0,9711)	(0,9669; 0,9734)	(-9,5681; -9,1255)	(-9,7121; -8,9925)
15	0	(0,9873; 0,9888)	(0,9854; 0,9906)	(-7,3863; -6,9729)	(-7,4645; -6,9188)
16	0	(1,0127; 1,0140)	(1,0115; 1,0152)	(-9,0997; -8,6248)	(-9,1740; -8,5453)
17	0	(1,0167; 1,0182)	(1,0159; 1,0189)	(-5,5913; -5,1998)	(-5,5869; -5,2069)
18	0	(1,0001; 1,0013)	(0,9977; 1,0035)	(-12,0163; -11,4363)	(-12,1687; -11,2952)
19	0	(0,9691; 0,9712)	(0,9661; 0,9741)	(-13,5005; -12,9533)	(-13,7429; -12,7158)
20	0	(0,9627; 0,9650)	(0,9596; 0,9679)	(-13,6926; -13,1914)	(-13,9756; -12,9188)
21	0	(1,0072; 1,0098)	(1,0056; 1,0112)	(-13,1635; -12,6778)	(-13,4373; -12,4263)
22	0	(1,0083; 1,0111)	(1,0069; 1,0124)	(-13,1109; -12,6210)	(-13,3795; -12,3746)
23	0	(1,0069; 1,0097)	(1,0055; 1,0111)	(-13,1767; -12,6858)	(-13,4484; -12,4363)
24	0	(0,9977; 1,0006)	(0,9961; 1,0023)	(-13,5468; -13,0161)	(-13,8256; -12,7645)
25	0	(0,9807; 0,9842)	(0,9785; 0,9864)	(-18,4741; -17,8504)	(-18,8882; -17,4664)
26	0	(0,9573; 0,9601)	(0,9546; 0,9630)	(-13,2376; -12,7076)	(-13,5016; -12,4667)
27	0	(0,9804; 0,9827)	(0,9781; 0,9849)	(-11,8091; -11,2279)	(-11,9638; -11,0685)
28	0	(0,9957; 0,9976)	(0,9937; 0,9995)	(-10,7806; -10,2048)	(-10,8870; -10,0808)
29	0	(1,0093; 1,0111)	(1,0078; 1,0126)	(-10,0813; -9,4886)	(-10,1437; -9,4040)
30	0	(0,9607; 0,9647)	(0,9580; 0,9672)	(-19,0297; -18,3859)	(-19,4805; -17,9674)
31	0	(0,9338; 0,9381)	(0,9304; 0,9413)	(-19,6822; -19,0738)	(-20,2070; -18,5700)
32	0	(0,9474; 0,9525)	(0,9448; 0,9548)	(-18,8247; -18,1910)	(-19,2890; -17,7445)
33	0	(0,9451; 0,9502)	(0,9424; 0,9526)	(-18,8672; -18,2289)	(-19,3336; -17,7793)

Figura 17 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.

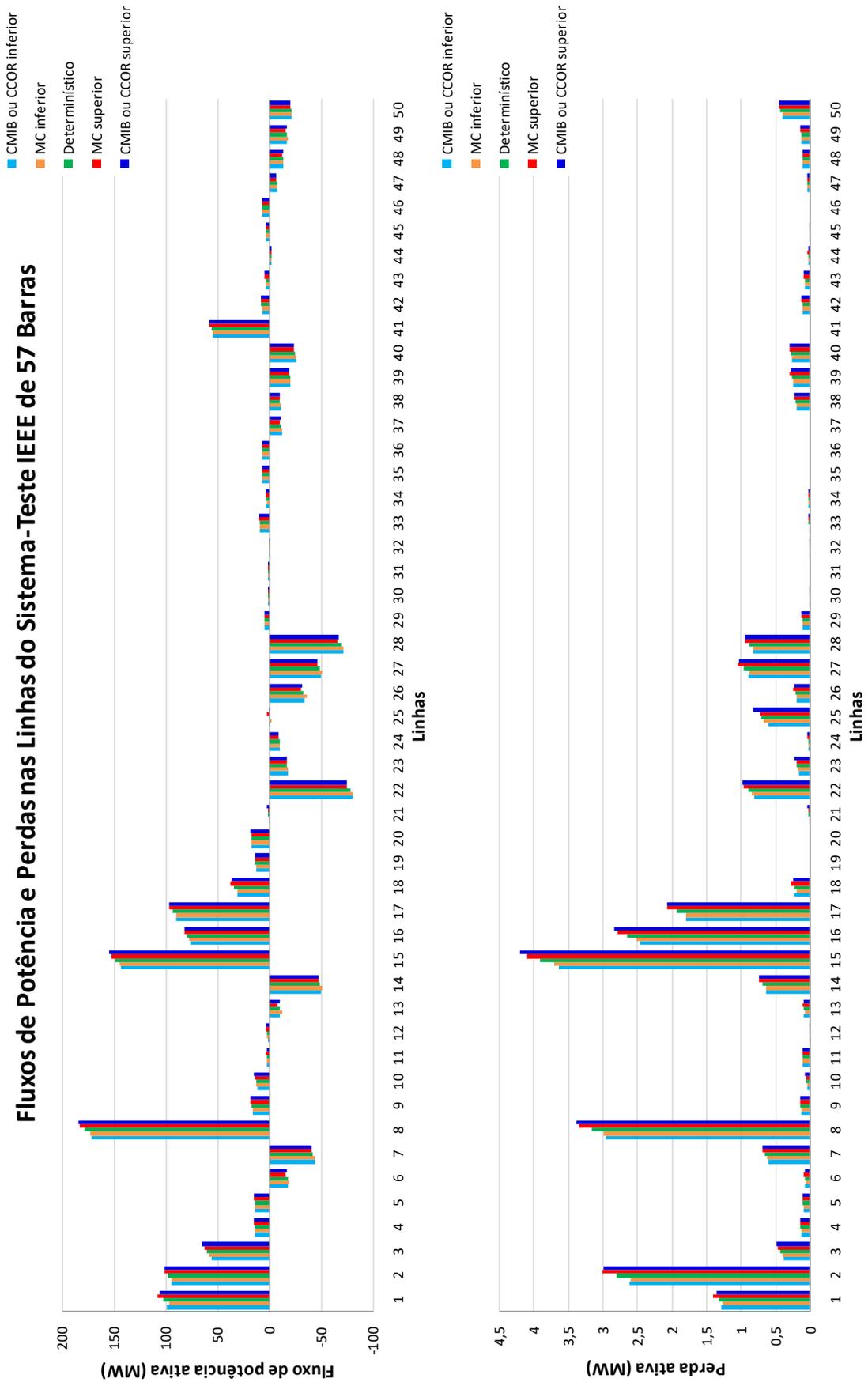


Os fluxos de potência e as perdas, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas do sistema, estão mostrados na Tabela 12 e nos gráficos da Figura 18.

Tabela 12 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas

Linha	Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (MW)		Perda Ativa (MW)	
			MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	1	2	(97,07; 108,14)	(98,93; 105,24)	(1,256; 1,392)	(1,278; 1,355)
2	2	3	(94,29; 101,36)	(94,51; 101,08)	(2,597; 3,002)	(2,610; 2,985)
3	3	4	(57,56; 62,66)	(56,05; 64,43)	(0,386; 0,460)	(0,383; 0,479)
4	4	5	(13,07; 14,47)	(13,33; 14,26)	(0,116; 0,144)	(0,121; 0,140)
5	4	6	(13,23; 15,08)	(13,87; 14,43)	(0,083; 0,108)	(0,089; 0,103)
6	6	7	(-19,36; -16,31)	(-18,17; -17,38)	(0,055; 0,078)	(0,063; 0,069)
7	6	8	(-43,76; -41,23)	(-43,97; -41,05)	(0,608; 0,681)	(0,603; 0,688)
8	8	9	(172,71; 183,30)	(171,74; 184,38)	(2,976; 3,341)	(2,944; 3,380)
9	9	10	(16,46; 17,89)	(16,17; 18,19)	(0,123; 0,143)	(0,125; 0,141)
10	9	11	(12,12; 13,67)	(11,46; 14,37)	(0,042; 0,053)	(0,035; 0,067)
11	9	12	(2,03; 3,05)	(2,34; 2,76)	(0,101; 0,108)	(0,103; 0,105)
12	9	13	(1,72; 2,93)	(1,70; 2,95)	(0,001; 0,004)	(0,002; 0,006)
13	13	14	(-12,21; -8,38)	(-10,72; -9,99)	(0,077; 0,098)	(0,082; 0,092)
14	13	15	(-50,63; -47,21)	(-50,52; -47,26)	(0,635; 0,732)	(0,633; 0,732)
15	1	15	(144,78; 152,80)	(143,68; 154,34)	(3,703; 4,097)	(3,632; 4,189)
16	1	16	(77,21; 81,33)	(76,46; 82,04)	(2,505; 2,778)	(2,454; 2,829)
17	1	17	(90,08; 96,56)	(90,10; 96,59)	(1,793; 2,057)	(1,791; 2,062)
18	3	15	(30,67; 37,03)	(31,02; 36,56)	(0,196; 0,272)	(0,218; 0,245)
19	4	18	(12,77; 13,50)	(12,68; 13,59)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
20	4	18	(16,62; 17,57)	(16,50; 17,69)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
21	5	6	(-0,06; 1,40)	(-1,12; 2,42)	(0,009; 0,013)	(0,003; 0,031)
22	7	8	(-80,59; -75,27)	(-81,01; -74,87)	(0,833; 0,949)	(0,810; 0,978)
23	10	12	(-18,57; -16,68)	(-18,51; -16,71)	(0,174; 0,197)	(0,157; 0,218)
24	11	13	(-10,68; -9,09)	(-10,32; -9,54)	(0,022; 0,030)	(0,024; 0,028)
25	12	13	(-2,68; 2,10)	(-1,29; 0,35)	(0,670; 0,724)	(0,590; 0,813)
26	12	16	(-36,13; -30,92)	(-34,58; -32,21)	(0,182; 0,247)	(0,196; 0,231)
27	12	17	(-50,61; -46,19)	(-50,05; -46,88)	(0,868; 1,045)	(0,889; 1,029)
28	14	15	(-71,20; -66,31)	(-71,10; -66,58)	(0,815; 0,936)	(0,814; 0,940)
29	18	19	(4,43; 4,84)	(4,49; 4,78)	(0,099; 0,117)	(0,100; 0,115)
30	19	20	(1,06; 1,41)	(1,19; 1,26)	(0,005; 0,007)	(0,005; 0,006)
31	21	20	(1,00; 1,38)	(1,12; 1,23)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
32	21	22	(-1,26; -0,90)	(-1,12; -1,04)	(0,001; 0,001)	(0,001; 0,001)
33	22	23	(9,07; 10,34)	(9,33; 9,98)	(0,009; 0,011)	(0,009; 0,011)

Figura 18 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.



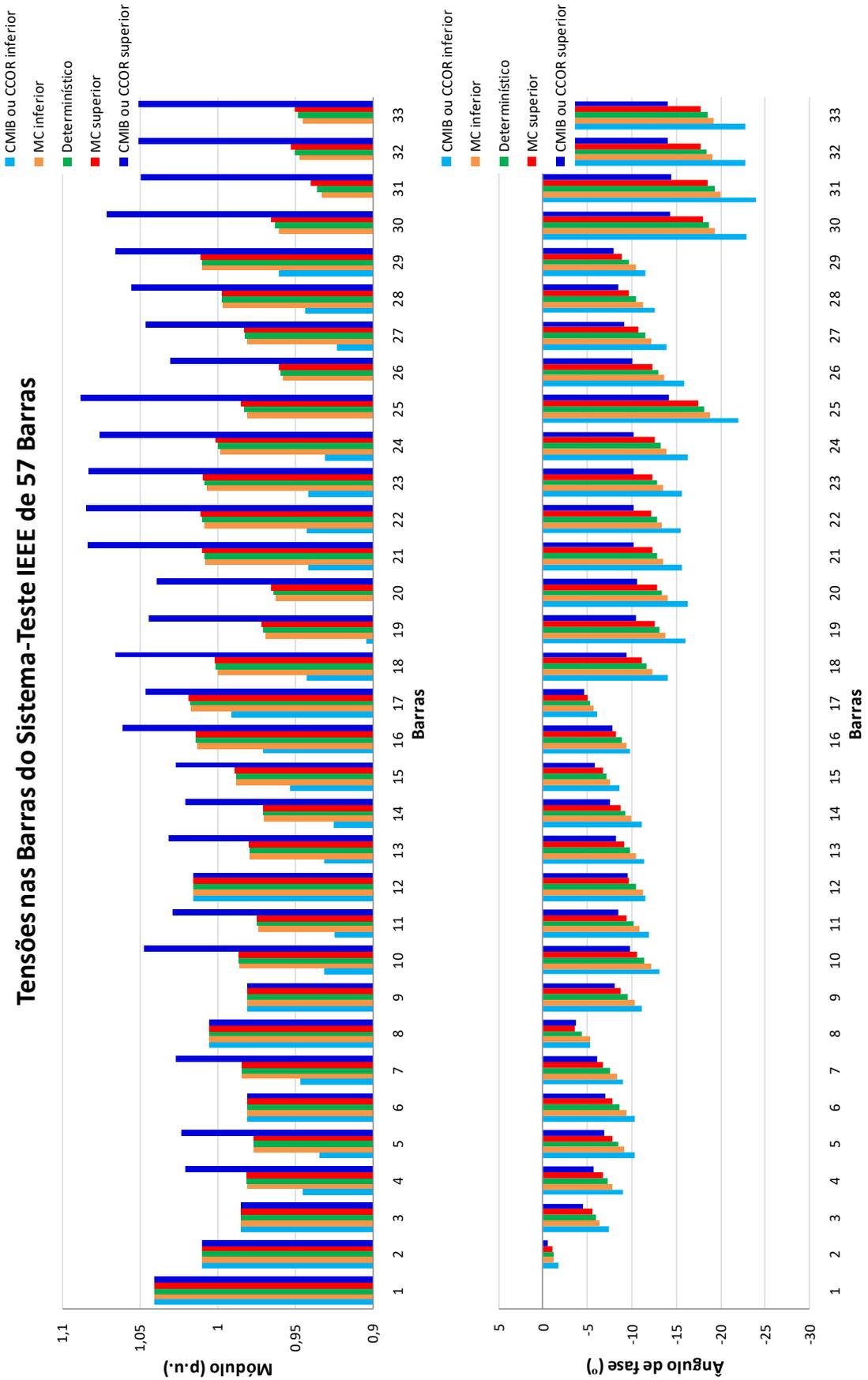
4.1.2.2 Incerteza sobre Todas as Cargas

As tensões nodais intervalares, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas do sistema, estão mostradas na Tabela 13 e nos gráficos da Figura 19.

Tabela 13 – Tensões intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	2	(1,0400; 1,0400)	(1,0400; 1,0400)	(0,0000; 0,0000)	(0,0000; 0,0000)
2	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(-1,2899; -1,0946)	(-1,8142; -0,6095)
3	1	(0,9850; 0,9850)	(0,9850; 0,9850)	(-6,4165; -5,5953)	(-7,4851; -4,5990)
4	0	(0,9806; 0,9810)	(0,9449; 1,0204)	(-7,8657; -6,8326)	(-9,0344; -5,7526)
5	0	(0,9763; 0,9767)	(0,9344; 1,0230)	(-9,2200; -7,8686)	(-10,3347; -6,8696)
6	1	(0,9800; 0,9800)	(0,9800; 0,9800)	(-9,4231; -7,9259)	(-10,3725; -7,0865)
7	0	(0,9839; 0,9845)	(0,9461; 1,0262)	(-8,3962; -6,7955)	(-9,1119; -6,2017)
8	1	(1,0050; 1,0050)	(1,0050; 1,0050)	(-5,3248; -3,6159)	(-5,2909; -3,7506)
9	1	(0,9800; 0,9800)	(0,9800; 0,9800)	(-10,4124; -8,7775)	(-11,2142; -8,0602)
10	0	(0,9858; 0,9867)	(0,9308; 1,0473)	(-12,2442; -10,7091)	(-13,1138; -9,8814)
11	0	(0,9736; 0,9742)	(0,9243; 1,0287)	(-10,9285; -9,4974)	(-12,0020; -8,4855)
12	1	(1,0150; 1,0150)	(1,0150; 1,0150)	(-11,2558; -9,7297)	(-11,5310; -9,5182)
13	0	(0,9785; 0,9793)	(0,9313; 1,0313)	(-10,4641; -9,1852)	(-11,4729; -8,2360)
14	0	(0,9696; 0,9707)	(0,9248; 1,0202)	(-9,9254; -8,8226)	(-11,1537; -7,6507)
15	0	(0,9876; 0,9884)	(0,9529; 1,0268)	(-7,6338; -6,7878)	(-8,6770; -5,8091)
16	0	(1,0127; 1,0140)	(0,9705; 1,0606)	(-9,4488; -8,2933)	(-9,9052; -7,9145)
17	0	(1,0166; 1,0182)	(0,9911; 1,0465)	(-5,7110; -5,0924)	(-6,1917; -4,6849)
18	0	(0,9996; 1,0018)	(0,9422; 1,0652)	(-12,3248; -11,1387)	(-14,0821; -9,4633)
19	0	(0,9689; 0,9714)	(0,9035; 1,0438)	(-13,8153; -12,6454)	(-16,0618; -10,4467)
20	0	(0,9625; 0,9651)	(0,8960; 1,0387)	(-14,0391; -12,8611)	(-16,3488; -10,5887)
21	0	(1,0074; 1,0096)	(0,9409; 1,0831)	(-13,5392; -12,3387)	(-15,6950; -10,2246)
22	0	(1,0086; 1,0108)	(0,9425; 1,0840)	(-13,4873; -12,2790)	(-15,6069; -10,2048)
23	0	(1,0072; 1,0094)	(0,9407; 1,0830)	(-13,5544; -12,3409)	(-15,7050; -10,2359)
24	0	(0,9979; 1,0007)	(0,9300; 1,0759)	(-13,9741; -12,6230)	(-16,3349; -10,3065)
25	0	(0,9800; 0,9851)	(0,8874; 1,0876)	(-18,9010; -17,4867)	(-22,0731; -14,1604)
26	0	(0,9577; 0,9602)	(0,8939; 1,0307)	(-13,6738; -12,3014)	(-15,9786; -10,0482)
27	0	(0,9806; 0,9825)	(0,9231; 1,0461)	(-12,2843; -10,7539)	(-13,9468; -9,1713)
28	0	(0,9960; 0,9973)	(0,9432; 1,0557)	(-11,2645; -9,6981)	(-12,5809; -8,4846)
29	0	(1,0096; 1,0108)	(0,9602; 1,0653)	(-10,5641; -8,9703)	(-11,5967; -8,0536)
30	0	(0,9598; 0,9655)	(0,8644; 1,0714)	(-19,4498; -18,0332)	(-22,9453; -14,3333)
31	0	(0,9325; 0,9392)	(0,8337; 1,0492)	(-20,1199; -18,6593)	(-24,0308; -14,5048)
32	0	(0,9470; 0,9526)	(0,8518; 1,0584)	(-19,1780; -17,8236)	(-22,7983; -14,0537)
33	0	(0,9447; 0,9503)	(0,8493; 1,0564)	(-19,2161; -17,8608)	(-22,8807; -14,0454)

Figura 19 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.

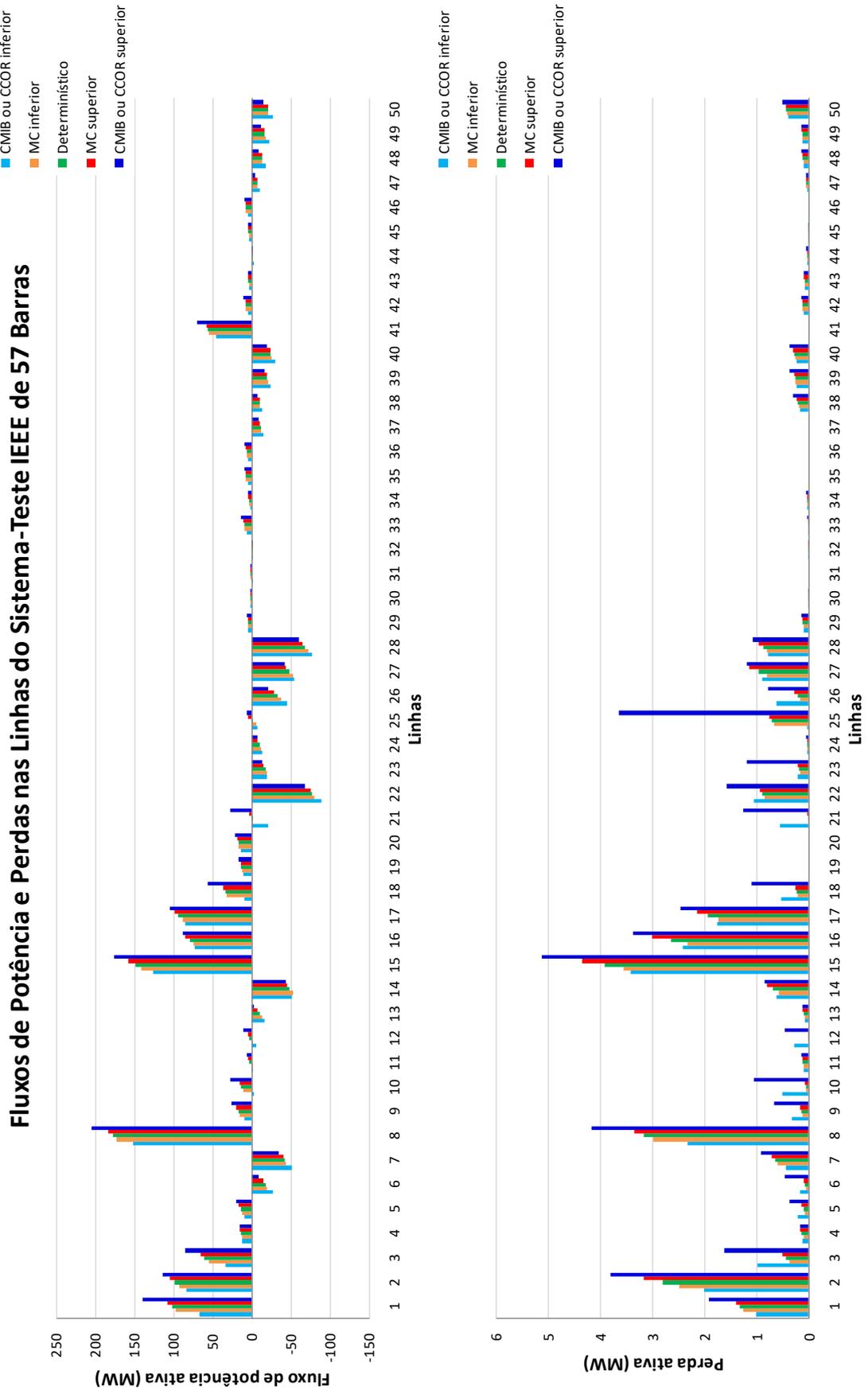


Os fluxos de potência e as perdas, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas do sistema, estão mostrados na Tabela 14 e nos gráficos da Figura 20.

Tabela 14 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas

Linha	Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (MW)		Perda Ativa (MW)	
			MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	1	2	(96,42; 108,25)	(67,11; 140,05)	(1,249; 1,394)	(0,992; 1,901)
2	2	3	(92,19; 103,87)	(82,68; 114,06)	(2,483; 3,153)	(2,000; 3,806)
3	3	4	(55,19; 64,91)	(32,70; 84,95)	(0,354; 0,493)	(0,973; 1,623)
4	4	5	(11,97; 15,69)	(11,83; 15,38)	(0,097; 0,170)	(0,117; 0,166)
5	4	6	(11,56; 16,80)	(9,25; 19,78)	(0,063; 0,134)	(0,207; 0,366)
6	6	7	(-19,84; -15,55)	(-26,91; -9,18)	(0,050; 0,082)	(0,153; 0,465)
7	6	8	(-44,43; -40,39)	(-50,81; -34,39)	(0,584; 0,702)	(0,432; 0,913)
8	8	9	(172,99; 183,01)	(151,57; 205,17)	(2,986; 3,331)	(2,316; 4,165)
9	9	10	(15,32; 19,11)	(8,35; 25,17)	(0,108; 0,161)	(0,328; 0,668)
10	9	11	(10,82; 14,92)	(-2,56; 26,92)	(0,035; 0,062)	(0,506; 1,045)
11	9	12	(0,74; 4,52)	(-1,31; 6,43)	(0,094; 0,120)	(0,088; 0,140)
12	9	13	(0,31; 4,31)	(-6,58; 10,38)	(0,000; 0,010)	(0,284; 0,466)
13	13	14	(-13,50; -7,21)	(-16,74; -2,52)	(0,072; 0,104)	(0,079; 0,113)
14	13	15	(-52,65; -45,07)	(-52,13; -44,66)	(0,576; 0,794)	(0,608; 0,853)
15	1	15	(141,21; 157,56)	(125,14; 176,36)	(3,538; 4,333)	(3,417; 5,123)
16	1	16	(74,30; 84,40)	(72,52; 87,47)	(2,319; 2,992)	(2,401; 3,355)
17	1	17	(88,24; 98,64)	(84,42; 104,12)	(1,720; 2,148)	(1,740; 2,459)
18	3	15	(31,39; 36,10)	(8,79; 56,25)	(0,203; 0,260)	(0,526; 1,084)
19	4	18	(12,78; 13,49)	(10,31; 16,29)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
20	4	18	(16,63; 17,56)	(13,41; 21,19)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
21	5	6	(-1,02; 2,49)	(-20,80; 26,81)	(0,007; 0,015)	(0,546; 1,262)
22	7	8	(-80,09; -75,65)	(-88,74; -67,82)	(0,841; 0,939)	(1,052; 1,561)
23	10	12	(-19,75; -15,44)	(-19,66; -14,30)	(0,170; 0,205)	(0,213; 1,189)
24	11	13	(-11,81; -7,98)	(-13,39; -6,91)	(0,019; 0,035)	(0,020; 0,039)
25	12	13	(-5,63; 4,77)	(-7,35; 5,82)	(0,658; 0,744)	(0,015; 3,645)
26	12	16	(-38,07; -28,81)	(-45,79; -21,86)	(0,157; 0,276)	(0,615; 0,778)
27	12	17	(-52,89; -44,32)	(-54,97; -42,48)	(0,796; 1,146)	(0,896; 1,189)
28	14	15	(-72,45; -65,29)	(-77,62; -60,79)	(0,793; 0,965)	(0,784; 1,071)
29	18	19	(4,38; 4,88)	(3,83; 5,51)	(0,098; 0,118)	(0,097; 0,129)
30	19	20	(1,01; 1,47)	(1,03; 1,43)	(0,004; 0,008)	(0,005; 0,007)
31	21	20	(0,90; 1,42)	(0,74; 1,67)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
32	21	22	(-1,30; -0,83)	(-1,53; -0,68)	(0,001; 0,001)	(0,001; 0,002)
33	22	23	(9,01; 10,34)	(6,62; 13,10)	(0,009; 0,011)	(0,008; 0,015)

Figura 20 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.



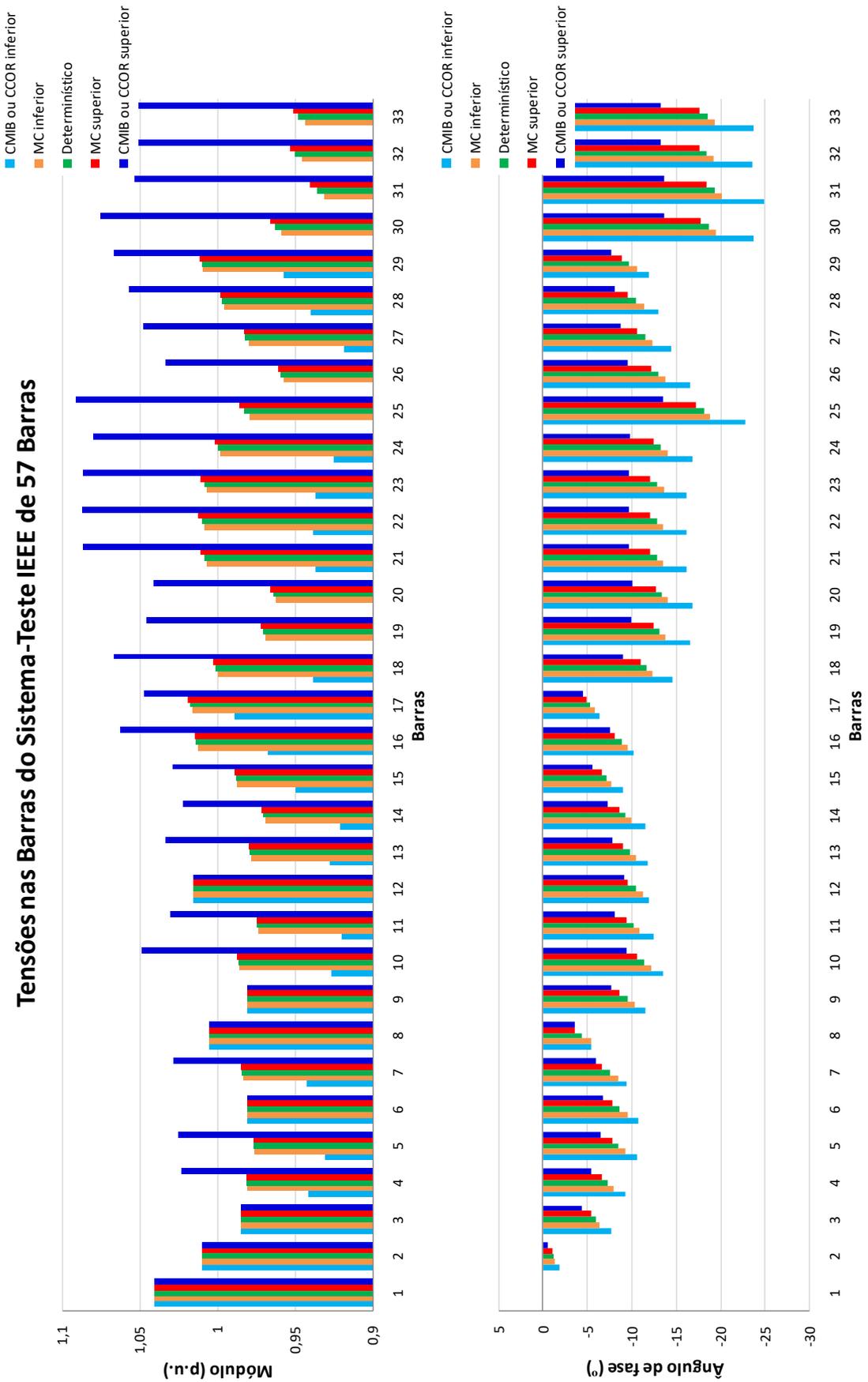
4.1.2.3 Incerteza sobre Todas as Linhas e Todas as Cargas

As tensões nodais intervalares, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas do sistema, estão mostradas na Tabela 15 e nos gráficos da Figura 21.

Tabela 15 – Tensões intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	2	(1,0400; 1,0400)	(1,0400; 1,0400)	(0,0000; 0,0000)	(0,0000; 0,0000)
2	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(-1,3492; -1,0357)	(-1,8835; -0,5720)
3	1	(0,9850; 0,9850)	(0,9850; 0,9850)	(-6,4544; -5,4652)	(-7,7510; -4,4026)
4	0	(0,9804; 0,9812)	(0,9411; 1,0225)	(-7,9270; -6,7070)	(-9,3508; -5,5108)
5	0	(0,9761; 0,9768)	(0,9303; 1,0251)	(-9,3506; -7,7991)	(-10,6975; -6,5828)
6	1	(0,9800; 0,9800)	(0,9800; 0,9800)	(-9,5548; -7,8630)	(-10,7397; -6,7953)
7	0	(0,9836; 0,9848)	(0,9424; 1,0281)	(-8,5379; -6,7012)	(-9,4356; -5,9426)
8	1	(1,0050; 1,0050)	(1,0050; 1,0050)	(-5,4640; -3,5827)	(-5,4780; -3,5965)
9	1	(0,9800; 0,9800)	(0,9800; 0,9800)	(-10,4326; -8,6954)	(-11,6203; -7,7310)
10	0	(0,9854; 0,9872)	(0,9268; 1,0487)	(-12,2784; -10,6095)	(-13,5968; -9,4894)
11	0	(0,9733; 0,9745)	(0,9199; 1,0306)	(-10,9479; -9,3939)	(-12,4384; -8,1296)
12	1	(1,0150; 1,0150)	(1,0150; 1,0150)	(-11,2844; -9,6401)	(-11,9593; -9,1651)
13	0	(0,9781; 0,9798)	(0,9272; 1,0330)	(-10,4986; -9,0795)	(-11,8915; -7,8946)
14	0	(0,9691; 0,9712)	(0,9206; 1,0222)	(-9,9753; -8,7021)	(-11,5593; -7,3243)
15	0	(0,9871; 0,9889)	(0,9495; 1,0285)	(-7,7042; -6,6196)	(-8,9878; -5,5682)
16	0	(1,0122; 1,0144)	(0,9677; 1,0620)	(-9,5185; -8,1736)	(-10,2689; -7,6191)
17	0	(1,0161; 1,0188)	(0,9890; 1,0472)	(-5,8342; -4,9910)	(-6,4132; -4,5097)
18	0	(0,9993; 1,0020)	(0,9379; 1,0665)	(-12,4068; -11,0305)	(-14,5821; -9,0850)
19	0	(0,9687; 0,9719)	(0,8981; 1,0459)	(-13,8916; -12,5103)	(-16,6330; -9,9856)
20	0	(0,9621; 0,9658)	(0,8904; 1,0410)	(-14,1251; -12,7293)	(-16,9327; -10,1110)
21	0	(1,0068; 1,0105)	(0,9365; 1,0862)	(-13,6165; -12,1638)	(-16,2549; -9,7640)
22	0	(1,0081; 1,0118)	(0,9381; 1,0871)	(-13,5653; -12,1017)	(-16,1642; -9,7469)
23	0	(1,0066; 1,0104)	(0,9363; 1,0861)	(-13,6334; -12,1637)	(-16,2660; -9,7744)
24	0	(0,9974; 1,0012)	(0,9252; 1,0794)	(-14,0553; -12,4812)	(-16,9243; -9,8216)
25	0	(0,9789; 0,9856)	(0,8812; 1,0913)	(-18,9236; -17,3044)	(-22,8762; -13,5189)
26	0	(0,9571; 0,9607)	(0,8883; 1,0331)	(-13,7679; -12,1744)	(-16,5543; -9,5745)
27	0	(0,9799; 0,9830)	(0,9184; 1,0479)	(-12,3768; -10,6531)	(-14,4451; -8,7638)
28	0	(0,9953; 0,9979)	(0,9391; 1,0571)	(-11,3915; -9,6092)	(-13,0299; -8,1217)
29	0	(1,0092; 1,0114)	(0,9567; 1,0665)	(-10,7004; -8,8827)	(-12,0129; -7,7241)
30	0	(0,9586; 0,9661)	(0,8574; 1,0752)	(-19,4609; -17,8493)	(-23,7825; -13,6446)
31	0	(0,9313; 0,9403)	(0,8258; 1,0531)	(-20,1337; -18,5065)	(-24,9118; -13,7513)
32	0	(0,9458; 0,9533)	(0,8445; 1,0619)	(-19,2857; -17,6662)	(-23,6284; -13,3464)
33	0	(0,9434; 0,9511)	(0,8419; 1,0599)	(-19,3281; -17,7081)	(-23,7142; -13,3328)

Figura 21 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.

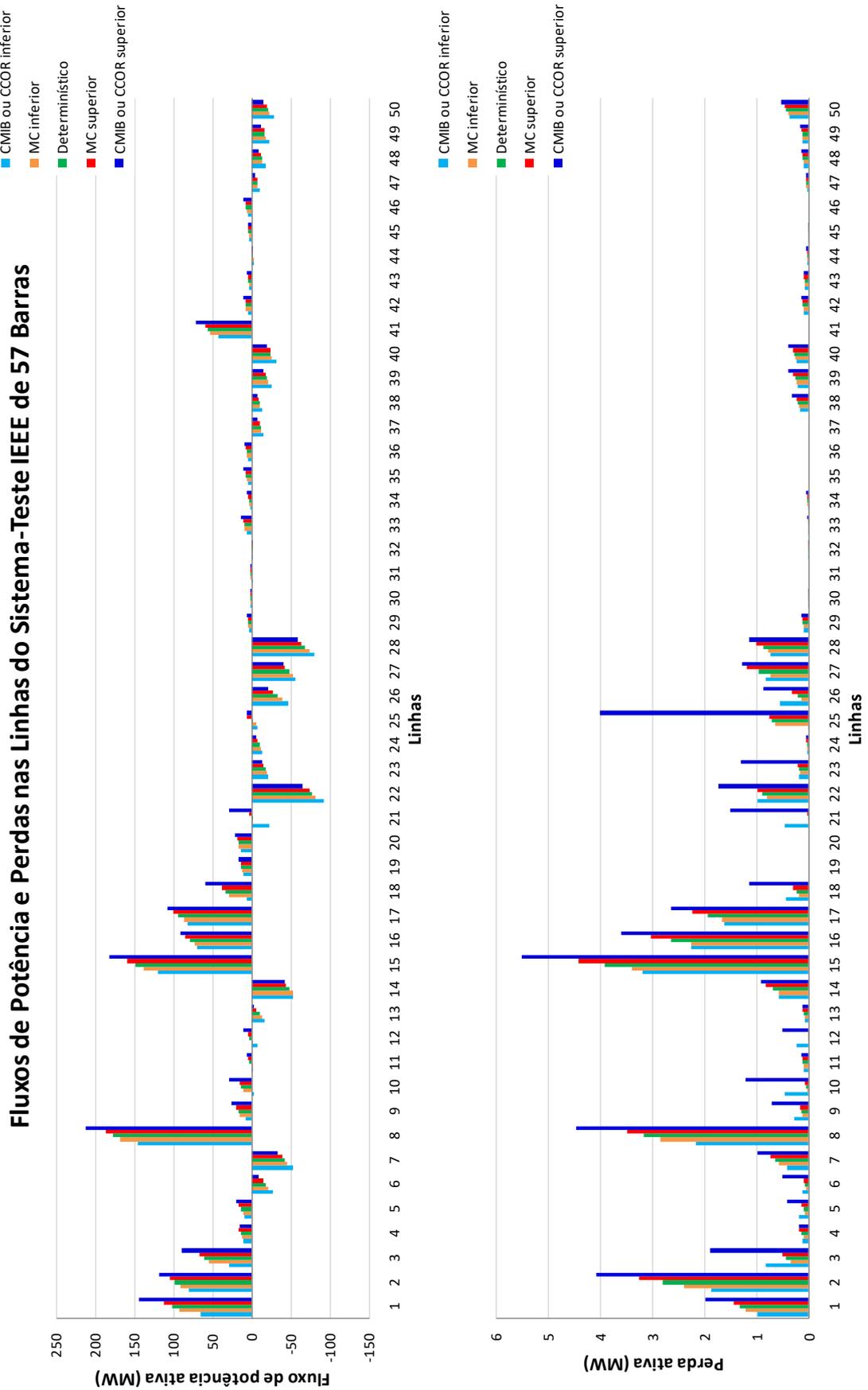


Os fluxos de potência e as perdas, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas do sistema, estão mostrados na Tabela 16 e nos gráficos da Figura 22.

Tabela 16 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas

Linha	Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (MW)		Perda Ativa (MW)	
			MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	1	2	(92,86; 111,84)	(64,84; 144,25)	(1,210; 1,443)	(0,978; 1,980)
2	2	3	(90,43; 105,28)	(79,72; 117,99)	(2,389; 3,240)	(1,862; 4,076)
3	3	4	(54,83; 65,94)	(28,94; 89,44)	(0,350; 0,509)	(0,827; 1,888)
4	4	5	(11,88; 16,05)	(11,36; 15,83)	(0,096; 0,179)	(0,109; 0,177)
5	4	6	(11,26; 17,40)	(9,06; 20,17)	(0,060; 0,144)	(0,173; 0,403)
6	6	7	(-20,92; -14,82)	(-27,51; -8,98)	(0,046; 0,091)	(0,122; 0,493)
7	6	8	(-45,11; -39,94)	(-52,50; -33,10)	(0,572; 0,723)	(0,403; 0,974)
8	8	9	(168,80; 187,06)	(145,76; 212,46)	(2,847; 3,476)	(2,150; 4,461)
9	9	10	(14,96; 19,59)	(7,52; 26,32)	(0,105; 0,169)	(0,283; 0,699)
10	9	11	(10,66; 15,41)	(-3,67; 28,64)	(0,034; 0,065)	(0,450; 1,213)
11	9	12	(0,50; 4,60)	(-1,41; 6,75)	(0,093; 0,121)	(0,088; 0,144)
12	9	13	(0,25; 4,54)	(-6,99; 11,17)	(0,000; 0,011)	(0,235; 0,498)
13	13	14	(-14,24; -6,01)	(-17,19; -2,31)	(0,069; 0,111)	(0,074; 0,120)
14	13	15	(-53,47; -44,52)	(-53,71; -42,93)	(0,562; 0,818)	(0,562; 0,910)
15	1	15	(137,95; 158,92)	(120,45; 182,57)	(3,390; 4,404)	(3,186; 5,495)
16	1	16	(73,27; 85,00)	(70,02; 90,79)	(2,256; 3,035)	(2,240; 3,597)
17	1	17	(86,52; 100,66)	(81,49; 107,99)	(1,653; 2,235)	(1,623; 2,634)
18	3	15	(29,30; 38,18)	(6,53; 59,39)	(0,180; 0,289)	(0,439; 1,145)
19	4	18	(12,45; 13,76)	(9,97; 16,88)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
20	4	18	(16,20; 17,91)	(12,97; 21,97)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
21	5	6	(-1,49; 2,80)	(-22,81; 28,12)	(0,007; 0,017)	(0,449; 1,499)
22	7	8	(-82,02; -74,01)	(-92,42; -65,19)	(0,806; 0,984)	(0,981; 1,720)
23	10	12	(-20,06; -15,29)	(-20,51; -13,40)	(0,166; 0,212)	(0,192; 1,307)
24	11	13	(-12,24; -7,83)	(-13,88; -6,60)	(0,018; 0,037)	(0,019; 0,042)
25	12	13	(-6,74; 6,43)	(-8,00; 6,78)	(0,643; 0,756)	(0,005; 4,001)
26	12	16	(-40,15; -27,73)	(-47,24; -20,89)	(0,145; 0,309)	(0,549; 0,865)
27	12	17	(-53,61; -42,74)	(-56,75; -40,96)	(0,738; 1,178)	(0,828; 1,281)
28	14	15	(-73,75; -64,26)	(-80,32; -58,66)	(0,769; 0,999)	(0,724; 1,142)
29	18	19	(4,28; 4,99)	(3,71; 5,70)	(0,094; 0,123)	(0,090; 0,138)
30	19	20	(0,91; 1,55)	(1,00; 1,48)	(0,004; 0,008)	(0,004; 0,007)
31	21	20	(0,80; 1,53)	(0,71; 1,74)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
32	21	22	(-1,42; -0,77)	(-1,58; -0,65)	(0,001; 0,002)	(0,001; 0,002)
33	22	23	(8,61; 10,67)	(6,37; 13,56)	(0,008; 0,012)	(0,007; 0,016)

Figura 22 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste IEEE de 57 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.



4.1.2.4 Comentários

Incerteza em todas as linhas

Todos os intervalos de módulo e de ângulo de fase da tensão e de perda ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contemplam os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC.

A grande maioria dos intervalos de fluxo de potência ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contempla os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Porém, para algumas linhas, as faixas geradas pelos métodos propostos não abrangem integralmente as respectivas faixas estabelecidas pela simulação de MC. Por exemplo, para a linha 1, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 1,92% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 2,68% menor que o respectivo limite.

Incerteza em todas as cargas

Todos os intervalos de módulo e de ângulo de fase da tensão e de fluxo de potência ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contemplam os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC.

A grande maioria dos intervalos de perda ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contempla os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Porém, para algumas linhas, as faixas geradas pelos métodos propostos não abrangem integralmente as respectivas faixas estabelecidas pela simulação de MC. Por exemplo, para a linha 3, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 174,60% maior que o respectivo limite obtido via MC. Esta violação é elevada, pois a perda determinística nesta linha é muito pequena.

Incerteza em todas as linhas e todas as cargas

Todos os intervalos de módulo e de ângulo de fase da tensão e de fluxo de potência ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contemplam os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC.

A grande maioria dos intervalos de perda ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contempla os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Porém, para algumas linhas, as faixas geradas pelos métodos propostos não abrangem integralmente as respectivas faixas estabelecidas pela simulação de MC. Por exemplo, para a linha 3, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 136,24% maior que o respectivo limite obtido via MC. Esta violação é elevada, pois a perda determinística nesta linha é muito pequena, como no cenário anterior.

4.1.3 Sistema-Teste Brasileiro de 107 Barras

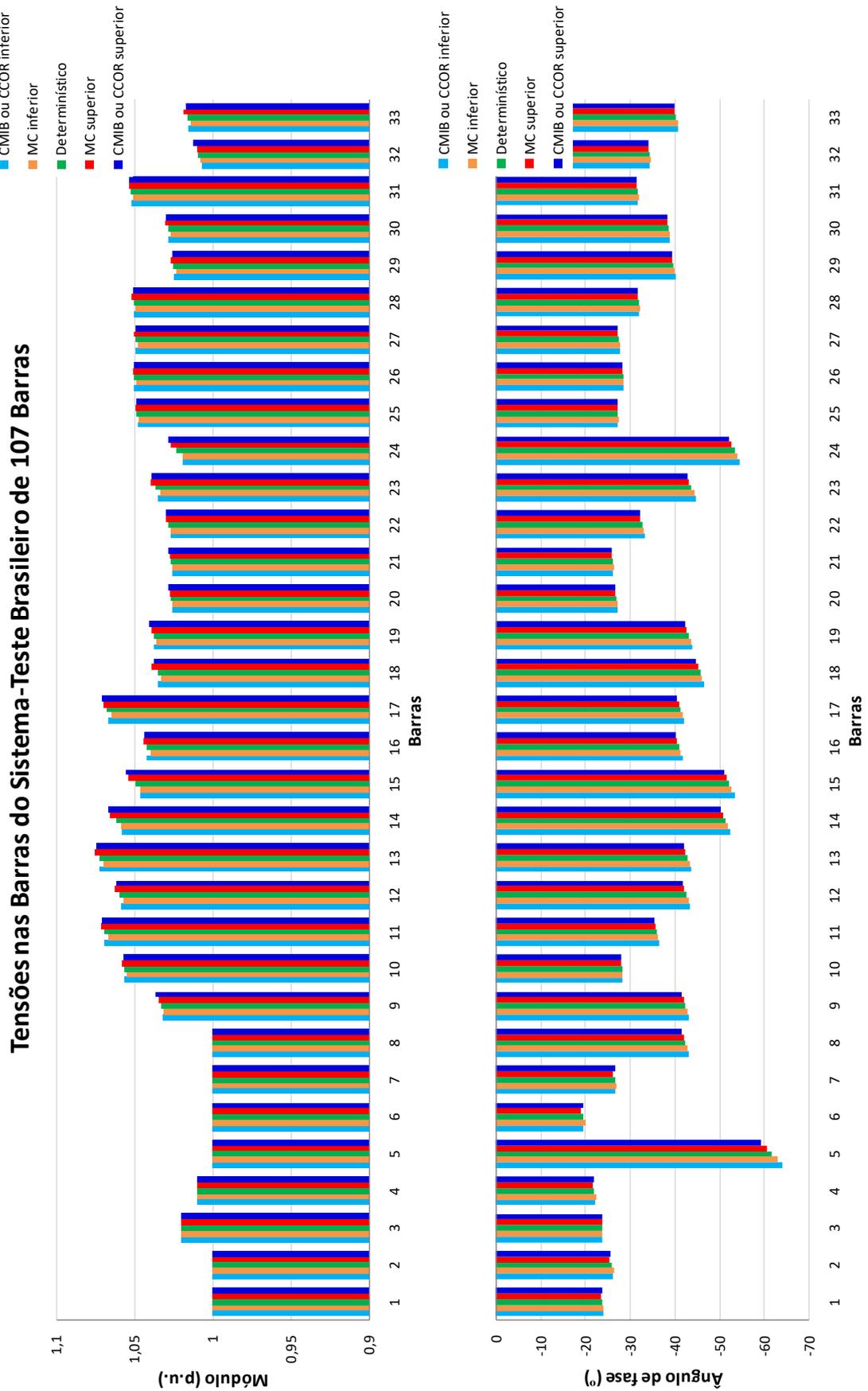
4.1.3.1 Incerteza sobre Todas as Linhas

As tensões nodais intervalares, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas do sistema, estão mostradas na Tabela 17 e nos gráficos da Figura 23.

Tabela 17 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
12 (1)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-24,2463; -23,6376)	(-24,0764; -23,7605)
16 (2)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-26,4686; -25,4154)	(-26,2646; -25,6163)
18 (3)	2	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(-23,7700; -23,7700)	(-23,7700; -23,7700)
20 (4)	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(-22,4521; -21,7947)	(-22,2039; -22,0355)
21 (5)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-63,1081; -60,7250)	(-64,0894; -59,4155)
22 (6)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-20,1224; -19,1385)	(-19,6756; -19,5406)
35 (7)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-27,0825; -26,2791)	(-26,7067; -26,6529)
48 (8)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-42,9020; -42,0589)	(-43,3253; -41,6209)
86 (9)	0	(1,0315; 1,0345)	(1,0322; 1,0367)	(-42,9020; -42,0589)	(-43,3049; -41,6378)
100 (10)	0	(1,0548; 1,0575)	(1,0563; 1,0567)	(-28,4404; -28,0606)	(-28,4977; -28,0024)
101 (11)	0	(1,0669; 1,0711)	(1,0688; 1,0702)	(-36,3943; -35,6991)	(-36,6084; -35,5142)
102 (12)	0	(1,0566; 1,0623)	(1,0584; 1,0617)	(-43,1696; -42,2853)	(-43,5396; -41,9393)
103 (13)	0	(1,0696; 1,0749)	(1,0721; 1,0745)	(-43,4474; -42,5347)	(-43,8169; -42,1861)
104 (14)	0	(1,0581; 1,0652)	(1,0579; 1,0668)	(-51,9957; -50,9063)	(-52,5853; -50,4268)
106 (15)	0	(1,0461; 1,0537)	(1,0460; 1,0554)	(-52,8605; -51,7785)	(-53,5057; -51,2682)
120 (16)	0	(1,0392; 1,0437)	(1,0414; 1,0429)	(-41,3724; -40,5798)	(-41,7628; -40,2380)
122 (17)	0	(1,0645; 1,0697)	(1,0669; 1,0708)	(-41,8497; -40,9735)	(-42,1763; -40,6038)
123 (18)	0	(1,0323; 1,0384)	(1,0351; 1,0373)	(-46,2107; -45,3201)	(-46,7008; -44,8956)
126 (19)	0	(1,0356; 1,0388)	(1,0369; 1,0401)	(-43,6356; -42,8099)	(-44,0744; -42,3749)
131 (20)	0	(1,0259; 1,0277)	(1,0258; 1,0281)	(-27,3454; -26,7191)	(-27,3011; -26,7651)
134 (21)	0	(1,0260; 1,0276)	(1,0260; 1,0279)	(-26,4213; -25,8675)	(-26,3739; -25,9344)
136 (22)	0	(1,0265; 1,0294)	(1,0268; 1,0298)	(-33,2178; -32,4484)	(-33,3236; -32,3095)
138 (23)	0	(1,0331; 1,0395)	(1,0352; 1,0388)	(-44,4584; -43,3227)	(-44,7777; -43,0281)
140 (24)	0	(1,0190; 1,0265)	(1,0192; 1,0280)	(-53,9871; -52,8703)	(-54,6635; -52,3319)
210 (25)	0	(1,0473; 1,0491)	(1,0477; 1,0488)	(-27,4452; -27,2139)	(-27,4321; -27,2382)
213 (26)	0	(1,0488; 1,0510)	(1,0500; 1,0502)	(-28,6965; -28,3094)	(-28,7513; -28,2815)
216 (27)	0	(1,0481; 1,0499)	(1,0491; 1,0492)	(-27,8478; -27,3889)	(-27,7972; -27,4129)
217 (28)	0	(1,0493; 1,0515)	(1,0501; 1,0509)	(-32,2584; -31,8019)	(-32,2013; -31,8773)
218 (29)	0	(1,0231; 1,0268)	(1,0244; 1,0256)	(-40,1388; -39,4792)	(-40,2331; -39,4415)
219 (30)	0	(1,0266; 1,0305)	(1,0277; 1,0293)	(-39,0196; -38,3297)	(-39,0905; -38,3201)
220 (31)	0	(1,0509; 1,0531)	(1,0514; 1,0527)	(-31,9598; -31,4292)	(-31,8783; -31,5497)
225 (32)	0	(1,0075; 1,0103)	(1,0066; 1,0124)	(-34,6086; -34,0907)	(-34,4518; -34,2644)
228 (33)	0	(1,0141; 1,0182)	(1,0154; 1,0166)	(-40,7552; -40,0119)	(-40,8357; -39,9725)

Figura 23 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.

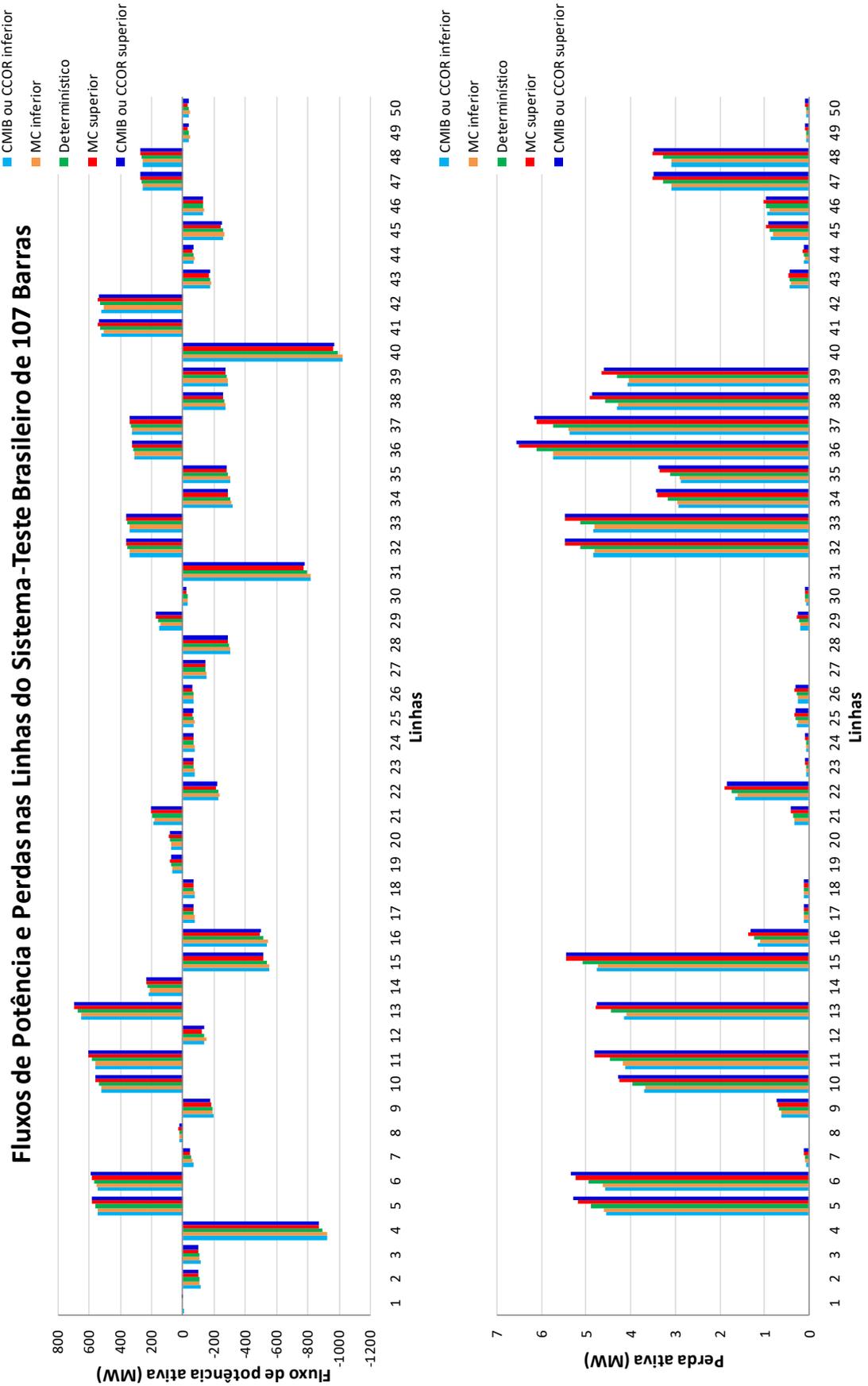


Os fluxos de potência e as perdas, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas do sistema, estão mostrados na Tabela 18 e nos gráficos da Figura 24.

Tabela 18 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas

Linha	Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (MW)		Perda Ativa (MW)	
			MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	86	48	(0,00; 0,00)	(-4,86; 5,14)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
2	86	122	(-112,59; -102,05)	(-113,38; -102,73)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
3	86	122	(-112,59; -102,05)	(-113,38; -102,73)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
4	100	20	(-926,99; -873,00)	(-925,90; -877,40)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
5	100	101	(542,86; 577,57)	(539,64; 582,97)	(4,579; 5,173)	(4,524; 5,270)
6	100	101	(546,87; 581,85)	(543,63; 587,28)	(4,620; 5,219)	(4,564; 5,317)
7	100	210	(-64,58; -51,66)	(-67,88; -47,87)	(0,068; 0,102)	(0,065; 0,108)
8	100	213	(16,05; 27,19)	(20,78; 22,92)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
9	100	535	(-195,71; -181,55)	(-198,27; -180,15)	(0,608; 0,700)	(0,608; 0,710)
10	101	102	(516,96; 555,77)	(517,23; 558,42)	(3,666; 4,239)	(3,674; 4,275)
11	101	103	(559,55; 599,55)	(555,94; 601,68)	(4,162; 4,793)	(4,116; 4,811)
12	102	120	(-153,11; -123,09)	(-142,48; -135,71)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
13	102	1503	(647,03; 697,00)	(649,58; 696,64)	(4,093; 4,775)	(4,135; 4,752)
14	103	123	(211,32; 234,44)	(215,90; 231,15)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
15	104	103	(-556,67; -519,90)	(-558,60; -521,09)	(4,718; 5,433)	(4,751; 5,439)
16	104	1503	(-548,49; -493,79)	(-540,23; -503,90)	(1,092; 1,351)	(1,139; 1,303)
17	106	104	(-80,69; -68,29)	(-78,22; -71,17)	(0,093; 0,118)	(0,100; 0,112)
18	106	104	(-80,69; -68,29)	(-78,22; -71,17)	(0,093; 0,118)	(0,100; 0,112)
19	106	140	(65,72; 77,31)	(67,93; 74,65)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
20	106	140	(72,01; 84,69)	(74,42; 81,79)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
21	122	103	(181,65; 203,87)	(187,36; 199,15)	(0,322; 0,400)	(0,328; 0,390)
22	123	120	(-236,31; -217,62)	(-233,99; -220,95)	(1,589; 1,882)	(1,640; 1,839)
23	126	86	(-79,15; -70,27)	(-76,80; -72,77)	(0,058; 0,073)	(0,059; 0,070)
24	126	86	(-79,24; -70,34)	(-76,89; -72,85)	(0,058; 0,073)	(0,060; 0,070)
25	126	120	(-75,04; -66,87)	(-73,45; -67,53)	(0,249; 0,314)	(0,254; 0,300)
26	126	120	(-74,17; -66,10)	(-72,60; -66,75)	(0,246; 0,310)	(0,251; 0,296)
27	131	22	(-154,50; -145,50)	(-154,24; -146,29)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
28	134	12	(-308,38; -290,42)	(-307,98; -291,76)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
29	134	131	(144,58; 172,42)	(150,41; 167,66)	(0,183; 0,261)	(0,199; 0,247)
30	134	396	(-36,33; -28,08)	(-35,24; -29,15)	(0,067; 0,085)	(0,066; 0,085)
31	136	16	(-824,00; -776,00)	(-822,05; -780,71)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
32	136	120	(338,56; 360,69)	(339,89; 360,44)	(4,798; 5,449)	(4,822; 5,454)
33	136	120	(338,56; 360,69)	(339,89; 360,44)	(4,798; 5,449)	(4,822; 5,454)

Figura 24 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas.



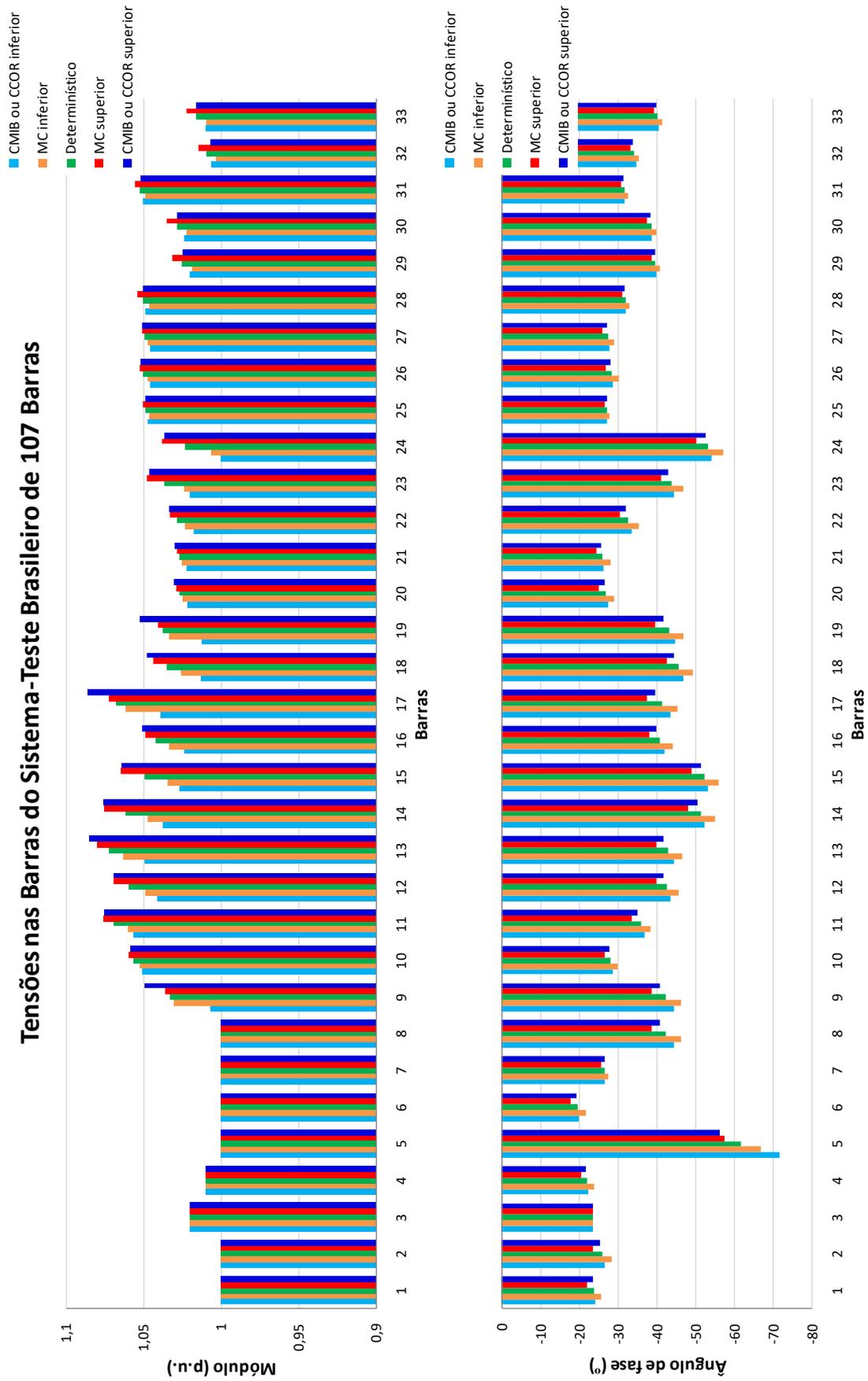
4.1.3.2 Incerteza sobre Todas as Cargas

As tensões nodais intervalares, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas do sistema, estão mostradas na Tabela 19 e nos gráficos da Figura 25.

Tabela 19 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
12 (1)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-25,8301; -22,1842)	(-24,2313; -23,6516)
16 (2)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-28,5843; -23,6176)	(-26,6176; -25,3618)
18 (3)	2	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(-23,7700; -23,7700)	(-23,7700; -23,7700)
20 (4)	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(-23,8285; -20,5536)	(-22,4467; -21,8773)
21 (5)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-67,0517; -57,4849)	(-71,8707; -56,3328)
22 (6)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-21,6789; -17,7635)	(-19,9429; -19,4015)
35 (7)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-27,6431; -25,8085)	(-26,7241; -26,6163)
48 (8)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-46,5106; -38,9187)	(-44,4696; -40,8455)
86 (9)	0	(1,0302; 1,0354)	(1,0069; 1,0496)	(-46,5106; -38,9187)	(-44,4186; -40,9015)
100 (10)	0	(1,0524; 1,0592)	(1,0511; 1,0587)	(-29,9703; -26,6594)	(-28,6646; -27,8547)
101 (11)	0	(1,0599; 1,0761)	(1,0564; 1,0748)	(-38,6062; -33,7570)	(-36,9259; -35,2335)
102 (12)	0	(1,0482; 1,0691)	(1,0412; 1,0690)	(-45,8641; -39,9606)	(-43,7319; -41,7508)
103 (13)	0	(1,0633; 1,0799)	(1,0494; 1,0847)	(-46,5539; -39,8547)	(-44,4145; -41,7737)
104 (14)	0	(1,0467; 1,0748)	(1,0374; 1,0756)	(-55,1716; -48,3073)	(-52,4313; -50,5108)
106 (15)	0	(1,0341; 1,0642)	(1,0262; 1,0639)	(-56,0616; -49,1943)	(-53,2302; -51,4320)
120 (16)	0	(1,0333; 1,0485)	(1,0234; 1,0511)	(-44,2399; -38,1214)	(-42,1290; -39,9405)
122 (17)	0	(1,0617; 1,0721)	(1,0387; 1,0857)	(-45,5839; -37,7088)	(-43,4946; -39,7609)
123 (18)	0	(1,0257; 1,0436)	(1,0128; 1,0476)	(-49,3576; -42,6019)	(-47,0412; -44,6506)
126 (19)	0	(1,0331; 1,0406)	(1,0124; 1,0522)	(-47,1141; -39,8067)	(-44,9639; -41,7786)
131 (20)	0	(1,0241; 1,0290)	(1,0211; 1,0300)	(-29,1129; -25,1644)	(-27,4637; -26,6356)
134 (21)	0	(1,0250; 1,0283)	(1,0223; 1,0295)	(-28,0672; -24,4145)	(-26,4993; -25,8366)
136 (22)	0	(1,0224; 1,0326)	(1,0172; 1,0338)	(-35,4869; -30,4576)	(-33,5567; -32,1021)
138 (23)	0	(1,0235; 1,0480)	(1,0194; 1,0464)	(-47,0404; -41,1410)	(-44,6662; -43,0255)
140 (24)	0	(1,0063; 1,0381)	(1,0000; 1,0365)	(-57,1900; -50,2591)	(-54,2413; -52,5899)
210 (25)	0	(1,0463; 1,0502)	(1,0472; 1,0483)	(-28,0117; -26,6823)	(-27,4004; -27,2277)
213 (26)	0	(1,0470; 1,0524)	(1,0456; 1,0518)	(-30,1578; -26,9822)	(-28,8450; -28,1827)
216 (27)	0	(1,0472; 1,0507)	(1,0454; 1,0506)	(-29,1521; -26,1561)	(-27,8635; -27,3424)
217 (28)	0	(1,0465; 1,0539)	(1,0486; 1,0497)	(-32,9591; -31,2004)	(-32,1764; -31,8247)
218 (29)	0	(1,0184; 1,0313)	(1,0200; 1,0245)	(-40,9708; -38,7575)	(-39,9316; -39,5686)
219 (30)	0	(1,0219; 1,0346)	(1,0236; 1,0284)	(-39,8702; -37,6018)	(-38,8346; -38,3723)
220 (31)	0	(1,0488; 1,0551)	(1,0500; 1,0516)	(-32,6828; -30,8316)	(-31,7515; -31,5723)
225 (32)	0	(1,0031; 1,0141)	(1,0062; 1,0071)	(-35,3865; -33,4611)	(-34,8978; -33,9350)
228 (33)	0	(1,0091; 1,0222)	(1,0103; 1,0162)	(-41,5968; -39,2804)	(-40,5558; -40,0230)

Figura 25 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.

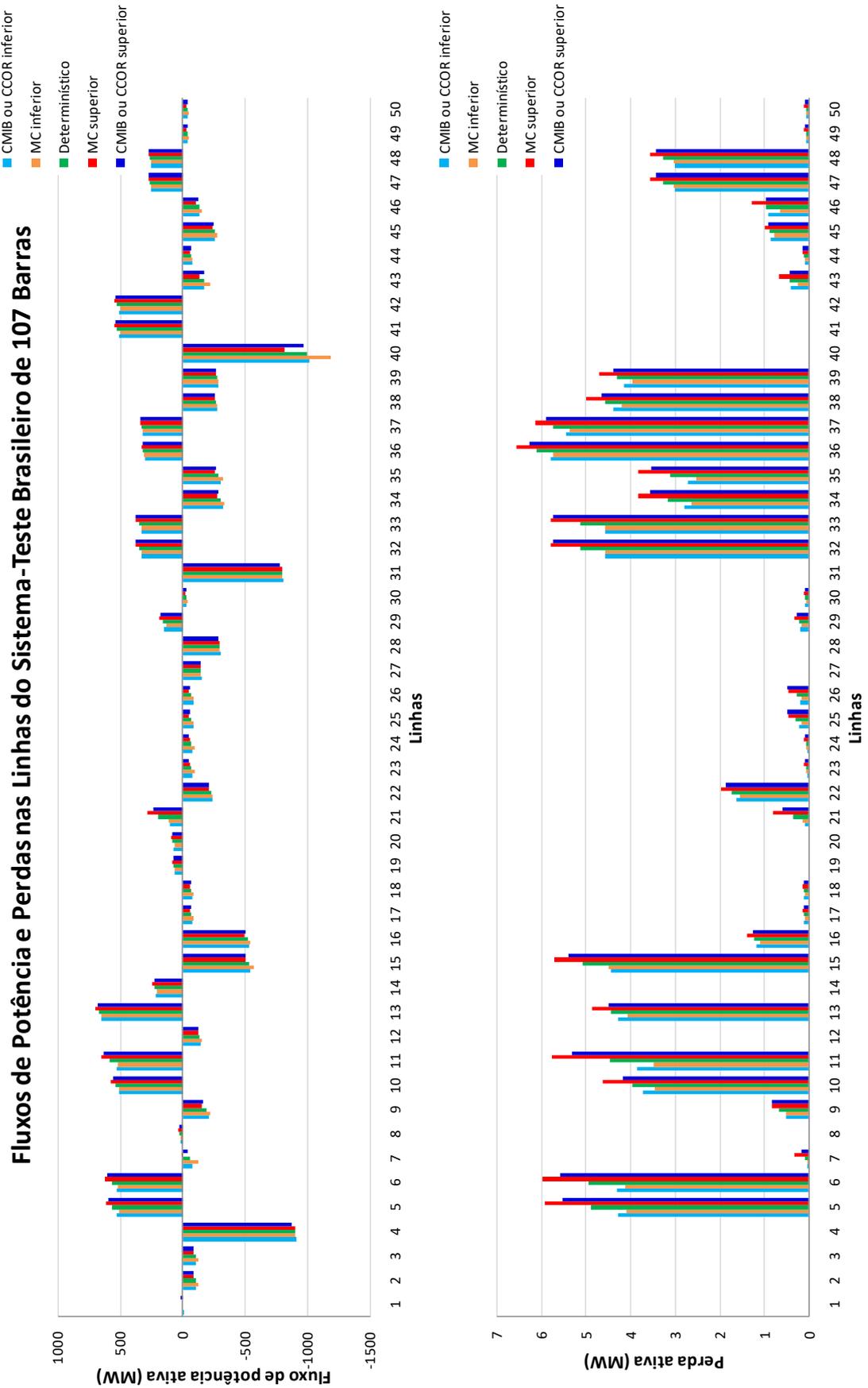


Os fluxos de potência e as perdas, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas do sistema, estão mostrados na Tabela 20 e nos gráficos da Figura 26.

Tabela 20 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas

Linha	Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (MW)		Perda Ativa (MW)	
			MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	86	48	(0,00; 0,00)	(-13,78; 13,03)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
2	86	122	(-127,94; -88,98)	(-110,59; -90,10)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
3	86	122	(-127,94; -88,98)	(-110,59; -90,10)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
4	100	20	(-900,00; -900,00)	(-915,92; -874,69)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
5	100	101	(511,31; 616,37)	(523,09; 597,14)	(4,074; 5,907)	(4,265; 5,528)
6	100	101	(515,08; 620,93)	(526,96; 601,55)	(4,110; 5,960)	(4,303; 5,577)
7	100	210	(-129,37; 6,29)	(-80,35; -39,81)	(0,021; 0,331)	(0,036; 0,155)
8	100	213	(12,37; 31,40)	(14,51; 26,69)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
9	100	535	(-222,88; -153,51)	(-216,07; -164,67)	(0,506; 0,832)	(0,497; 0,824)
10	101	102	(504,56; 573,83)	(511,42; 554,85)	(3,446; 4,606)	(3,709; 4,165)
11	101	103	(513,65; 651,61)	(530,05; 632,73)	(3,470; 5,747)	(3,837; 5,292)
12	102	120	(-155,77; -123,49)	(-142,61; -127,02)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
13	102	1503	(647,34; 697,01)	(647,79; 681,48)	(4,061; 4,862)	(4,260; 4,478)
14	103	123	(207,51; 238,98)	(209,64; 225,18)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
15	104	103	(-568,59; -508,16)	(-543,50; -508,61)	(4,475; 5,700)	(4,428; 5,372)
16	104	1503	(-546,75; -497,42)	(-530,11; -501,94)	(1,091; 1,371)	(1,174; 1,233)
17	106	104	(-86,04; -63,28)	(-76,43; -66,86)	(0,082; 0,134)	(0,095; 0,108)
18	106	104	(-86,04; -63,28)	(-76,43; -66,86)	(0,082; 0,134)	(0,095; 0,108)
19	106	140	(60,39; 82,11)	(63,81; 72,94)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
20	106	140	(66,16; 89,96)	(69,91; 79,91)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
21	122	103	(108,39; 282,80)	(98,32; 231,30)	(0,116; 0,783)	(0,086; 0,585)
22	123	120	(-239,43; -214,63)	(-236,95; -215,61)	(1,532; 1,953)	(1,627; 1,853)
23	126	86	(-95,48; -56,33)	(-83,69; -51,91)	(0,036; 0,105)	(0,030; 0,090)
24	126	86	(-95,59; -56,39)	(-83,78; -51,96)	(0,036; 0,105)	(0,030; 0,090)
25	126	120	(-90,16; -50,27)	(-92,82; -57,06)	(0,143; 0,457)	(0,199; 0,479)
26	126	120	(-89,11; -49,69)	(-91,74; -56,40)	(0,141; 0,451)	(0,196; 0,472)
27	131	22	(-150,00; -150,00)	(-152,61; -145,56)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
28	134	12	(-299,40; -299,40)	(-304,86; -291,66)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
29	134	131	(131,88; 189,12)	(144,10; 174,91)	(0,154; 0,314)	(0,183; 0,269)
30	134	396	(-46,07; -20,35)	(-36,91; -27,69)	(0,054; 0,110)	(0,075; 0,080)
31	136	16	(-800,00; -800,00)	(-813,11; -777,26)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
32	136	120	(330,18; 370,37)	(327,60; 371,48)	(4,556; 5,772)	(4,549; 5,736)
33	136	120	(330,18; 370,37)	(327,60; 371,48)	(4,556; 5,772)	(4,549; 5,736)

Figura 26 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as cargas.



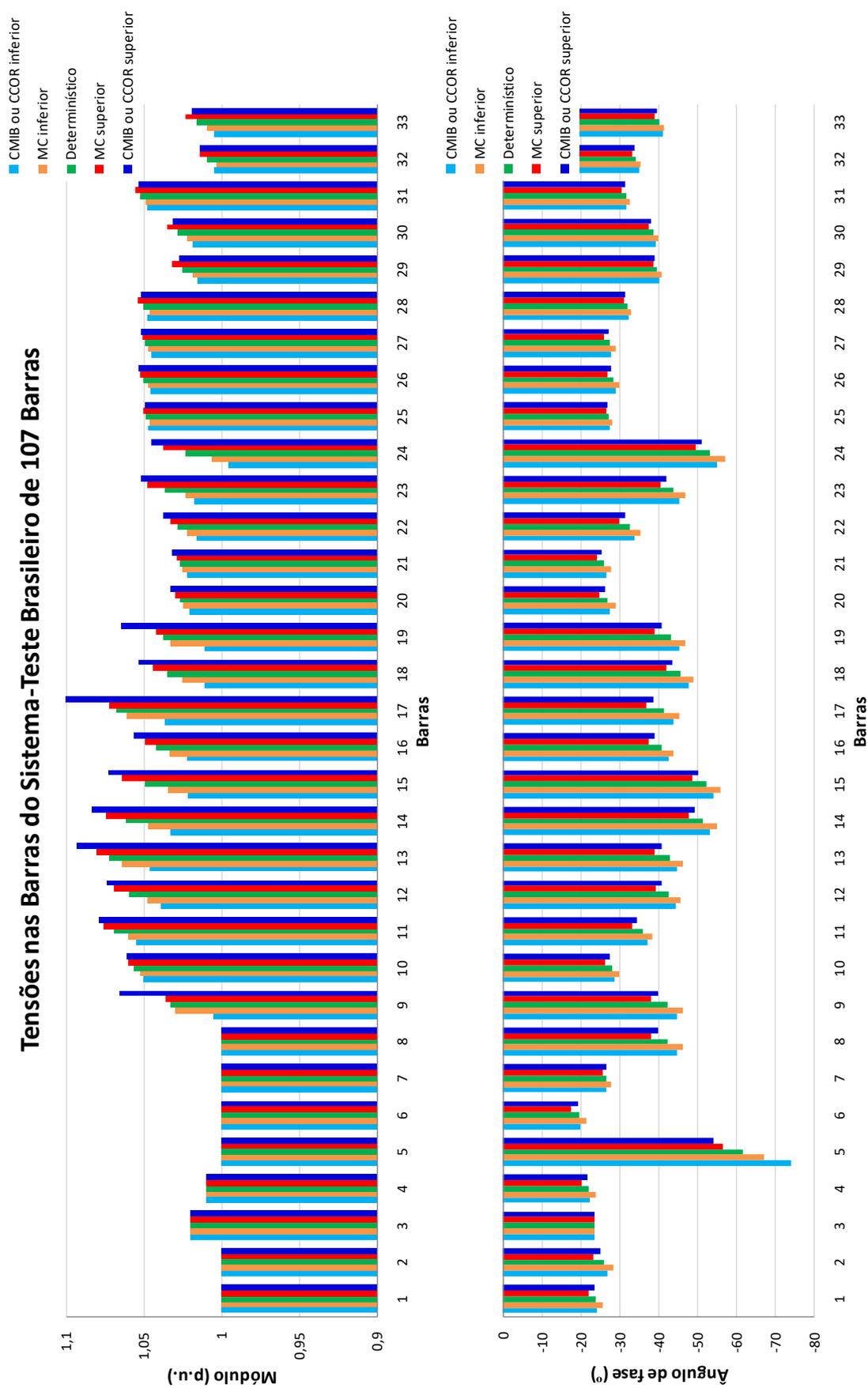
4.1.3.3 Incerteza sobre Todas as Linhas e Todas as Cargas

As tensões nodais intervalares, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas do sistema, estão mostradas na Tabela 21 e nos gráficos da Figura 27.

Tabela 21 – Tensões intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas

Barra	Tipo	Tensão Nodal			
		Módulo (p.u.)		Ângulo de Fase (°)	
		MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
12 (1)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-25,7860; -21,9724)	(-24,3611; -23,4905)
16 (2)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-28,5909; -23,3100)	(-26,8549; -25,0149)
18 (3)	2	(1,0200; 1,0200)	(1,0200; 1,0200)	(-23,7700; -23,7700)	(-23,7700; -23,7700)
20 (4)	1	(1,0100; 1,0100)	(1,0100; 1,0100)	(-23,8016; -20,4349)	(-22,4859; -21,7880)
21 (5)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-67,3936; -56,6948)	(-74,1912; -54,1013)
22 (6)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-21,5636; -17,6513)	(-19,9622; -19,3379)
35 (7)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-27,8380; -25,6167)	(-26,7694; -26,6201)
48 (8)	1	(1,0000; 1,0000)	(1,0000; 1,0000)	(-46,2889; -38,1768)	(-44,9896; -39,8868)
86 (9)	0	(1,0298; 1,0358)	(1,0051; 1,0649)	(-46,2889; -38,1768)	(-44,9141; -39,9584)
100 (10)	0	(1,0523; 1,0597)	(1,0503; 1,0603)	(-29,9247; -26,4839)	(-28,8645; -27,5833)
101 (11)	0	(1,0602; 1,0762)	(1,0548; 1,0787)	(-38,5371; -33,3737)	(-37,3622; -34,6330)
102 (12)	0	(1,0480; 1,0690)	(1,0387; 1,0733)	(-45,7076; -39,5351)	(-44,4005; -40,8805)
103 (13)	0	(1,0634; 1,0800)	(1,0463; 1,0933)	(-46,3130; -39,2314)	(-44,9992; -40,8705)
104 (14)	0	(1,0468; 1,0744)	(1,0324; 1,0837)	(-55,1059; -47,8045)	(-53,3681; -49,3239)
106 (15)	0	(1,0341; 1,0635)	(1,0212; 1,0725)	(-56,0179; -48,6988)	(-54,2211; -50,2060)
120 (16)	0	(1,0331; 1,0489)	(1,0217; 1,0564)	(-44,0465; -37,6474)	(-42,7341; -39,1084)
122 (17)	0	(1,0605; 1,0724)	(1,0361; 1,1034)	(-45,3417; -36,9271)	(-43,8923; -38,8552)
123 (18)	0	(1,0251; 1,0438)	(1,0103; 1,0529)	(-49,1207; -42,0774)	(-47,7467; -43,6617)
126 (19)	0	(1,0329; 1,0414)	(1,0103; 1,0648)	(-46,9097; -39,1369)	(-45,5192; -40,8270)
131 (20)	0	(1,0240; 1,0293)	(1,0204; 1,0328)	(-29,0054; -24,8532)	(-27,6846; -26,3508)
134 (21)	0	(1,0248; 1,0288)	(1,0217; 1,0317)	(-27,9808; -24,1611)	(-26,6821; -25,6048)
136 (22)	0	(1,0222; 1,0330)	(1,0163; 1,0375)	(-35,3491; -30,0903)	(-33,9820; -31,5557)
138 (23)	0	(1,0229; 1,0476)	(1,0173; 1,0512)	(-47,0040; -40,7447)	(-45,4661; -42,0811)
140 (24)	0	(1,0058; 1,0375)	(0,9956; 1,0450)	(-57,1876; -49,8093)	(-55,2958; -51,3159)
210 (25)	0	(1,0460; 1,0504)	(1,0467; 1,0494)	(-28,0817; -26,5971)	(-27,4949; -27,1185)
213 (26)	0	(1,0469; 1,0527)	(1,0452; 1,0528)	(-30,1421; -26,8469)	(-29,0456; -27,9260)
216 (27)	0	(1,0470; 1,0509)	(1,0451; 1,0513)	(-29,1545; -26,0221)	(-28,0291; -27,1338)
217 (28)	0	(1,0464; 1,0538)	(1,0475; 1,0513)	(-32,9988; -31,0680)	(-32,3193; -31,6304)
218 (29)	0	(1,0183; 1,0315)	(1,0155; 1,0274)	(-40,9694; -38,6654)	(-40,4114; -39,2103)
219 (30)	0	(1,0218; 1,0350)	(1,0186; 1,0313)	(-39,8867; -37,4688)	(-39,2927; -38,1444)
220 (31)	0	(1,0486; 1,0552)	(1,0480; 1,0533)	(-32,7365; -30,6923)	(-31,9156; -31,3814)
225 (32)	0	(1,0030; 1,0139)	(1,0045; 1,0136)	(-35,3931; -33,3854)	(-35,1576; -33,7895)
228 (33)	0	(1,0088; 1,0225)	(1,0049; 1,0187)	(-41,6606; -39,1529)	(-41,0698; -39,7877)

Figura 27 – Tensões nodais intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.

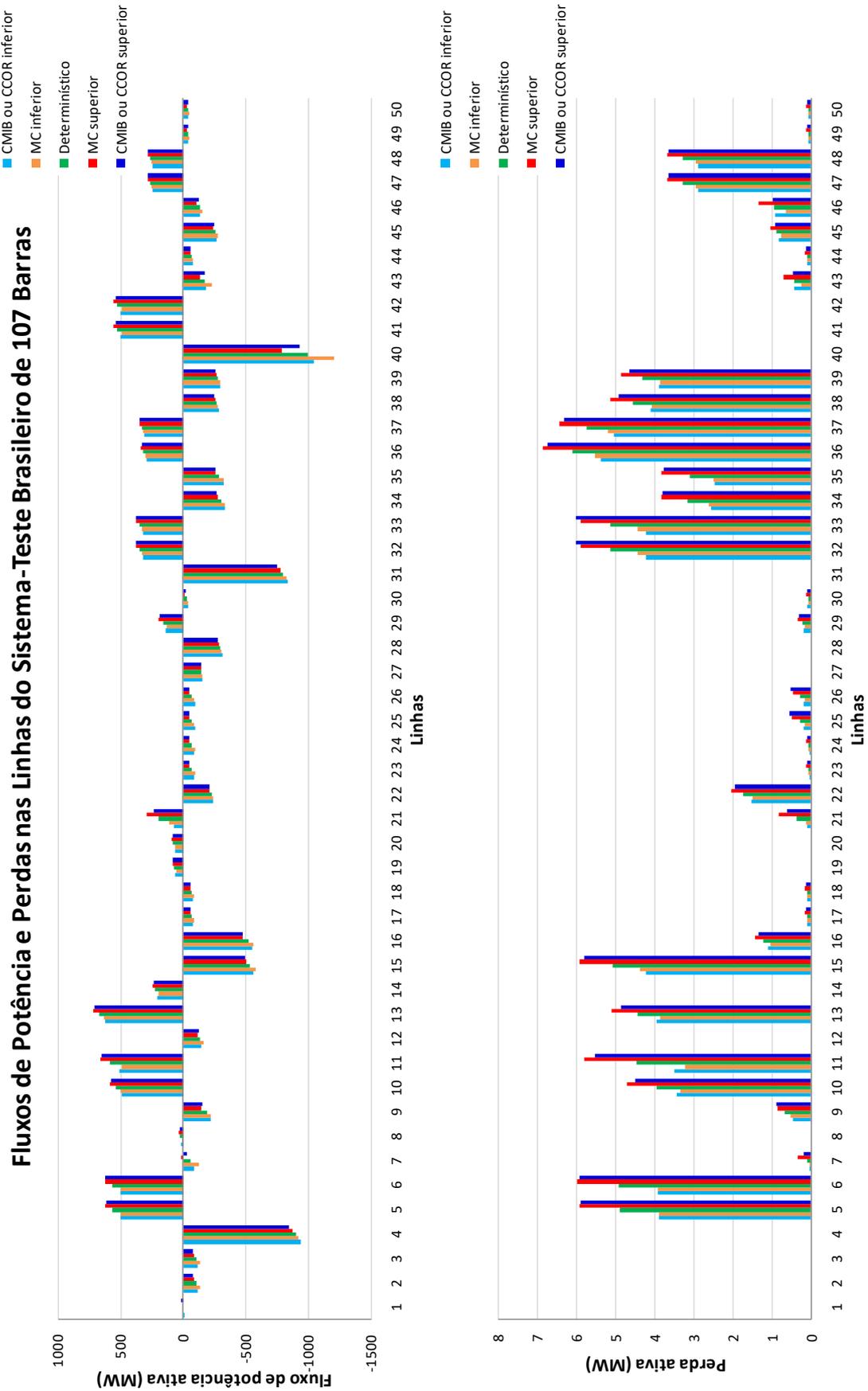


Os fluxos de potência e as perdas, considerando incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas do sistema, estão mostrados na Tabela 22 e nos gráficos da Figura 28.

Tabela 22 – Fluxos de potência e perdas intervalares do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas

Linha	Barra De	Barra Para	Fluxo de Potência Ativa (MW)		Perda Ativa (MW)	
			MC	CMIB ou CCOR	MC	CMIB ou CCOR
1	86	48	(0,00; 0,00)	(-17,96; 19,29)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
2	86	122	(-131,82; -86,16)	(-116,01; -82,38)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
3	86	122	(-131,82; -86,16)	(-116,01; -82,38)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
4	100	20	(-926,99; -873,01)	(-940,60; -847,55)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
5	100	101	(497,70; 616,76)	(498,84; 615,51)	(3,861; 5,919)	(3,883; 5,867)
6	100	101	(501,38; 621,33)	(502,53; 620,06)	(3,896; 5,972)	(3,918; 5,919)
7	100	210	(-127,62; 19,76)	(-87,50; -29,29)	(0,017; 0,326)	(0,021; 0,176)
8	100	213	(9,51; 33,26)	(13,59; 27,87)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
9	100	535	(-221,96; -150,47)	(-222,31; -154,70)	(0,493; 0,834)	(0,445; 0,870)
10	101	102	(497,14; 579,98)	(488,81; 576,02)	(3,338; 4,705)	(3,405; 4,471)
11	101	103	(492,74; 655,79)	(503,77; 647,77)	(3,199; 5,781)	(3,482; 5,530)
12	102	120	(-160,23; -118,45)	(-146,82; -123,56)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
13	102	1503	(630,50; 714,24)	(622,02; 708,15)	(3,840; 5,094)	(3,946; 4,835)
14	103	123	(198,84; 244,35)	(203,90; 234,27)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
15	104	103	(-579,22; -501,57)	(-566,13; -495,37)	(4,364; 5,915)	(4,196; 5,782)
16	104	1503	(-562,21; -480,88)	(-550,07; -481,93)	(1,020; 1,435)	(1,090; 1,327)
17	106	104	(-90,58; -60,06)	(-80,55; -63,51)	(0,079; 0,141)	(0,091; 0,116)
18	106	104	(-90,58; -60,06)	(-80,55; -63,51)	(0,079; 0,141)	(0,091; 0,116)
19	106	140	(57,74; 84,65)	(60,61; 76,75)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
20	106	140	(63,25; 92,74)	(66,41; 84,08)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
21	122	103	(108,71; 287,74)	(75,92; 235,80)	(0,114; 0,805)	(0,067; 0,602)
22	123	120	(-244,69; -209,04)	(-242,57; -207,89)	(1,463; 2,029)	(1,520; 1,937)
23	126	86	(-96,03; -53,01)	(-85,73; -47,02)	(0,033; 0,109)	(0,021; 0,094)
24	126	86	(-96,13; -53,07)	(-85,82; -47,08)	(0,033; 0,110)	(0,021; 0,094)
25	126	120	(-91,54; -48,22)	(-96,99; -53,35)	(0,133; 0,470)	(0,177; 0,537)
26	126	120	(-90,48; -47,66)	(-95,86; -52,73)	(0,131; 0,464)	(0,175; 0,530)
27	131	22	(-154,50; -145,50)	(-156,86; -141,21)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
28	134	12	(-308,38; -290,42)	(-312,35; -282,36)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
29	134	131	(124,92; 192,32)	(134,69; 181,72)	(0,138; 0,324)	(0,160; 0,290)
30	134	396	(-45,95; -16,67)	(-39,64; -24,57)	(0,053; 0,109)	(0,067; 0,089)
31	136	16	(-823,99; -776,01)	(-835,07; -754,48)	(0,000; 0,000)	(0,000; 0,000)
32	136	120	(325,32; 373,61)	(315,56; 379,60)	(4,423; 5,865)	(4,214; 6,001)
33	136	120	(325,32; 373,61)	(315,56; 379,60)	(4,423; 5,865)	(4,214; 6,001)

Figura 28 – Fluxos de potência e perdas intervalares nas linhas do sistema-teste brasileiro de 107 barras com incerteza de $\pm 3\%$ em todas as linhas e todas as cargas.



4.1.3.4 Comentários

Incerteza em todas as linhas

Todos os intervalos de módulo e de ângulo de fase da tensão, de fluxo de potência ativa e de perda ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contemplam os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC.

Incerteza em todas as cargas

A grande maioria dos intervalos de módulo da tensão, de fluxo de potência ativa e de perda ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contempla os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Porém, para algumas barras e linhas, as faixas geradas pelos métodos propostos não abrangem integralmente as respectivas faixas estabelecidas pela simulação de MC. Por exemplo, para o módulo da tensão na barra *35*, o limite inferior da faixa calculado pelos métodos propostos é 0,22% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 0,53% menor que o respectivo limite. Da mesma forma, para o fluxo de potência na linha *40*, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 14,28% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 18,49% menor que o respectivo limite. E para a perda na linha *100*, o limite superior calculado pelos métodos propostos é 16,80% menor que o respectivo limite obtido via MC.

A maioria dos intervalos de ângulo de fase da tensão, calculados via métodos CMIB ou CCOR, não abrange integralmente os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Por exemplo, para a barra *15*, o limite inferior da faixa calculado pelos métodos propostos é 5,05% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 4,55% menor que o respectivo limite.

Incerteza em todas as linhas e todas as cargas

Todos os intervalos de módulo da tensão, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contemplam os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC.

A maioria dos intervalos de ângulo de fase da tensão, calculados via métodos CMIB ou CCOR, não abrange integralmente os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Por exemplo, para a barra *15*, o limite inferior da faixa calculado pelos métodos propostos é 3,21% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 3,09% menor que o respectivo limite.

A grande maioria dos intervalos de fluxo de potência ativa e de perda ativa, calculados via métodos CMIB ou CCOR, contempla os respectivos intervalos gerados pela simulação de MC. Porém, para algumas linhas, as faixas geradas pelos métodos propostos não abrangem integralmente as respectivas faixas estabelecidas pela simulação de MC. Por

exemplo, para o fluxo de potência na linha 40, o limite inferior calculado pelos métodos propostos é 13,36% maior que o respectivo limite obtido via MC, ao passo que o limite superior é 18,24% menor que o respectivo limite. Da mesma forma, para a perda na linha 100, o limite superior calculado pelos métodos propostos é 13,53% menor que o respectivo limite obtido via MC.

4.2 TEMPO DE PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL

Os tempos médios de processamento, em segundos, demandados pelos métodos CMIB, \bar{t}_{CMIB} , e CCOR, \bar{t}_{CCOR} , e as razões entre eles para os diferentes cenários estudados, utilizando o sistema-teste brasileiro de 33 barras, o sistema-teste IEEE de 57 barras e o sistema-teste brasileiro de 107 barras, encontram-se nas Tabelas 23, 24 e 25, respectivamente. O tempo médio de processamento computacional é medido utilizando o comando "etime" do Matlab em 100 simulações.

Tabela 23 – Tempo médio de processamento computacional para o sistema-teste brasileiro de 33 barras

Cenário	\bar{t}_{CMIB} (s)	\bar{t}_{CCOR} (s)	$\bar{t}_{CMIB}/\bar{t}_{CCOR}$
Incerteza em todas as linhas	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	16,667
Incerteza em todas as barras	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	14,000
Incerteza em todas as linhas e todas as barras	$1,92 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	19,200

Tabela 24 – Tempo médio de processamento computacional para o sistema-teste IEEE de 57 barras

Cenário	\bar{t}_{CMIB} (s)	\bar{t}_{CCOR} (s)	$\bar{t}_{CMIB}/\bar{t}_{CCOR}$
Incerteza em todas as linhas	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	37,600
Incerteza em todas as barras	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$	35,333
Incerteza em todas as linhas e todas as barras	$1,083 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	33,844

Tabela 25 – Tempo médio de processamento computacional para o sistema-teste brasileiro de 107 barras

Cenário	\bar{t}_{CMIB} (s)	\bar{t}_{CCOR} (s)	$\bar{t}_{CMIB}/\bar{t}_{CCOR}$
Incerteza em todas as linhas	$1,293 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	44,586
Incerteza em todas as barras	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	50,000
Incerteza em todas as linhas e todas as barras	$6,358 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	52,545

Em todos os cenários, calculando os mesmos resultados, o método CMIB demanda tempo de processamento computacional muito maior que o método CCOR. Aparentemente, a razão aumenta à medida que aumenta o tamanho do sistema elétrico de potência. Em outras palavras, a razão é maior para sistemas de maior porte.

5 CONCLUSÃO

Esta dissertação de mestrado apresenta duas técnicas desenvolvidas para análise de fluxo de potência de sistemas sujeitos às incertezas nos parâmetros de linha e de carga, denominadas Compensação da Matriz Impedância de Barras (CMIB) e Compensação de Correntes (CCOR). Como os próprios nomes revelam, a primeira refere-se à consideração das incertezas na matriz impedância de barras e a segunda refere-se à consideração das incertezas no vetor de correntes injetadas nas barras. Ambas as estratégias estão descritas no Capítulo 3. Tais técnicas são adaptações de duas metodologias, já existentes na literatura, apresentadas no Capítulo 2.

Análises de três sistemas diferentes são realizadas, cujos resultados estão apresentados no Capítulo 4. Tais resultados são validados através da comparação com a simulação de Monte Carlo (MC). Os sistemas-testes brasileiro de 33 barras, IEEE de 57 barras e brasileiro de 107 barras, cujos dados determinísticos em regime permanente estão apresentados no Anexo A, são utilizados na avaliação do desempenho dos métodos propostos.

Conclui-se, primeiramente, que resultados intervalares coerentes são calculados para o fluxo de potência sujeito às incertezas, mesmo sem a aplicação de técnicas já muito citadas na literatura, como a matemática intervalar ou *affine*. Além disso, mesmo em alguns casos não abrangendo completamente as soluções encontradas pela simulação de MC, os gráficos dos resultados propostos possuem a mesma forma dos gráficos resultantes da simulação de MC. Portanto, de modo geral, para pequenas incertezas, tais técnicas desenvolvidas, mesmo que aproximadas, apresentam desempenho satisfatório, uma vez que a grande maioria dos intervalos gerados pelos métodos desenvolvidos, praticamente, coincide com ou contempla integralmente aqueles gerados pela simulação de MC.

Pode-se afirmar, também, que as duas metodologias desenvolvidas apresentam resultados idênticos. No entanto, a técnica CCOR demanda um tempo de processamento computacional muito menor que aquele exigido pela técnica CMIB, o que confere uma significativa vantagem à primeira em relação à segunda. Isso ocorre porque o método CMIB executa a montagem e a redução de matrizes impedância de barras aumentadas, para cada elemento com incerteza. Já o CCOR realiza cálculos mais simples.

Uma importante contribuição da análise de fluxo de potência sujeito às incertezas é na operação dos sistemas. Uma vez que a operação é dinâmica, a análise considerando as incertezas existentes nos sistemas elétricos favorece à tomada de decisões mais adequadas, de modo a otimizar os recursos energéticos disponíveis. Já na operação baseada no fluxo de potência determinístico, muitas vezes, é necessário assumir uma postura mais conservadora,

por desconhecer a realidade dos sistemas, na tentativa de evitar a falta do fornecimento de energia, não utilizando os recursos energéticos da melhor maneira.

Há, também, atualmente, uma inserção mais significativa nas redes elétricas das fontes renováveis de energia, como a energia solar e eólica. Estas, porém, são fontes de energia não despachável e apresentam grande variação ao longo do dia. Nestes casos, o estudo de fluxo de potência intervalar torna-se essencial para a operação desses sistemas com tipo de geração intermitente.

Uma consideração interessante é que os métodos propostos, também, podem ser aplicados na análise de contingências e no planejamento da expansão de redes de transmissão, pois tais situações exigem cálculos que avaliem a remoção ou adição de componentes do sistema. A única alteração no algoritmo desenvolvido refere-se à impedância do ramo a ser conectado em paralelo, para configurar a alteração no sistema. No caso de contingência, $z_{km,inserido}$ é o valor negativo da impedância da linha que foi perdida. E no caso do planejamento, $z_{km,inserido}$ é o próprio valor da linha a ser incluída no sistema.

Por fim, espera-se que este trabalho possa contribuir como uma ferramenta útil na análise de fluxo de potência sujeito às incertezas, auxiliando, de forma rápida e eficiente, na tomada de decisões.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando dar continuidade à pesquisa iniciada neste trabalho, algumas propostas de trabalhos futuros são apresentadas a seguir:

- Aperfeiçoamento dos algoritmos, visando aumentar a eficiência e reduzir o aparecimento de eventuais resultados indesejados no processo de solução, como no caso do ângulo de fase da tensão no sistema brasileiro de 33 barras.
- Análise de outras amostras e, também, das amostras apresentadas com o fluxo de potência determinístico.
- Aplicação dos métodos propostos em sistemas de grande porte.
- Comparação do desempenho e do tempo de processamento computacional dos modelos propostos com outras técnicas citadas na literatura, como a matemática intervalar ou *affine*.
- Inserção de dispositivos de controle nos modelos propostos para a análise de fluxo de potência intervalar, como controle de reativo, controle de taps de transformadores e

etc.

- Consideração de incertezas na geração, como por exemplo, redes com painéis fotovoltaicos e geradores eólicos.
- Realização da análise de sensibilidade em termos da variação percentual de uma grandeza, obtida via métodos propostos, em relação ao respectivo valor determinístico. Tal análise propicia, por exemplo, identificar a barra cuja tensão é mais sensível à incerteza associada a uma ou a todas as impedâncias de linha. Da mesma forma, permite identificar o ramo no qual o fluxo de potência ativa é mais sensível à incerteza associada a uma ou a todas as cargas.

REFERÊNCIAS

- [1] DIMITROVSKI, A.; TOMSOVIC, K. Boundary load flow solutions. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 1, p. 348-355, 2004.
- [2] CHEN, P.; CHEN, Z.; BAK-JENSEN, B. Probabilistic load flow: A review. In: *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*. IEEE, 2008. p. 1586-1591.
- [3] RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. *Simulation and the Monte Carlo Method*. John Wiley & Sons, 2016.
- [4] VACCARO, A.; CANIZARES, C. A.; VILLACCI, D. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 2, p. 624-632, 2010.
- [5] WANG, Z.; ALVARADO, F. L. Interval arithmetic in power flow analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 3, p. 1341-1349, 1992.
- [6] PEREIRA, L. E. S.; DA COSTA, V. M.; ROSA, A. L. S. Interval arithmetic in current injection power flow analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 43, n. 1, p. 1106-1113, 2012.
- [7] VACCARO, A.; CAÑIZARES, C. A.; BHATTACHARYA, K. A range arithmetic-based optimization model for power flow analysis under interval uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 2, p. 1179-1186, 2013.
- [8] PEREIRA, L. E. S.; DA COSTA, V. M. Interval analysis applied to the maximum loading point of electric power systems considering load data uncertainties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 54, p. 334-340, 2014.
- [9] DING, T. et al. Interval power flow analysis using linear relaxation and optimality-based bounds tightening (OBBT) methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 1, p. 177-188, 2015.
- [10] HONG, T.; RAZA, A.; DE LEÓN, F. Optimal power dispatch under load uncertainty using a stochastic approximation method. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 31, n. 6, p. 4495-4503, 2016.
- [11] PEREIRA, L. E. S.; DA COSTA, V. M. An efficient starting process for calculating interval power flow solutions at maximum loading point under load and line data uncertainties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 80, p. 91-95, 2016.
- [12] LIAO, X. et al. Interval method for uncertain power flow analysis based on Taylor inclusion function. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 11, n. 5, p. 1270-1278, 2017.
- [13] VACCARO, A.; CAÑIZARES, C. A. An affine arithmetic-based framework for uncertain power flow and optimal power flow studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 32, n. 1, p. 274-288, 2017.

- [14] ZHANG, C. et al. A mixed interval power flow analysis under rectangular and polar coordinate system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 32, n. 2, p. 1422-1429, 2017.
- [15] KHALAFI, Z. et al. Observability reliability evaluation in power systems considering data uncertainty. In: *PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven*. IEEE, 2015. p. 1-5.
- [16] LI, P.; ZHANG, B. Distribution system voltage control under uncertainties. In: *Signals, Systems, and Computers, 2017 51st Asilomar Conference on*. IEEE, 2017. p. 659-663.
- [17] HAN, T.; CHEN, Y.; MA, J. Multi-objective robust dynamic VAR planning in power transmission grids for improving short-term voltage stability under uncertainties. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 12, n. 8, p. 1929-1940, 2018.
- [18] RUBACK, R. O.; DA COSTA, V. M.; MEDEIROS, B. S. A new method for analyzing unsymmetrical faults under data uncertainties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 102, p. 38-51, 2018.
- [19] PIRNIA, M. et al. A novel affine arithmetic method to solve optimal power flow problems with uncertainties. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 29, n. 6, p. 2775-2783, 2014.
- [20] WANG, S.; HAN, L.; WU, L. Uncertainty tracing of distributed generations via complex affine arithmetic based unbalanced three-phase power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 6, p. 3053-3062, 2015.
- [21] LUJANO-ROJAS, J. M.; OSÓRIO, G. J.; CATALÃO, J. P. S. New probabilistic method for solving economic dispatch and unit commitment problems incorporating uncertainty due to renewable energy integration. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 78, p. 61-71, 2016.
- [22] DE OLIVEIRA, L. W.; SETA, F. S.; DE OLIVEIRA, E. J. Optimal reconfiguration of distribution systems with representation of uncertainties through interval analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 83, p. 382-391, 2016.
- [23] BAGHAEE, H. R. et al. Fuzzy unscented transform for uncertainty quantification of correlated wind/PV microgrids: possibilistic-probabilistic power flow based on RBFNNs. *IET Renewable Power Generation*, v. 11, n. 6, p. 867-877, 2017.
- [24] GUPTA, N.; DARATHA, N. Probabilistic three-phase load flow for unbalanced electrical systems with wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 87, p. 154-165, 2017.
- [25] MOHSENI-BONAB, S. M.; RABIEE, A. Optimal reactive power dispatch: a review, and a new stochastic voltage stability constrained multi-objective model at the presence of uncertain wind power generation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 11, n. 4, p. 815-829, 2017.
- [26] VIDOVIĆ, P. M.; SARIĆ, A. T. A novel correlated intervals-based algorithm for distribution power flow calculation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 90, p. 245-255, 2017.

- [27] WANG, Y. et al. Interval power flow analysis via multi-stage affine arithmetic for unbalanced distribution network. *Electric Power Systems Research*, v. 142, p. 1-8, 2017.
- [28] YANG, Y. et al. Transmission capacity margin assessment in power systems with uncertain wind integration. In: *Automation Science and Engineering (CASE), 2017 13th IEEE Conference on*. IEEE, 2017. p. 1386-1391.
- [29] ATTARHA, A.; AMJADY, N.; CONEJO, A. J. Adaptive robust AC optimal power flow considering load and wind power uncertainties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 96, p. 132-142, 2018.
- [30] KENARI, M. T.; SEPASIAN, M. S.; NAZAR, M. S. Probabilistic voltage stability assessment of distribution networks with wind generation using combined cumulants and maximum entropy method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 95, p. 96-107, 2018.
- [31] LUO, J.; SHI, L.; NI, Y. A solution of optimal power flow incorporating wind generation and power grid uncertainties. *IEEE Access*, 2018.
- [32] WANG, S. et al. Tracing harmonic contributions of multiple distributed generations in distribution systems with uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 95, p. 585-591, 2018.
- [33] YANG, X. et al. Real-time demand side management for a microgrid considering uncertainties. *IEEE Transactions on Smart Grid*, (Early Access), 2018.
- [34] STAGG, G. W.; EL-ABIAD, A. H. *Computer methods in power system analysis*. McGraw-Hill, 1968.
- [35] GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. *Power system analysis*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [36] MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. E. Blucher, 1983.
- [37] KRON, G. A method of solving very large physical systems in easy stages. *Proceedings of the IRE*, v. 42, n. 4, p. 680-686, 1954.
- [38] ALVES, W. *Proposição de Sistemas Teste para Análise Computacional de Sistemas de Potência*. 2007. Dissertação de M. Sc., Faculdade de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- [39] DABBAGCHI, I.; CHRISTIE, R. *Power systems test case archive*. University of Washington, 1993. Disponível em <https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf57/pg_tca57bus.htm>. Acesso em: 03 maio 2018.

APÊNDICE A – Código em Matlab dos Algoritmos Propostos

Neste apêndice, é apresentado o código desenvolvido em Matlab para execução dos algoritmos propostos para análise de incertezas em fluxo de potência, baseados nos métodos da Compensação da Matriz Impedância de Barras (CMIB) e Compensação de Correntes (CCOR).

A.1 Código principal

```

%-----
% ANÁLISE DE INCERTEZAS
% Parâmetros de Linha e de Carga
%
% Bárbara da Silva Medeiros
% 25/05/2018
%
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFJF
% Mestrado orientado pelo Professor Vander Menengoy da Costa
%-----
while(1)
    clc
    clear all
    close all
    warning off
    % INICIALIZAÇÃO COM A ESCOLHA DO SISTEMA ELÉTRICO
    while(1)
        fprintf('%s\n', ' ');
        fprintf('%s\n', '=====');
        fprintf('%s\n', 'PROGRAMA DE ANÁLISE DE INCERTEZAS ');
        fprintf('%s\n', '=====');
        fprintf('%s\n', ' ');
        fprintf('%s\n', 'Informe o sistema para análise:');
        fprintf('%s\n', '1. STB 33 Barras');
        fprintf('%s\n', '2. IEEE 57 Barras');
        fprintf('%s\n', '3. STB 107 Barras');
        fprintf('%s\n', ' ');
        sistema = input('Resposta: ');
        fprintf('%s\n', ' ');
        if(sistema ~= 1 && sistema ~= 2 && sistema ~= 3)
            clc
            fprintf('%s\n', 'Erro! Opção inválida.');
```

```

continue;
else
break;
end
end
if(sistema == 1)
dados33barras;
fprintf('%s\n','=====');
fprintf('%s\n',' STB DE 33 BARRAS ');
fprintf('%s\n','=====');
elseif(sistema == 2)
dados57barras;
fprintf('%s\n','=====');
fprintf('%s\n',' SISTEMA IEEE 57 BARRAS ');
fprintf('%s\n','=====');
elseif(sistema == 3)
dados107barras;
fprintf('%s\n','=====');
fprintf('%s\n',' STB DE 107 BARRAS ');
fprintf('%s\n','=====');
end
% Número de Barras
NBAR = length(DBAR(:,1));
% Número de Linhas
NLIN = length(DLIN(:,1));
DBAR_RENUMERADO = DBAR;
DLIN_RENUMERADO = DLIN;
for i = 1:NBAR
DBAR_RENUMERADO(i,1) = i;
end
for i = 1:NLIN
for j = 1:NBAR
if(DLIN(i,1) == DBAR(j,1))
DLIN_RENUMERADO(i,1) = j;
end
if(DLIN(i,2) == DBAR(j,1))
DLIN_RENUMERADO(i,2) = j;
end
end
end
% FLUXO DE POTÊNCIA DO CASO BASE
% Função fluxo_de_potencia
[ divergente_caso_base, v_caso_base, i_caso_base, V_caso_base, TETA_caso_base, ...
Ykm, Ybus_caso_base, Zbus_caso_base, BARRA, TIPO, DE, PARA, TAP, b, g, Jac, ...
ref, Pcalc, Qcalc, PD, QD ] = fluxo_de_potencia(DBAR, DLIN_RENUMERADO, Pbase);
% Zbus reduzido por kron em relação a barra de referência
[ Zkron_caso_base ] = kron(Zbus_caso_base, ref, NBAR);

```

```

% ANÁLISE DE INCERTEZAS
% Número de iterações de Monte Carlo
n_MC = 10000;
% ===== INCERTEZAS EM RAMO(S) =====
fprintf(' Informe o número de ramos com incerteza: de 0 a %d\n',NLIN);
fprintf('%s\n',' ');
while(1)
n_alteracoes_linha = input('Resposta: ');
fprintf('%s\n',' ');
if(n_alteracoes_linha > NLIN)
fprintf('%s\n','Erro! Opção inválida. ');
continue;
else
break;
end
end
if(n_alteracoes_linha == 0)
% Alterações para o método de Monte Carlo
DLIN_MC = zeros(size(DLIN,1),size(DLIN,2),n_MC);
for i = 1:n_MC
DLIN_MC(:,i) = DLIN_RENUMERADO;
end
else
linhas_alteradas = zeros(n_alteracoes_linha,1);
if(n_alteracoes_linha == NLIN)
for i = 1:NLIN
linhas_alteradas(i) = i;
end
else
fprintf('%s\n',' Indique a(s) linha(s) em análise: ');
for i = 1:NLIN
fprintf(' %d. linha %d - %d\n',i,DE(i),PARA(i));
end
fprintf('%s\n',' ');
for i = 1:n_alteracoes_linha
while(1)
linhas_alteradas(i) = input('Resposta: ');
if(linhas_alteradas(i) < 1 || linhas_alteradas(i) > NLIN)
fprintf('%s\n','Erro! Opção inválida. ');
continue;
else
break;
end
end
end
end
fprintf('%s\n',' ');
end

```

```

% Entrada dos dados de incerteza
fprintf('%s\n',' Informe o valor do intervalo de incerteza nas linhas indicadas:');
fprintf('%s\n',' ');
R_erro_percentual_min = input('Incerteza inferior na Resistência em %: ');
R_erro_percentual_max = input('Incerteza superior na Resistência em %: ');
X_erro_percentual_min = input('Incerteza inferior na Reatância em %: ');
X_erro_percentual_max = input('Incerteza superior na Reatância em %: ');
fprintf('%s\n',' ');
% Inicialização
R_erro_absoluto_min = zeros(n_alteracoes_linha,1);
R_erro_absoluto_max = zeros(n_alteracoes_linha,1);
R_linha_min = zeros(n_alteracoes_linha,1);
R_linha_max = zeros(n_alteracoes_linha,1);
X_erro_absoluto_min = zeros(n_alteracoes_linha,1);
X_erro_absoluto_max = zeros(n_alteracoes_linha,1);
X_linha_min = zeros(n_alteracoes_linha,1);
X_linha_max = zeros(n_alteracoes_linha,1);
for i = 1:n_alteracoes_linha
% Resistência
R_erro_absoluto_min(i) = (R_erro_percentual_min/100)*DLIN(linhas_alteradas(i),3);
R_erro_absoluto_max(i) = (R_erro_percentual_max/100)*DLIN(linhas_alteradas(i),3);
R_linha_min(i) = DLIN(linhas_alteradas(i),3) - R_erro_absoluto_min(i);
R_linha_max(i) = DLIN(linhas_alteradas(i),3) + R_erro_absoluto_max(i);
% Reatância
X_erro_absoluto_min(i) = (X_erro_percentual_min/100)*DLIN(linhas_alteradas(i),4);
X_erro_absoluto_max(i) = (X_erro_percentual_max/100)*DLIN(linhas_alteradas(i),4);
X_linha_min(i) = DLIN(linhas_alteradas(i),4) - X_erro_absoluto_min(i);
X_linha_max(i) = DLIN(linhas_alteradas(i),4) + X_erro_absoluto_max(i);
end
% Impedância
Zlinha_minmin = zeros(n_alteracoes_linha,1);
Zlinha_maxmin = zeros(n_alteracoes_linha,1);
Zlinha_minmax = zeros(n_alteracoes_linha,1);
Zlinha_maxmax = zeros(n_alteracoes_linha,1);
Zlinhakm_minmin = zeros(n_alteracoes_linha,1);
Zlinhakm_maxmin = zeros(n_alteracoes_linha,1);
Zlinhakm_minmax = zeros(n_alteracoes_linha,1);
Zlinhakm_maxmax = zeros(n_alteracoes_linha,1);
Zlinhakm = zeros(4,n_alteracoes_linha);
for i = 1:n_alteracoes_linha
Zlinha_minmin(i) = (R_linha_min(i) + 1j*X_linha_min(i))/100;
Zlinha_maxmin(i) = (R_linha_max(i) + 1j*X_linha_min(i))/100;
Zlinha_minmax(i) = (R_linha_min(i) + 1j*X_linha_max(i))/100;
Zlinha_maxmax(i) = (R_linha_max(i) + 1j*X_linha_max(i))/100;
Zlinhakm_minmin(i) = 1/(1/Zlinha_minmin(i) - Ykm(linhas_alteradas(i)));
Zlinhakm_maxmin(i) = 1/(1/Zlinha_maxmin(i) - Ykm(linhas_alteradas(i)));
Zlinhakm_minmax(i) = 1/(1/Zlinha_minmax(i) - Ykm(linhas_alteradas(i)));

```

```

Zlinhakm_maxmax(i) = 1/(1/Zlinha_maxmax(i) - Ykm(linhas_alteradas(i)));
Zlinhakm(1,i) = Zlinhakm_minmin(i);
Zlinhakm(2,i) = Zlinhakm_maxmin(i);
Zlinhakm(3,i) = Zlinhakm_minmax(i);
Zlinhakm(4,i) = Zlinhakm_maxmax(i);
end
% Alterações para o método de Monte Carlo
DLIN_incerteza = zeros(size(DLIN,1),size(DLIN,2),n_MC);
for l = 1:n_MC
DLIN_incerteza(:,l) = DLIN_RENUMERADO;
end
for i = 1:n_alteracoes_linha
for l = 1:n_MC
DLIN_incerteza(linhas_alteradas(i),3,l) = R_linha_min(i) + rand*(R_linha_max(i)-R_linha_min(i));
DLIN_incerteza(linhas_alteradas(i),4,l) = X_linha_min(i) + rand*(X_linha_max(i)-X_linha_min(i));
end
end
DLIN_MC = DLIN_incerteza;
end
% ===== INCERTEZAS EM CARGA(S) =====
NCARGA = 0;
DCARGA = zeros(NCARGA,size(DBAR,2));
R_carga = zeros(NCARGA);
X_carga = zeros(NCARGA);
V = zeros(NCARGA);
for i = 1:NBAR
if(DBAR(i,9) ~= 0)
NCARGA = NCARGA + 1;
DCARGA(NCARGA,:) = DBAR_RENUMERADO(i,:);
V(NCARGA,1) = V_caso_base(i);
end
end
fprintf(' Informe o número de cargas com incerteza: de 0 a %d\n',NCARGA);
fprintf('%s\n',' ');
while(1)
n_alteracoes_carga = input('Resposta: ');
fprintf('%s\n',' ');
if(n_alteracoes_carga > NCARGA)
fprintf('%s\n','Erro! Opção inválida. ');
continue;
else
break;
end
end
if(n_alteracoes_carga == 0)
% Alterações para o método de Monte Carlo
DBAR_MC = zeros(size(DBAR,1),size(DBAR,2),n_MC);

```

```

for i = 1:n_MC
DBAR_MC(:,:,i) = DBAR_RENUMERADO;
end
else
cargas_alteradas = zeros(n_alteracoes_carga,1);
if(n_alteracoes_carga == NCARGA)
for i = 1:NCARGA
cargas_alteradas(i) = i;
end
else
fprintf('%s\n',' Indique a(s) carga(s) em análise:');
for i = 1:NCARGA
fprintf(' %d. barra %d\n',i,DCARGA(i,1));
end
fprintf('%s\n',' ');
for i = 1:n_alteracoes_carga
while(1)
cargas_alteradas(i) = input('Resposta: ');
if(cargas_alteradas(i) < 1 || cargas_alteradas(i) > NCARGA)
fprintf('%s\n','Erro! Opção inválida. ');
continue;
else
break;
end
end
end
end
fprintf('%s\n',' ');
end
CARGA = DCARGA(:,1);
P = DCARGA(:,9)/Pbase;
Q = DCARGA(:,10)/Pbase;
for i = 1:NCARGA
R_carga(i) = (V(i)^2*P(i))/(P(i)^2+Q(i)^2);
X_carga(i) = (V(i)^2*Q(i))/(P(i)^2+Q(i)^2);
end
Z_carga = R_carga + lj*X_carga;
% Entrada dos dados de incerteza
fprintf('%s\n',' Informe o valor do intervalo de incerteza nas cargas indicadas:');
fprintf('%s\n',' ');
P_erro_percentual_min = input('Incerteza inferior na Potência Ativa em %: ');
P_erro_percentual_max = input('Incerteza superior na Potência Ativa em %: ');
Q_erro_percentual_min = input('Incerteza inferior na Potência Reativa em %: ');
Q_erro_percentual_max = input('Incerteza superior na Potência Reativa em %: ');
fprintf('%s\n',' ');
% Inicialização
P_erro_absoluto_min = zeros(n_alteracoes_carga,1);
P_erro_absoluto_max = zeros(n_alteracoes_carga,1);

```

```

P_min = zeros(n_alteracoes_carga,1);
P_max = zeros(n_alteracoes_carga,1);
Q_erro_absoluto_min = zeros(n_alteracoes_carga,1);
Q_erro_absoluto_max = zeros(n_alteracoes_carga,1);
Q_min = zeros(n_alteracoes_carga,1);
Q_max = zeros(n_alteracoes_carga,1);
G_carga_min = zeros(n_alteracoes_carga,1);
G_carga_max = zeros(n_alteracoes_carga,1);
B_carga_min = zeros(n_alteracoes_carga,1);
B_carga_max = zeros(n_alteracoes_carga,1);
delta_P_min = zeros(NBAR,1);
delta_P_max = zeros(NBAR,1);
delta_Q_min = zeros(NBAR,1);
delta_Q_max = zeros(NBAR,1);
for i = 1:n_alteracoes_carga
% Potência Ativa
P_erro_absoluto_min(i) = (P_erro_percentual_min/100)*P(cargas_alteradas(i));
P_erro_absoluto_max(i) = (P_erro_percentual_max/100)*P(cargas_alteradas(i));
P_min(i) = P(cargas_alteradas(i)) - P_erro_absoluto_min(i);
P_max(i) = P(cargas_alteradas(i)) + P_erro_absoluto_max(i);
% Potência Reativa
Q_erro_absoluto_min(i) = (Q_erro_percentual_min/100)*Q(cargas_alteradas(i));
Q_erro_absoluto_max(i) = (Q_erro_percentual_max/100)*Q(cargas_alteradas(i));
Q_min(i) = Q(cargas_alteradas(i)) - Q_erro_absoluto_min(i);
Q_max(i) = Q(cargas_alteradas(i)) + Q_erro_absoluto_max(i);
% Delta P
delta_P_min(CARGA(cargas_alteradas(i))) = P_min(i)-P(cargas_alteradas(i));
delta_P_max(CARGA(cargas_alteradas(i))) = P_max(i)-P(cargas_alteradas(i));
% Delta Q
delta_Q_min(CARGA(cargas_alteradas(i))) = Q_min(i)-Q(cargas_alteradas(i));
delta_Q_max(CARGA(cargas_alteradas(i))) = Q_max(i)-Q(cargas_alteradas(i));
end
delta_y_min = [ delta_P_min
delta_Q_min ];
delta_y_max = [ delta_P_max
delta_Q_max ];
delta_x_min = Jac\delta_y_min;
delta_x_max = Jac\delta_y_max;
delta_theta_min = delta_x_min(1:NBAR,1);
delta_theta_max = delta_x_max(1:NBAR,1);
delta_V_min = delta_x_min((NBAR+1):2*NBAR,1);
delta_V_max = delta_x_max((NBAR+1):2*NBAR,1);
for i = 1:n_alteracoes_carga
% Resistência
G_carga_min(i) = (1/V(cargas_alteradas(i))^2)*(delta_P_min(CARGA(cargas_alteradas(i))));
G_carga_max(i) = (1/V(cargas_alteradas(i))^2)*(delta_P_max(CARGA(cargas_alteradas(i))));
% Reatância

```

```

B_carga_min(i) = - (1/V(cargas_alteradas(i))^2)*(delta_Q_min(CARGA(cargas_alteradas(i))));
B_carga_max(i) = - (1/V(cargas_alteradas(i))^2)*(delta_Q_max(CARGA(cargas_alteradas(i))));
end
% Impedância
Ycargakm_minmin = zeros(n_alteracoes_carga,1);
Ycargakm_maxmin = zeros(n_alteracoes_carga,1);
Ycargakm_minmax = zeros(n_alteracoes_carga,1);
Ycargakm_maxmax = zeros(n_alteracoes_carga,1);
Zcargakm = zeros(4,n_alteracoes_carga);
for i = 1:n_alteracoes_carga
Ycargakm_minmin(i) = G_carga_min(i) + 1j*B_carga_min(i);
Ycargakm_maxmin(i) = G_carga_max(i) + 1j*B_carga_min(i);
Ycargakm_minmax(i) = G_carga_min(i) + 1j*B_carga_max(i);
Ycargakm_maxmax(i) = G_carga_max(i) + 1j*B_carga_max(i);
Zcargakm(1,i) = 1/Ycargakm_minmin(i);
Zcargakm(2,i) = 1/Ycargakm_maxmin(i);
Zcargakm(3,i) = 1/Ycargakm_minmax(i);
Zcargakm(4,i) = 1/Ycargakm_maxmax(i);
end
% Alterações para o método de Monte Carlo
DBAR_incerteza = zeros(size(DBAR,1),size(DBAR,2),n_MC);
for l = 1:n_MC
DBAR_incerteza(:,l) = DBAR_RENUMERADO;
end
for i = 1:n_alteracoes_carga
for l = 1:n_MC
DBAR_incerteza(CARGA(cargas_alteradas(i)),9,l) = (P_min(i) + rand*(P_max(i)-P_min(i)))*Pbase;
DBAR_incerteza(CARGA(cargas_alteradas(i)),10,l) = (Q_min(i) + rand*(Q_max(i)-Q_min(i)))*Pbase;
end
end
DBAR_MC = DBAR_incerteza;
end
% ===== MÉTODO DE MONTE CARLO =====
% Iniciliazação
divergente_mc = zeros(n_MC);
v_mc = zeros(NBAR,1,n_MC);
i_mc = zeros(NBAR,1,n_MC);
V_mc = zeros(NBAR,1,n_MC);
TETA_mc = zeros(NBAR,1,n_MC);
V_mc_min = zeros(NBAR,1);
V_mc_max = zeros(NBAR,1);
TETA_mc_min = zeros(NBAR,1);
TETA_mc_max = zeros(NBAR,1);
fluxo_mc = zeros(NLIN,n_MC);
fluxo_mc_min = zeros(NLIN,1);
fluxo_mc_max = zeros(NLIN,1);
perdas_mc = zeros(NLIN,n_MC);

```

```

perdas_mc_min = zeros(NLIN,1);
perdas_mc_max = zeros(NLIN,1);
% Função fluxo_de_potencia
for i = 1:n_MC
[ divergente_mc(i), v_mc(:,i), i_mc(:,i), V_mc(:,i), TETA_mc(:,i) ] = ...
fluxo_de_potencia(DBAR_MC(:,i), DLIN_MC(:,i), Pbase);
[ fluxo_mc(:,i),perdas_mc(:,i) ] = fluxo(V_mc(:,i), TETA_mc(:,i), NLIN, DE, PARA, TAP, b, g,
Pbase);
end
for i = 1:NBAR
V_mc_min(i) = min(V_mc(i,:));
V_mc_max(i) = max(V_mc(i,:));
TETA_mc_min(i) = min(TETA_mc(i,:));
TETA_mc_max(i) = max(TETA_mc(i,:));
end
for i = 1:NLIN
fluxo_mc_min(i) = min(fluxo_mc(i,:));
fluxo_mc_max(i) = max(fluxo_mc(i,:));
perdas_mc_min(i) = min(perdas_mc(i,:));
perdas_mc_max(i) = max(perdas_mc(i,:));
end
% ===== MÉTODOS EXISTENTES =====
% APENAS LINHAS
if (n_alteracoes_carga == 0)
n_iteracoes_linha = size(Zlinhakm,1);
% ===== COMPENSAÇÃO DA MATRIZ ZBARRA =====
v_cmib = zeros(NBAR,1,n_iteracoes_linha);
diferenca = zeros(NBAR,NBAR,n_iteracoes_linha);
V_cmib = zeros(NBAR,1,n_iteracoes_linha);
TETA_cmib = zeros(NBAR,1,n_iteracoes_linha);
V_cmib_min = zeros(NBAR,1);
V_cmib_max = zeros(NBAR,1);
TETA_cmib_min = zeros(NBAR,1);
TETA_cmib_max = zeros(NBAR,1);
fluxo_cmib = zeros(NLIN,n_iteracoes_linha);
fluxo_cmib_min = zeros(NLIN,1);
fluxo_cmib_max = zeros(NLIN,1);
perdas_cmib = zeros(NLIN,n_iteracoes_linha);
perdas_cmib_min = zeros(NLIN,1);
perdas_cmib_max = zeros(NLIN,1);
for i = 1:n_iteracoes_linha
% Função compensacao_zbarra
[ v_cmib(:,i) ] = compensacao_zbarra(i_caso_base, n_alteracoes_linha, n_alteracoes_carga, ...
DE(linhas_alteradas), PARA(linhas_alteradas), [], Zbus_caso_base, Zlinhakm(i,:), [], NBAR);
% Normalização
v_cmib(:,i) = v_cmib(:,i)/v_cmib(ref,:,i)*v_caso_base(ref);
% Coordenadas polares

```

```

V_cmib(:, :, i) = abs(v_cmib(:, :, i));
TETA_cmib(:, :, i) = angle(v_cmib(:, :, i));
% Correção dos Valores das Barras PV
for k = 1:NBAR
if TIPO(k) == 1
V_cmib(k, :, i) = V_caso_base(k);
end
end
[ fluxo_cmib(:, :, i), perdas_cmib(:, :, i) ] = fluxo(V_cmib(:, :, i), TETA_cmib(:, :, i), NLIN, DE, PARA, TAP, b,
g, Pbase);
end
for i = 1:NBAR
V_cmib_min(i) = min(V_cmib(i, :, :));
V_cmib_max(i) = max(V_cmib(i, :, :));
TETA_cmib_min(i) = min(TETA_cmib(i, :, :));
TETA_cmib_max(i) = max(TETA_cmib(i, :, :));
end
for i = 1:NLIN
fluxo_cmib_min(i) = min(fluxo_cmib(i, :));
fluxo_cmib_max(i) = max(fluxo_cmib(i, :));
perdas_cmib_min(i) = min(perdas_cmib(i, :));
perdas_cmib_max(i) = max(perdas_cmib(i, :));
end
% ===== COMPENSAÇÃO DE CORRENTES =====
v_ccor = zeros(NBAR, 1, n_iteracoes_linha);
V_ccor = zeros(NBAR, 1, n_iteracoes_linha);
TETA_ccor = zeros(NBAR, 1, n_iteracoes_linha);
V_ccor_min = zeros(NBAR, 1);
V_ccor_max = zeros(NBAR, 1);
TETA_ccor_min = zeros(NBAR, 1);
TETA_ccor_max = zeros(NBAR, 1);
fluxo_ccor = zeros(NLIN, n_iteracoes_linha);
fluxo_ccor_min = zeros(NLIN, 1);
fluxo_ccor_max = zeros(NLIN, 1);
perdas_ccor = zeros(NLIN, n_iteracoes_linha);
perdas_ccor_min = zeros(NLIN, 1);
perdas_ccor_max = zeros(NLIN, 1);
for i = 1:n_iteracoes_linha
% Função compensacao_correntes
[ v_ccor(:, :, i) ] = compensacao_correntes(i_caso_base, n_alteracoes_linha, n_alteracoes_carga, ...
DE(linhas_alteradas), PARA(linhas_alteradas), [], Zbus_caso_base, Zlinhakm(i, :), [], NBAR);
% Normalização
v_ccor(:, :, i) = v_ccor(:, :, i)/v_ccor(ref, :, i)*v_caso_base(ref);
% Coordenadas polares
V_ccor(:, :, i) = abs(v_ccor(:, :, i));
TETA_ccor(:, :, i) = angle(v_ccor(:, :, i));
% Correção dos Valores das Barras PV

```

```

for k = 1:NBAR
if TIPO(k) == 1
V_ccor(k,:,i) = V_caso_base(k);
end
end
[ fluxo_ccor(:,i),perdas_ccor(:,i) ] = fluxo(V_ccor(:,i), TETA_ccor(:,i), NLIN, DE, PARA, TAP, b, g,
Pbase);
end
for i = 1:NBAR
V_ccor_min(i) = min(V_ccor(i,:,:));
V_ccor_max(i) = max(V_ccor(i,:,:));
TETA_ccor_min(i) = min(TETA_ccor(i,:,:));
TETA_ccor_max(i) = max(TETA_ccor(i,:,:));
end
for i = 1:NLIN
fluxo_ccor_min(i) = min(fluxo_ccor(i,:));
fluxo_ccor_max(i) = max(fluxo_ccor(i,:));
perdas_ccor_min(i) = min(perdas_ccor(i,:));
perdas_ccor_max(i) = max(perdas_ccor(i,:));
end
% APENAS CARGAS
elseif(n_alteracoes_linha == 0)
n_iteracoes_carga = size(Zcargakm,1);
% ===== COMPENSAÇÃO DA MATRIZ ZBARRA =====
v_cmib = zeros(NBAR,1,n_iteracoes_carga);
diferenca = zeros(NBAR,NBAR,n_iteracoes_carga);
V_cmib = zeros(NBAR,1,n_iteracoes_carga);
TETA_cmib = zeros(NBAR,1,n_iteracoes_carga);
V_cmib_min = zeros(NBAR,1);
V_cmib_max = zeros(NBAR,1);
TETA_cmib_min = zeros(NBAR,1);
TETA_cmib_max = zeros(NBAR,1);
fluxo_cmib = zeros(NLIN,n_iteracoes_carga);
fluxo_cmib_min = zeros(NLIN,1);
fluxo_cmib_max = zeros(NLIN,1);
perdas_cmib = zeros(NLIN,n_iteracoes_carga);
perdas_cmib_min = zeros(NLIN,1);
perdas_cmib_max = zeros(NLIN,1);
for i = 1:n_iteracoes_carga
% Função compensacao_zbarra
[ v_cmib(:,i) ] = compensacao_zbarra(i_caso_base, n_alteracoes_linha, n_alteracoes_carga, [], [],
CARGA(cargas_alteradas), Zbus_caso_base, [], Zcargakm(i,:), NBAR);
% Normalização
v_cmib(:,i) = v_cmib(:,i)/v_cmib(ref,:)*v_caso_base(ref);
% Coordenadas polares
V_cmib(:,i) = abs(v_cmib(:,i));
TETA_cmib(:,i) = angle(v_cmib(:,i));

```

```

% Correção dos Valores das Barras PV
for k = 1:NBAR
if TIPO(k) == 1
V_cmib(k,:,i) = V_caso_base(k);
end
end
[ fluxo_cmib(:,i),perdas_cmib(:,i) ] = fluxo(V_cmib(:,i), TETA_cmib(:,i), NLIN, DE, PARA, TAP, b,
g, Pbase);
end
for i = 1:NBAR
V_cmib_min(i) = min(V_cmib(i,:));
V_cmib_max(i) = max(V_cmib(i,:));
TETA_cmib_min(i) = min(TETA_cmib(i,:));
TETA_cmib_max(i) = max(TETA_cmib(i,:));
end
for i = 1:NLIN
fluxo_cmib_min(i) = min(fluxo_cmib(i,:));
fluxo_cmib_max(i) = max(fluxo_cmib(i,:));
perdas_cmib_min(i) = min(perdas_cmib(i,:));
perdas_cmib_max(i) = max(perdas_cmib(i,:));
end
% ===== COMPENSAÇÃO DE CORRENTES =====
v_ccor = zeros(NBAR,1,n_iteracoes_carga);
V_ccor = zeros(NBAR,1,n_iteracoes_carga);
TETA_ccor = zeros(NBAR,1,n_iteracoes_carga);
V_ccor_min = zeros(NBAR,1);
V_ccor_max = zeros(NBAR,1);
TETA_ccor_min = zeros(NBAR,1);
TETA_ccor_max = zeros(NBAR,1);
fluxo_ccor = zeros(NLIN,n_iteracoes_carga);
fluxo_ccor_min = zeros(NLIN,1);
fluxo_ccor_max = zeros(NLIN,1);
perdas_ccor = zeros(NLIN,n_iteracoes_carga);
perdas_ccor_min = zeros(NLIN,1);
perdas_ccor_max = zeros(NLIN,1);
for i = 1:n_iteracoes_carga
% Função compensacao_correntes
[ v_ccor(:,i) ] = compensacao_correntes(i_caso_base, n_alteracoes_linha, n_alteracoes_carga, [], [],
CARGA(cargas_alteradas), Zbus_caso_base, [], Zcargakm(i,:), NBAR);
% Normalização
v_ccor(:,i) = v_ccor(:,i)/v_ccor(ref,:,i)*v_caso_base(ref);
% Coordenadas polares
V_ccor(:,i) = abs(v_ccor(:,i));
TETA_ccor(:,i) = angle(v_ccor(:,i));
% Correção dos Valores das Barras PV
for k = 1:NBAR
if TIPO(k) == 1

```

```

V_ccor(k,:,i) = V_caso_base(k);
end
end
[ fluxo_ccor(:,i),perdas_ccor(:,i) ] = fluxo(V_ccor(:,i), TETA_ccor(:,i), NLIN, DE, PARA, TAP, b, g,
Pbase);
end
for i = 1:NBAR
V_ccor_min(i) = min(V_ccor(i,:,:));
V_ccor_max(i) = max(V_ccor(i,:,:));
TETA_ccor_min(i) = min(TETA_ccor(i,:,:));
TETA_ccor_max(i) = max(TETA_ccor(i,:,:));
end
for i = 1:NLIN
fluxo_ccor_min(i) = min(fluxo_ccor(i,:));
fluxo_ccor_max(i) = max(fluxo_ccor(i,:));
perdas_ccor_min(i) = min(perdas_ccor(i,:));
perdas_ccor_max(i) = max(perdas_ccor(i,:));
end
% LINHAS E CARGAS
else
n_iteracoes_linha = size(Zlinhakm,1);
n_iteracoes_carga = size(Zcargakm,1);
n_iteracoes = n_iteracoes_linha*n_iteracoes_carga;
% ===== COMPENSAÇÃO DA MATRIZ ZBARRA =====
a = 1;
v_cmib = zeros(NBAR,1,n_iteracoes);
V_cmib = zeros(NBAR,1,n_iteracoes);
TETA_cmib = zeros(NBAR,1,n_iteracoes);
V_cmib_min = zeros(NBAR,1);
V_cmib_max = zeros(NBAR,1);
TETA_cmib_min = zeros(NBAR,1);
TETA_cmib_max = zeros(NBAR,1);
fluxo_cmib = zeros(NLIN,n_iteracoes);
fluxo_cmib_min = zeros(NLIN,1);
fluxo_cmib_max = zeros(NLIN,1);
perdas_cmib = zeros(NLIN,n_iteracoes);
perdas_cmib_min = zeros(NLIN,1);
perdas_cmib_max = zeros(NLIN,1);
for i = 1:n_iteracoes_linha
for j = 1:n_iteracoes_carga
% Função compensacao_zbarra
[ v_cmib(:,i,a) ] = compensacao_zbarra(i_caso_base, n_alteracoes_linha, n_alteracoes_carga, ...
DE(linhas_alteradas), PARA(linhas_alteradas), CARGA(cargas_alteradas), Zbus_caso_base, ...
Zlinhakm(i,:), Zcargakm(j,:), NBAR);
% Normalização
v_cmib(:,i,a) = v_cmib(:,i,a)/v_cmib(ref,:,a)*v_caso_base(ref);
% Coordenadas polares

```

```

V_cmib(:, :, a) = abs(v_cmib(:, :, a));
TETA_cmib(:, :, a) = angle(v_cmib(:, :, a));
% Correção dos Valores das Barras PV
for k = 1:NBAR
if TIPO(k) == 1
V_cmib(k, :, a) = V_caso_base(k);
end
end
[ fluxo_cmib(:, a), perdas_cmib(:, a) ] = fluxo(V_cmib(:, :, a), TETA_cmib(:, :, a), NLIN, DE, PARA, TAP,
b, g, Pbase);
a = a + 1;
end
end
for i = 1:NBAR
V_cmib_min(i) = min(V_cmib(i, :, :));
V_cmib_max(i) = max(V_cmib(i, :, :));
TETA_cmib_min(i) = min(TETA_cmib(i, :, :));
TETA_cmib_max(i) = max(TETA_cmib(i, :, :));
end
for i = 1:NLIN
fluxo_cmib_min(i) = min(fluxo_cmib(i, :));
fluxo_cmib_max(i) = max(fluxo_cmib(i, :));
perdas_cmib_min(i) = min(perdas_cmib(i, :));
perdas_cmib_max(i) = max(perdas_cmib(i, :));
end
% ===== COMPENSAÇÃO DE CORRENTES =====
a = 1;
v_ccor = zeros(NBAR, 1, n_iteracoes);
V_ccor = zeros(NBAR, 1, n_iteracoes);
TETA_ccor = zeros(NBAR, 1, n_iteracoes);
V_ccor_min = zeros(NBAR, 1);
V_ccor_max = zeros(NBAR, 1);
TETA_ccor_min = zeros(NBAR, 1);
TETA_ccor_max = zeros(NBAR, 1);
fluxo_ccor = zeros(NLIN, n_iteracoes);
fluxo_ccor_min = zeros(NLIN, 1);
fluxo_ccor_max = zeros(NLIN, 1);
perdas_ccor = zeros(NLIN, n_iteracoes);
perdas_ccor_min = zeros(NLIN, 1);
perdas_ccor_max = zeros(NLIN, 1);
for i = 1:n_iteracoes_linha
for j = 1:n_iteracoes_carga
% Função compensacao_correntes
[ v_ccor(:, :, a) ] = compensacao_correntes(i_caso_base, n_alteracoes_linha, n_alteracoes_carga, ...
DE(linhas_alteradas), PARA(linhas_alteradas), CARGA(cargas_alteradas), Zbus_caso_base, ...
Zlinhakm(i, :), Zcargakm(j, :), NBAR);
% Normalização

```

```

v_ccor(:,a) = v_ccor(:,a)/v_ccor(ref,a)*v_caso_base(ref);
% Coordenadas polares
V_ccor(:,a) = abs(v_ccor(:,a));
TETA_ccor(:,a) = angle(v_ccor(:,a));
% Correção dos Valores das Barras PV
for k = 1:NBAR
if TIPO(k) == 1
V_ccor(k,a) = V_caso_base(k);
end
end
[ fluxo_ccor(:,a),perdas_ccor(:,a) ] = fluxo(V_ccor(:,a), TETA_ccor(:,a), NLIN, DE, PARA, TAP, b,
g, Pbase);
a = a + 1;
end
end
for i = 1:NBAR
V_ccor_min(i) = min(V_ccor(i,:));
V_ccor_max(i) = max(V_ccor(i,:));
TETA_ccor_min(i) = min(TETA_ccor(i,:));
TETA_ccor_max(i) = max(TETA_ccor(i,:));
end
for i = 1:NLIN
fluxo_ccor_min(i) = min(fluxo_ccor(i,:));
fluxo_ccor_max(i) = max(fluxo_ccor(i,:));
perdas_ccor_min(i) = min(perdas_ccor(i,:));
perdas_ccor_max(i) = max(perdas_ccor(i,:));
end
end
resultado_v = [V_mc_min V_mc_max V_cmib_min V_cmib_max 180/pi*TETA_mc_min...
180/pi*TETA_mc_max 180/pi*TETA_cmib_min 180/pi*TETA_cmib_max];
resultado_p = [fluxo_mc_min(:,1) fluxo_mc_max(:,1) fluxo_cmib_min(:,1) fluxo_cmib_max(:,1) ...
perdas_mc_min perdas_mc_max perdas_cmib_min perdas_cmib_max];
% FINALIZAÇÃO
while(1)
disp(' ')
disp(' Deseja executar outro sistema?');
disp(' 1. Sim');
disp(' 2. Não');
disp(' ');
novo_sistema = input('Resposta: ');
if(novo_sistema ~= 1 && novo_sistema ~= 2)
clc
disp(' Erro! Opção inválida. ');
continue;
else
break;
end
end

```

```

end
if(novo_sistema == 1)
clc
continue;
elseif(novo_sistema == 2)
clc
disp(' Algoritmo Finalizado. ');
break;
end
end

```

A.2 Função fluxo_de_potencia

```

function [ divergente, v, I, V, TETA, Ykm, Ybus, Zbus, BARRA, TIPO, DE, PARA, TAP, b, g, Jac, ref,
Pcalc, Qcalc, PD, QD ] = fluxo_de_potencia( DBAR, DLIN, Pbase )
% ----- TRATAMENTO DOS DADOS -----
% Número de Barras
NBAR = length(DBAR(:,1));
% Número de Linhas
NLIN = length(DLIN(:,1));
% Separação em Vetores
BARRA = DBAR(:,1);
TIPO = DBAR(:,2);
V = DBAR(:,3);
TETA = DBAR(:,4)*pi/180;
PG = DBAR(:,5)/Pbase;
QG = DBAR(:,6)/Pbase;
QN = DBAR(:,7)/Pbase;
QM = DBAR(:,8)/Pbase;
PD = DBAR(:,9)/Pbase;
QD = DBAR(:,10)/Pbase;
SHUNT = DBAR(:,11)/Pbase;
DE = DLIN(:,1);
PARA = DLIN(:,2);
R = DLIN(:,3)/100;
X = DLIN(:,4)/100;
BSH =(DLIN(:,5)/2)/Pbase;
TAP = DLIN(:,6);
DEFASAGEM = DLIN(:,7);
% ----- YBUS -----
Ybus = zeros(NBAR);
k(NLIN) = zeros;
m(NLIN) = zeros;
Ykm = 1./(R+1i*X); % Admitância Série

```

```

g = real(Ykm);
b = imag(Ykm);
for a = 1:NLIN
k(a) = DE(a);
m(a) = PARA(a);
p = k(a);
q = m(a);
r = Ykm(a);
Ybus(p,p) = Ybus(p,p) + 1i*BSH(a) + ((1/TAP(a))^2)*r;
if(p ~ = q)
Ybus(q,q) = Ybus(q,q) + 1i*BSH(a) + r;
Ybus(p,q) = Ybus(p,q) - (1/TAP(a))*exp(-1i*DEFASAGEM(a))*r;
Ybus(q,p) = Ybus(q,p) - (1/TAP(a))*exp(1i*DEFASAGEM(a))*r;
end
end
% Inserção dos elementos shunts de barra
for a = 1:NBAR
Ybus(a,a) = Ybus(a,a) + 1i*SHUNT(a);
end
% Parte Real
G = real(Ybus);
% Parte Imaginária
B = imag(Ybus);
% Matriz de impedâncias Zbus
Zbus = inv(Ybus);
% Barra de Referência
for i = 1:NBAR
if(TIPO(i) == 2)
ref = i;
end
end
% ----- RESÍDUOS DE POTÊNCIA -----
% Inicialização
delta_P(NBAR) = zeros;
delta_Q(NBAR) = zeros;
% Cálculo dos parâmetros do circuito
v = V.*exp(1i*TETA); % Tensões em módulo e fase
I = Ybus*v; % Correntes injetadas
S = v.*conj(I); % Potência Complexa
% Valores calculados de potência ativa e reativa
Pcalc = real(S);
Qcalc = imag(S);
% Valores especificados de potência ativa e reativa
Pesp = PG - PD;
Qesp = QG - QD;
for a = 1:NBAR
delta_P(a) = Pesp(a) - Pcalc(a);

```

```

delta_Q(a) = Qesp(a) - Qcalc(a);
% Se a barra for do tipo 2 (swing), não existem resíduos
if(TIPO(a) == 2)
delta_P(a) = 0;
delta_Q(a) = 0;
end
% Se a barra for do tipo 1 (PV), não existem resíduos de Q
if(TIPO(a) == 1)
delta_Q(a) = 0;
end
end
% Vetor de resíduos
delta_Y = [delta_P'
delta_Q'];
% ----- MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON -----
iteracao = 0; % Número de iterações
tolerancia = 0.001; % Tolerância para convergência
divergente = 0; % Convergência do método
H = zeros(NBAR); % Submatriz de Jac = dP/dTeta
N = zeros(NBAR); % Submatriz de Jac = dP/dV
J = zeros(NBAR); % Submatriz de Jac = dQ/dTeta
L = zeros(NBAR); % Submatriz de Jac = dQ/dV
while (divergente == 0)
% ----- MATRIZ JACOBIANA -----
for x = 1:NBAR
for y = 1:NBAR
if(x == y)
H(x,x) = -Qcalc(x) - V(x)^2*B(x,x);
N(x,x) = V(x)\(Pcalc(x) + V(x)^2*G(x,x));
J(x,x) = Pcalc(x) - V(x)^2*G(x,x);
L(x,x) = V(x)\(Qcalc(x) - V(x)^2*B(x,x));
% Se a barra for do tipo 2 (swing), não existem as
% derivadas de P e de Q
if(TIPO(x) == 2)
H(x,x) = 10e10;
L(x,x) = 10e10;
end
% Se a barra for do tipo 1 (PV), não existe a derivada de Q
if(TIPO(x) == 1)
L(x,x) = 10e10;
end
else
H(x,y) = V(x)*V(y)*(G(x,y)*sin(TETA(x) - TETA(y)) - B(x,y)*cos(TETA(x) - TETA(y)));
N(x,y) = V(x)*(G(x,y)*cos(TETA(x) - TETA(y)) + B(x,y)*sin(TETA(x) - TETA(y)));
J(x,y) = -V(x)*V(y)*(G(x,y)*cos(TETA(x) - TETA(y)) + B(x,y)*sin(TETA(x) - TETA(y)));
L(x,y) = V(x)*(G(x,y)*sin(TETA(x) - TETA(y)) - B(x,y)*cos(TETA(x) - TETA(y)));
end
end

```

```

end
end
Jac = [H N
J L];
% ----- RESOLUÇÃO DO SISTEMA -----
delta_SOLUCAO = Jac\delta_Y;
delta_TETA = delta_SOLUCAO(1:NBAR,1);
delta_V = delta_SOLUCAO((NBAR+1):2*NBAR,1);
% ----- ATUALIZAÇÃO -----
TETA = TETA + delta_TETA;
V = V + delta_V;
% ----- CÁLCULO DOS RESÍDUOS -----
% Tensões em módulo e fase
v = V.*exp(1i*TETA);
% Correntes injetadas
I = Ybus*v;
% Potência Complexa = Pcalc + j*Qcalc
S = v.*I';
Pcalc = real(S); % Potência Ativa Líquida injetada nas barras
Qcalc = imag(S); % Potência Reativa Líquida injetada nas barras
for a = 1:NBAR
delta_P(a) = Pesp(a) - Pcalc(a);
delta_Q(a) = Qesp(a) - Qcalc(a);
% Se a barra for do tipo 2 (swing), não existem resíduos
if(TIPO(a) == 2)
delta_P(a) = 0;
delta_Q(a) = 0;
end
% Se a barra for do tipo 1 (PV), não existem resíduos de Q
if(TIPO(a) == 1)
delta_Q(a) = 0;
end
end
% Vetor de resíduos
delta_Y = [delta_P'
delta_Q'];
% Máximo erro para convergência
MAX_Y = max(abs(delta_Y));
% Número de iterações
iteracao = iteracao + 1;
if(MAX_Y < tolerancia)
divergente = 1;
end
if(iteracao > 25)
divergente = 2;
end
end
end

```

```
end
```

A.3 Função kron

```
function [ Zkron ] = kron( Zbus, ref, NBAR )
Zkron = zeros(NBAR,NBAR);
for i = 1:NBAR
for j = 1:NBAR
Zkron(i,j) = Zbus(i,j) - (Zbus(i,ref)*Zbus(ref,j))/Zbus(ref,ref);
end
end
end
```

A.4 Função fluxo

```
function [ fluxo_km, perdas ] = fluxo( V, TETA, NLIN, DE, PARA, TAP, b, g, Pbase )
fluxo_km = zeros(NLIN,1);
fluxo_mk = zeros(NLIN,1);
for i = 1:NLIN
k = DE(i);
m = PARA(i);
fluxo_km(i) = (((TAP(i)*V(k))^2)*g(i) - (TAP(i)*V(k))*V(m)*g(i)*cos(TETA(k) - TETA(m)) ...
- (TAP(i)*V(k))*V(m)*b(i)*sin(TETA(k) - TETA(m)))* Pbase;
fluxo_mk(i) = (((V(m))^2)*g(i) - (TAP(i)*V(k))*V(m)*g(i)*cos(TETA(k) - TETA(m)) + ...
(TAP(i)*V(k))*V(m)*b(i)*sin(TETA(k) - TETA(m)))* Pbase;
end
perdas = fluxo_km+fluxo_mk;
end
```

A.5 Função compensacao_zbarra

```
function [ v_zbarra, Zbus_atualizado ] = compensacao_zbarra( I, n_linha, n_carga, DE, PARA, CARGA,
Zbus, Zlinhakm, Zcargakm, NBAR )
Zbus_aux = [ Zbus zeros(NBAR,1)
zeros(1,NBAR) 0 ];
if (n_linha ~= 0)
for i = 1:n_linha
k = DE(i);
m = PARA(i);
```

```

% Retirada do ramo série
for j = 1:(NBAR+1)
if j ~= (NBAR+1)
Zbus_aux(NBAR+1,j) = Zbus_aux(k,j) - Zbus_aux(m,j);
Zbus_aux(j,NBAR+1) = Zbus_aux(NBAR+1,j);
else
Zbus_aux(j,j) = Zbus_aux(k,j) - Zbus_aux(m,j) + Zlinhakm(i);
end
end
% Redução de kron
[ Zbus_atualizado ] = kron( Zbus_aux, NBAR+1, NBAR );
Zbus_aux = [ Zbus_atualizado zeros(NBAR,1)
zeros(1,NBAR) 0 ];
end
end
if (n_carga ~= 0)
for i = 1:n_carga
k = CARGA(i);
% Retirada do ramo série
for j = 1:(NBAR+1)
if j ~= (NBAR+1)
Zbus_aux(NBAR+1,j) = Zbus_aux(k,j);
Zbus_aux(j,NBAR+1) = Zbus_aux(NBAR+1,j);
else
Zbus_aux(j,j) = Zbus_aux(k,j) + Zcargakm(i);
end
end
% Redução de kron
[ Zbus_atualizado ] = kron( Zbus_aux, NBAR+1, NBAR );
Zbus_aux = [ Zbus_atualizado zeros(NBAR,1)
zeros(1,NBAR) 0 ];
end
end
% Novo V
v_zbarra = Zbus_atualizado*I;
end

```

A.6 Função compensacao_correntes

```

function [ v_pre ] = compensacao_correntes( I, n_linha, n_carga, DE, PARA, CARGA, Zbus, Zlinhakm,
Zcargakm, NBAR )
if (n_linha ~= 0)
A_linha = zeros(n_linha, n_linha);
for i = 1: n_linha

```

```

A_linha(i,i) = Zlinhakm(i);
end
M_linha = zeros(n_linha,NBAR);
for i = 1:n_linha
M_linha(i,DE(i)) = 1;
M_linha(i,PARA(i)) = -1;
end
A = A_linha;
M = M_linha;
end
if (n_carga ~= 0)
A_carga = zeros(n_carga, n_carga);
for i = 1: n_carga
A_carga(i,i) = Zcargakm(i);
end
M_carga = zeros(n_carga,NBAR);
for i = 1:n_carga
M_carga(i,CARGA(i)) = 1;
end
A = A_carga;
M = M_carga;
end
if(n_linha ~= 0 && n_carga ~= 0)
A = [ A_linha zeros(size(A_linha,1),size(A_carga,2))
zeros(size(A_carga,1),size(A_linha,2)) A_carga ];
M = [M_linha
M_carga];
end
% Matriz C
inv_C = A + M*Zbus*M';
C = inv(inv_C);
% Corrente de compensação
Icomp = (eye(NBAR) - M'*C*M*Zbus)*I;
% Novo V
v_pre = Zbus*Icomp;
end

```

ANEXO A – Dados dos Sistemas em Análise

Neste anexo, estão apresentados os pontos de operação em regime permanente para caso base determinístico, assim como a topologia, dos sistemas-testes brasileiro de 33 barras, IEEE de 57 barras e brasileiro de 107 barras. As informações dos sistemas brasileiros são extraídas da referência [38] e do sistema IEEE são extraídas do banco de dados do IEEE [39]. Os tipos das barras são definidos como: 0 correspondente ao tipo PQ; 1 correspondente ao tipo PV e 2 correspondente ao tipo $V\theta$.

A.1 Sistema-teste brasileiro de 33 barras

O sistema-teste brasileiro de 33 barras, também denominado de sistema Sul, foi elaborado a partir de dados da malha de 500kV da região Sul do Brasil, acoplado com um trecho em 230kV, formando um anel.

A Figura 29 apresenta o diagrama unifilar e as Tabelas 26 e 27 contêm, respectivamente, os dados de barra e os dados de linha deste sistema. Essas informações foram extraídas da referência [38].

Figura 29 – Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 33 barras.

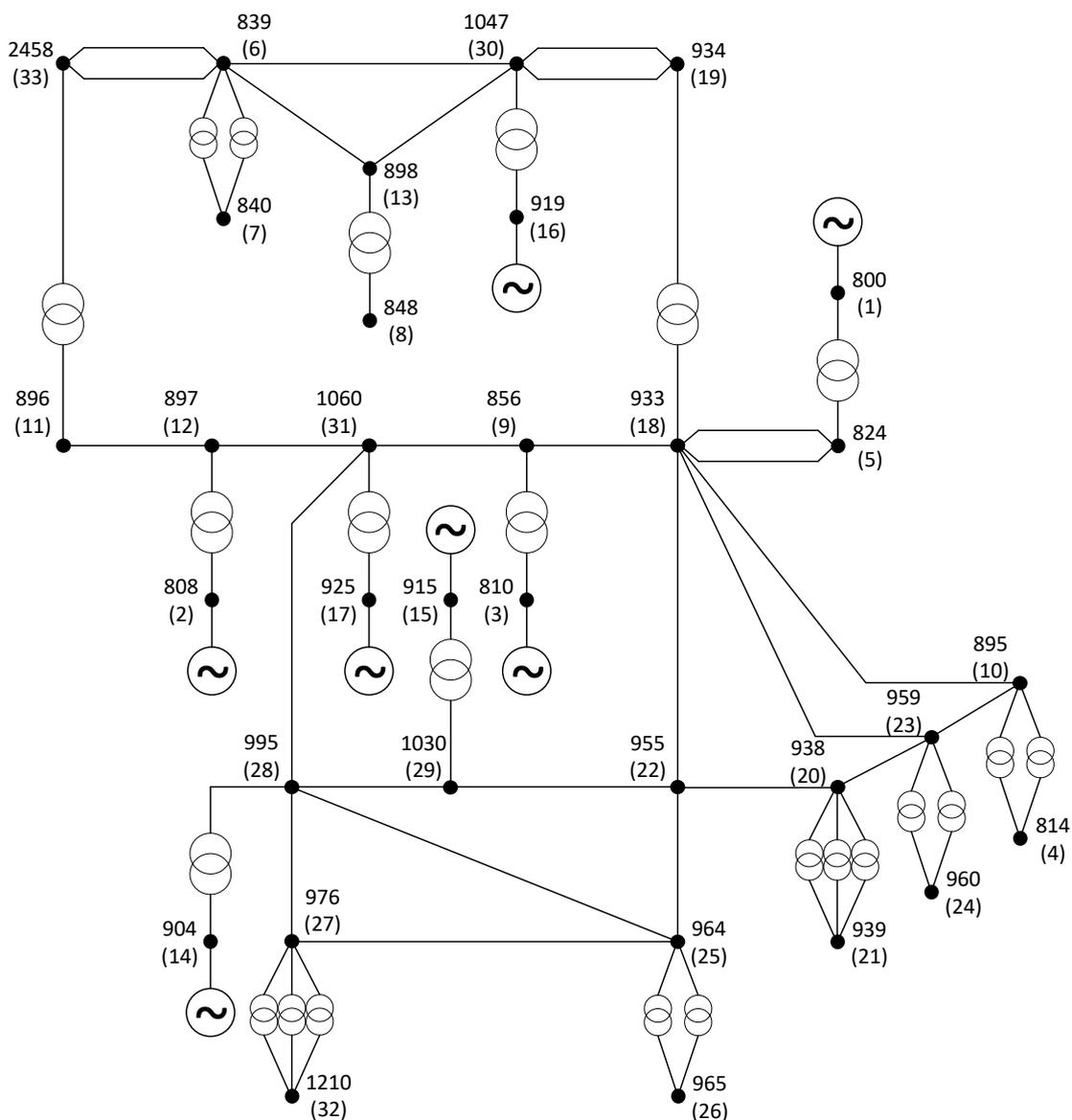


Tabela 26 – Dados de barra do sistema-teste brasileiro de 33 barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt de Barra
Nº	Tipo	Módulo (p.u.)	Fase (°)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Esp. (Mvar)
800 (1)	2	1,0100	0,000	918,39	-49,23	0,00	0,00	0,00
808 (2)	1	1,0200	11,033	1000,00	40,66	0,00	0,00	0,00
810 (3)	1	1,0100	4,917	1000,00	-234,88	0,00	0,00	0,00
814 (4)	0	1,0011	-20,743	0,00	0,00	680,00	130,00	0,00
824 (5)	0	1,0450	-5,727	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 26 continua da página anterior

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt de Barra
Nº	Tipo	Módulo (p.u.)	Fase (°)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Esp. (Mvar)
839 (6)	0	1,0040	2,841	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
840 (7)	0	0,9504	-0,195	0,00	0,00	150,00	32,00	0,00
848 (8)	0	0,9699	4,435	0,00	0,00	90,00	17,00	0,00
856 (9)	0	1,0396	-0,822	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
895 (10)	0	1,0225	-18,581	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
896 (11)	0	1,0361	4,371	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
897 (12)	0	1,0453	5,411	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
898 (13)	0	1,0250	7,877	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
904 (14)	1	1,0100	-7,160	400,00	-390,42	0,00	0,00	0,00
915 (15)	1	1,0200	-2,624	400,00	-108,02	0,00	0,00	0,00
919 (16)	1	1,0200	15,575	700,00	114,76	0,00	0,00	0,00
925 (17)	1	1,0200	7,618	800,00	2,07	0,00	0,00	0,00
933 (18)	0	1,0454	-6,031	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
934 (19)	0	1,0033	-5,505	0,00	0,00	235,00	57,00	0,00
938 (20)	0	1,0530	-22,064	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
939 (21)	0	1,0026	-24,002	0,00	0,00	940,00	50,00	0,00
955 (22)	0	1,0820	-12,992	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
959 (23)	0	1,0235	-19,133	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
960 (24)	0	1,0020	-21,674	0,00	0,00	790,00	330,00	0,00
964 (25)	0	1,0761	-19,905	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
965 (26)	0	1,0043	-22,027	0,00	0,00	700,00	49,00	0,00
976 (27)	0	1,0563	-22,190	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
995 (28)	0	1,0707	-10,447	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1030 (29)	0	1,0760	-11,283	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1047 (30)	0	1,0311	8,922	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1060 (31)	0	1,0503	0,966	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1210 (32)	0	1,0047	-24,444	0,00	0,00	1100,00	400,00	0,00
2458 (33)	0	1,0037	2,460	0,00	0,00	400,00	125,00	0,00

Tabela 27 – Dados de linha do sistema-teste brasileiro de 33 barras

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
1	814	895	0,0320	1,1460	0,0000	0,9880
2	814	895	0,0300	1,1651	0,0000	0,9880
3	824	800	0,0000	1,1200	0,0000	1,0240

Tabela 27 continua da página anterior

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
4	824	933	0,0100	0,1240	15,2040	-
5	824	933	0,0100	0,1260	15,4280	-
6	839	840	0,0000	6,6400	0,0000	1,0430
7	839	840	0,0000	6,2900	0,0000	1,0430
8	839	898	1,1300	6,9900	12,6170	-
9	839	1047	1,2200	7,6900	13,8100	-
10	839	2458	0,2200	1,0900	1,8601	-
11	839	2458	0,1700	1,0300	2,0537	-
12	856	810	0,0000	1,0500	0,0000	1,0000
13	856	933	0,0520	0,6540	80,4930	-
14	856	1060	0,0560	0,6970	85,7460	-
15	896	897	0,0500	0,7300	78,0600	-
16	897	808	0,0000	1,0200	0,0000	1,0240
17	898	848	0,0000	6,3600	0,0000	1,0430
18	898	1047	0,1500	0,8900	1,6317	-
19	933	895	0,2000	2,5500	312,7200	-
20	933	955	0,1620	2,0480	250,1700	-
21	933	959	0,2000	2,6900	336,4000	-
22	934	933	0,0310	1,2070	0,0000	0,9700
23	934	1047	3,0450	15,7380	27,1230	-
24	934	1047	3,0410	15,7180	27,0890	-
25	938	955	0,2556	2,9224	360,4000	-
26	938	959	0,1270	1,6030	195,8900	-
27	939	938	0,0310	1,1500	0,0000	0,9550
28	939	938	0,0320	1,1630	0,0000	0,9550
29	939	938	0,0000	1,2770	0,0000	0,9550
30	955	964	0,1877	2,3467	287,2400	-
31	959	895	0,0500	0,4400	47,5800	-
32	960	959	0,0320	1,1630	0,0000	1,0000
33	960	959	0,0310	1,1660	0,0000	1,0000
34	964	976	0,0733	0,9164	112,1700	-
35	965	964	0,0200	1,2110	0,0000	0,9370
36	965	964	0,0200	1,2330	0,0000	0,9370
37	976	995	0,2820	3,8520	493,7000	-
38	995	904	0,0123	1,5383	0,0000	1,0000
39	995	964	0,1643	3,0339	354,8800	-

Tabela 27 continua da página anterior

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
40	995	1030	0,0730	0,9200	112,2600	-
41	995	1060	0,1720	2,1700	265,1600	-
42	1030	915	0,0000	4,1310	0,0000	1,0000
43	1030	955	0,0470	0,5900	71,8180	-
44	1047	919	0,0243	1,7022	0,0000	1,0250
45	1060	897	0,0760	1,1710	124,5800	-
46	1060	925	0,0113	1,5150	0,0000	1,0240
47	1210	976	0,0300	1,2190	0,0000	0,9670
48	1210	976	0,0390	1,1380	0,0000	0,9670
49	1210	976	0,0360	1,2170	0,0000	0,9670
50	2458	896	0,0000	1,2700	0,0000	0,9860

A.2 Sistema-teste IEEE de 57 barras

O sistema-teste IEEE de 57 barras representa um modelo aproximado simples do sistema elétrico de potência norte-americano (meio-oeste dos EUA) no início dos anos 60.

A Figura 30 apresenta o diagrama unifilar e as Tabelas 28 e 29 contêm, respectivamente, os dados de barra e os dados de linha deste sistema. Essas informações são extraídas da referência [39].

Figura 30 – Diagrama unifilar do sistema-teste IEEE de 57 barras.

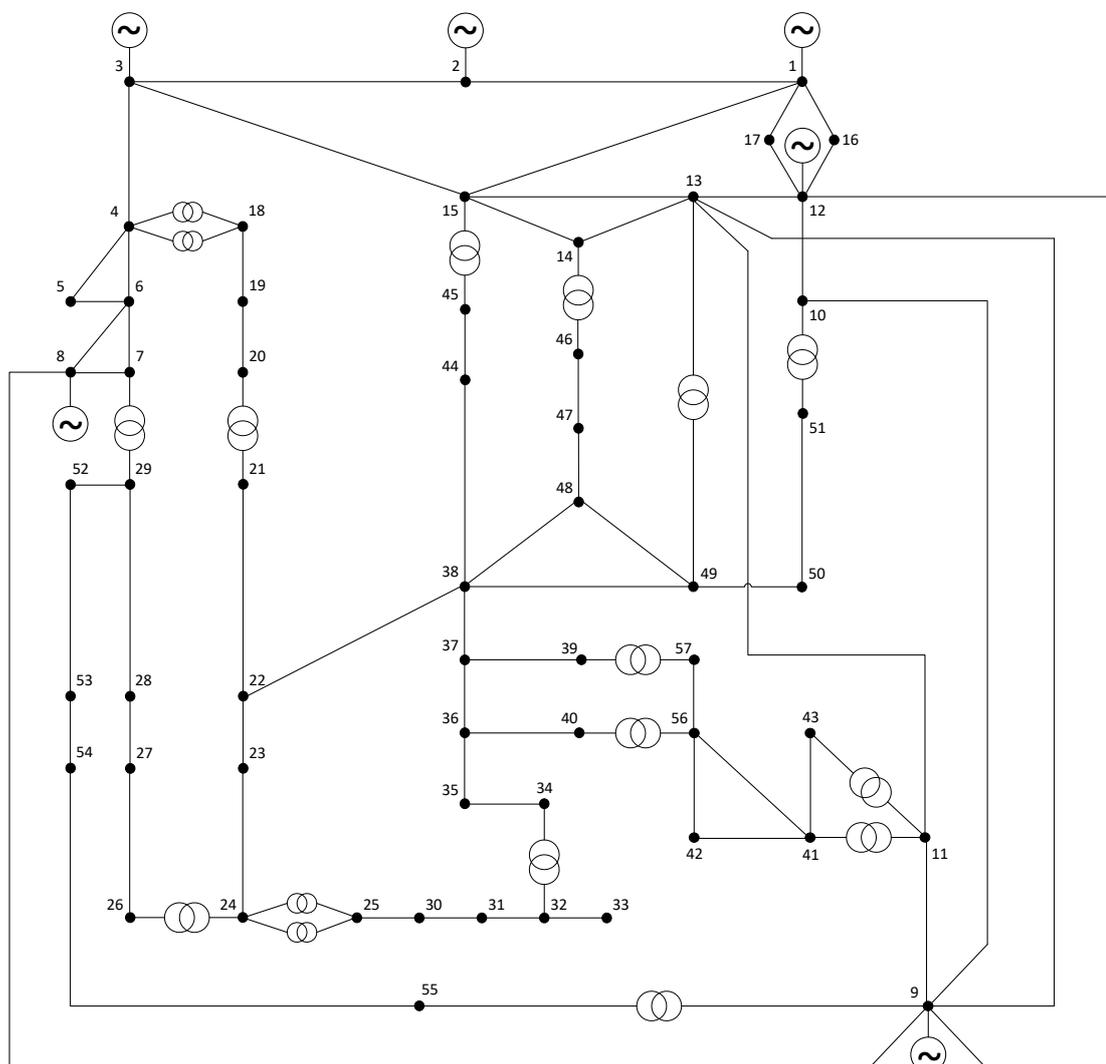


Tabela 28 – Dados de barra do sistema-teste IEEE de 57 barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt de Barra
Nº	Tipo	Módulo (p.u.)	Fase (°)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Esp. (Mvar)
1	2	1,0400	0,000	478,66	128,85	55,00	17,00	0,00
2	1	1,0100	-1,188	0,00	-0,75	3,00	88,00	0,00
3	1	0,9850	-5,988	40,00	-0,91	41,00	21,00	0,00
4	0	0,9808	-7,337	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0	0,9765	-8,546	0,00	0,00	13,00	4,00	0,00
6	1	0,9800	-8,674	0,00	0,87	75,00	2,00	0,00

Tabela 28 continua da página anterior

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt de Barra
Nº	Tipo	Módulo (p.u.)	Fase (°)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Esp. (Mvar)
7	0	0,9842	-7,601	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1	1,0050	-4,478	450,00	62,10	150,00	22,00	0,00
9	1	0,9800	-9,585	0,00	2,29	121,00	26,00	0,00
10	0	0,9862	-11,450	0,00	0,00	5,00	2,00	0,00
11	0	0,9740	-10,193	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1	1,0150	-10,471	310,00	128,63	377,00	24,00	0,00
13	0	0,9789	-9,804	0,00	0,00	18,00	2,30	0,00
14	0	0,9702	-9,350	0,00	0,00	10,50	5,30	0,00
15	0	0,9880	-7,190	0,00	0,00	22,00	5,00	0,00
16	0	1,0134	-8,859	0,00	0,00	43,00	3,00	0,00
17	0	1,0175	-5,396	0,00	0,00	42,00	8,00	0,00
18	0	1,0007	-11,730	0,00	0,00	27,20	9,80	10,00
19	0	0,9702	-13,227	0,00	0,00	3,30	0,60	0,00
20	0	0,9638	-13,444	0,00	0,00	2,30	1,00	0,00
21	0	1,0085	-12,929	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0	1,0097	-12,874	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0	1,0083	-12,940	0,00	0,00	6,30	2,10	0,00
24	0	0,9992	-13,292	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0	0,9825	-18,173	0,00	0,00	6,30	3,20	5,90
26	0	0,9588	-12,981	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0	0,9815	-11,514	0,00	0,00	9,30	0,50	0,00
28	0	0,9967	-10,482	0,00	0,00	4,60	2,30	0,00
29	0	1,0102	-9,772	0,00	0,00	17,00	2,60	0,00
30	0	0,9627	-18,720	0,00	0,00	3,60	1,80	0,00
31	0	0,9359	-19,384	0,00	0,00	5,80	2,90	0,00
32	0	0,9499	-18,512	0,00	0,00	1,60	0,80	0,00
33	0	0,9476	-18,552	0,00	0,00	3,80	1,90	0,00
34	0	0,9592	-14,149	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35	0	0,9662	-13,906	0,00	0,00	6,00	3,00	0,00
36	0	0,9758	-13,635	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37	0	0,9849	-13,446	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
38	0	1,0128	-12,735	0,00	0,00	14,00	7,00	0,00
39	0	0,9828	-13,491	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40	0	0,9728	-13,658	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 28 continua da página anterior

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt de Barra
Nº	Tipo	Módulo (p.u.)	Fase (°)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Esp. (Mvar)
41	0	0,9962	-14,077	0,00	0,00	6,30	3,00	0,00
42	0	0,9665	-15,533	0,00	0,00	7,10	4,40	0,00
43	0	1,0096	-11,354	0,00	0,00	2,00	1,00	0,00
44	0	1,0168	-11,856	0,00	0,00	12,00	1,80	0,00
45	0	1,0360	-9,270	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
46	0	1,0598	-11,116	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
47	0	1,0333	-12,512	0,00	0,00	29,70	11,60	0,00
48	0	1,0274	-12,611	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
49	0	1,0362	-12,936	0,00	0,00	18,00	8,50	0,00
50	0	1,0233	-13,413	0,00	0,00	21,00	10,50	0,00
51	0	1,0523	-12,533	0,00	0,00	18,00	5,30	0,00
52	0	0,9804	-11,498	0,00	0,00	4,90	2,20	0,00
53	0	0,9709	-12,253	0,00	0,00	20,00	10,00	6,30
54	0	0,9963	-11,710	0,00	0,00	4,10	1,40	0,00
55	0	1,0308	-10,801	0,00	0,00	6,80	3,40	0,00
56	0	0,9684	-16,065	0,00	0,00	7,60	2,20	0,00
57	0	0,9648	-16,584	0,00	0,00	6,70	2,00	0,00

Tabela 29 – Dados de linha do sistema-teste IEEE de 57 barras

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
1	1	2	0,8300	2,8000	12,9000	-
2	2	3	2,9800	8,5000	8,1800	-
3	3	4	1,1200	3,6600	3,8000	-
4	4	5	6,2500	13,2000	2,5800	-
5	4	6	4,3000	14,8000	3,4800	-
6	6	7	2,0000	10,2000	2,7600	-
7	6	8	3,3900	17,3000	4,7000	-
8	8	9	0,9900	5,0500	5,4800	-
9	9	10	3,6900	16,7900	4,4000	-
10	9	11	2,5800	8,4800	2,1800	-
11	9	12	6,4800	29,5000	7,7200	-
12	9	13	4,8100	15,8000	4,0600	-

Tabela 29 continua da página anterior

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
13	13	14	1,3200	4,3400	1,1000	-
14	13	15	2,6900	8,6900	2,3000	-
15	1	15	1,7800	9,1000	9,8800	-
16	1	16	4,5400	20,6000	5,4600	-
17	1	17	2,3800	10,8000	2,8600	-
18	3	15	1,6200	5,3000	5,4400	-
19	4	18	0,0000	55,5000	0,0000	0,9700
20	4	18	0,0000	43,0000	0,0000	0,9780
21	5	6	3,0200	6,4100	1,2400	-
22	7	8	1,3900	7,1200	1,9400	-
23	10	12	2,7700	12,6200	3,2800	-
24	11	13	2,2300	7,3200	1,8800	-
25	12	13	1,7800	5,8000	6,0400	-
26	12	16	1,8000	8,1300	2,1600	-
27	12	17	3,9700	17,9000	4,7600	-
28	14	15	1,7100	5,4700	1,4800	-
29	18	19	46,1000	68,5000	0,0000	-
30	19	20	28,3000	43,4000	0,0000	-
31	21	20	0,0000	77,6700	0,0000	1,0430
32	21	22	7,3600	11,7000	0,0000	-
33	22	23	0,9900	1,5200	0,0000	-
34	23	24	16,6000	25,6000	0,8400	-
35	24	25	0,0000	118,2000	0,0000	1,0000
36	24	25	0,0000	123,0000	0,0000	1,0000
37	24	26	0,0000	4,7300	0,0000	1,0430
38	26	27	16,5000	25,4000	0,0000	-
39	27	28	6,1800	9,5400	0,0000	-
40	28	29	4,1800	5,8700	0,0000	-
41	7	29	0,0000	6,4800	0,0000	0,9670
42	25	30	13,5000	20,2000	0,0000	-
43	30	31	32,6000	49,7000	0,0000	-
44	31	32	50,7000	75,5000	0,0000	-
45	32	33	3,9200	3,6000	0,0000	-
46	34	32	0,0000	95,3000	0,0000	0,9750
47	34	35	5,2000	7,8000	0,3200	-
48	35	36	4,3000	5,3700	0,1600	-

Tabela 29 continua da página anterior

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
49	36	37	2,9000	3,6600	0,0000	-
50	37	38	6,5100	10,0900	0,2000	-
51	37	39	2,3900	3,7900	0,0000	-
52	36	40	3,0000	4,6600	0,0000	-
53	22	38	1,9200	2,9500	0,0000	-
54	11	41	0,0000	74,9000	0,0000	0,9550
55	41	42	20,7000	35,2000	0,0000	-
56	41	43	0,0000	41,2000	0,0000	-
57	38	44	2,8900	5,8500	0,2000	-
58	15	45	0,0000	10,4200	0,0000	0,9550
59	14	46	0,0000	7,3500	0,0000	0,9000
60	46	47	2,3000	6,8000	0,3200	-
61	47	48	1,8200	2,3300	0,0000	-
62	48	49	8,3400	12,9000	0,4800	-
63	49	50	8,0100	12,8000	0,0000	-
64	50	51	13,8600	22,0000	0,0000	-
65	10	51	0,0000	7,1200	0,0000	0,9300
66	13	49	0,0000	19,1000	0,0000	0,8950
67	29	52	14,4200	18,7000	0,0000	-
68	52	53	7,6200	9,8400	0,0000	-
69	53	54	18,7800	23,2000	0,0000	-
70	54	55	17,3200	22,6500	0,0000	-
71	11	43	0,0000	15,3000	0,0000	0,9580
72	44	45	6,2400	12,4200	0,4000	-
73	40	56	0,0000	119,5000	0,0000	0,9580
74	56	41	55,3000	54,9000	0,0000	-
75	56	42	21,2500	35,4000	0,0000	-
76	39	57	0,0000	135,5000	0,0000	0,9800
77	57	56	17,4000	26,0000	0,0000	-
78	38	49	11,5000	17,7000	0,3000	-
79	38	48	3,1200	4,8200	0,0000	-
80	9	55	0,0000	12,0500	0,0000	0,9400

A.3 Sistema-teste brasileiro de 107 barras

O sistema-teste brasileiro de 107 barras abrange o sistema-teste de 33 barras da região Sul, acrescido das usinas e da malha de transmissão em 345kV da região Sudeste e do sistema de suprimento ao Mato Grosso em 230kV. Portanto, está dividido em três subsistemas denominados de Sul, Sudeste e Mato Grosso. Possui capacidade total de geração de 22.080 MW e carga total de 12.679 MW. O subsistema Sudeste concentra a maior capacidade de geração, cerca de 56% de toda a geração disponível no sistema.

A Figura 31 apresenta o diagrama unifilar e as Tabelas 30 e 31 contêm, respectivamente, os dados de barra e os dados de linha deste sistema. Essas informações são extraídas da referência [38].

Figura 31 – Diagrama unifilar do sistema-teste brasileiro de 107 barras.

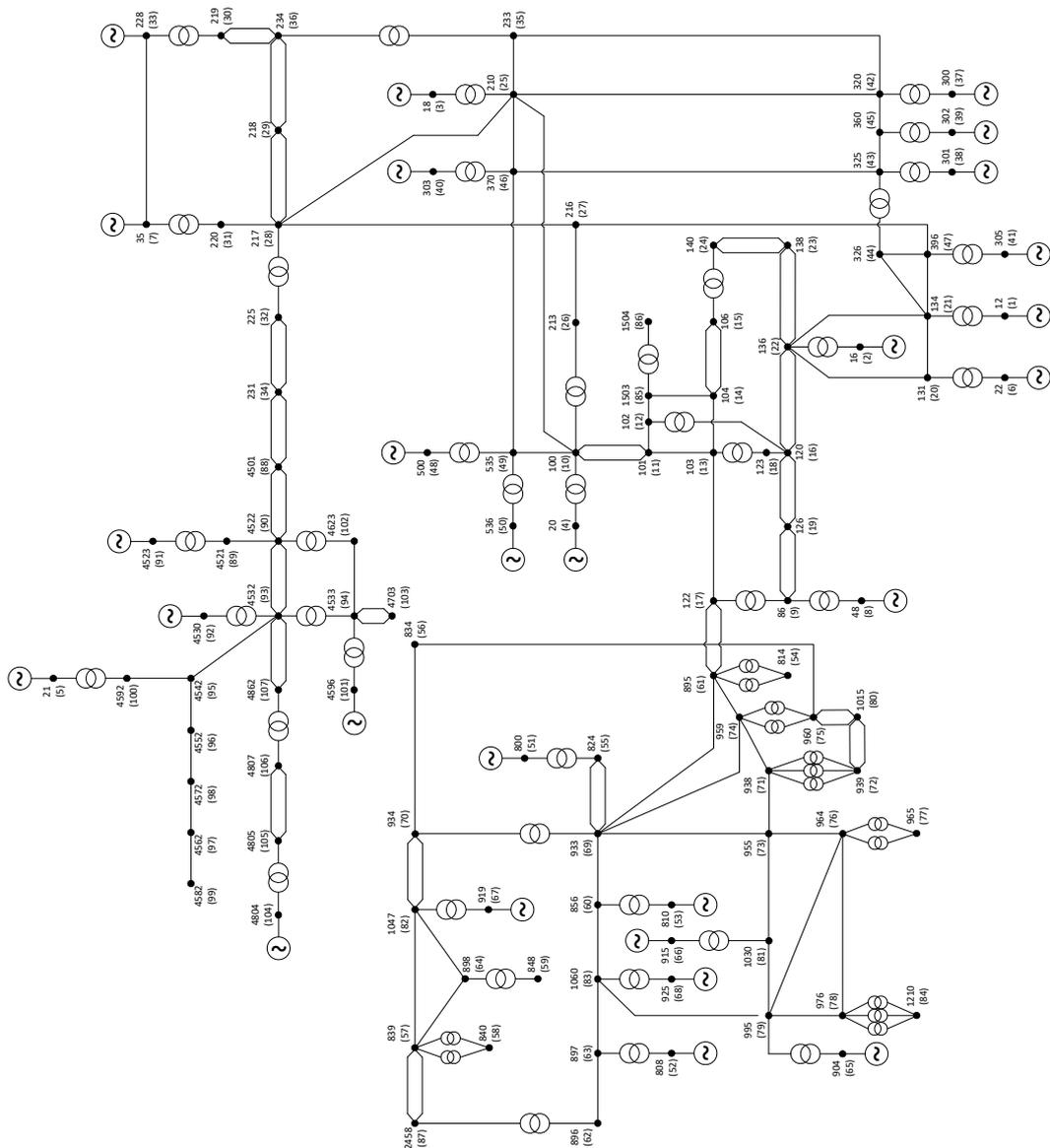


Tabela 30 – Dados de barra do sistema-teste brasileiro de 107 barras

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt de Barra
Nº	Tipo	Módulo (p.u.)	Fase (°)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Esp. (Mvar)
12 (1)	1	1,0000	-23,920	300,00	-202,69	0,00	0,00	0,00
16 (2)	1	1,0000	-25,942	800,00	-133,94	0,00	0,00	0,00
18 (3)	2	1,0200	-23,770	995,66	-400,89	0,00	0,00	0,00
20 (4)	1	1,0100	-22,125	900,00	-321,22	0,00	0,00	0,00
21 (5)	1	1,0000	-61,901	140,00	-25,76	0,00	0,00	0,00
22 (6)	1	1,0000	-19,617	150,00	-20,58	0,00	0,00	0,00
35 (7)	1	1,0000	-26,674	200,00	-49,97	0,00	0,00	0,00
48 (8)	1	1,0000	-42,484	0,00	-461,13	0,00	0,00	0,00
86 (9)	0	1,0330	-42,484	0,00	0,00	66,00	1,20	0,00
100 (10)	0	1,0562	-28,246	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
101 (11)	0	1,0688	-36,049	0,00	0,00	0,00	0,00	-200,00
102 (12)	0	1,0592	-42,716	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00
103 (13)	0	1,0721	-42,995	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
104 (14)	0	1,0612	-51,463	0,00	0,00	910,00	235,00	0,00
106 (15)	0	1,0496	-52,342	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00
120 (16)	0	1,0414	-40,984	0,00	0,00	180,00	90,00	0,00
122 (17)	0	1,0671	-41,415	0,00	0,00	200,00	38,00	0,00
123 (18)	0	1,0351	-45,779	0,00	0,00	450,00	175,00	0,00
126 (19)	0	1,0372	-43,228	0,00	0,00	290,00	95,00	0,00
131 (20)	0	1,0268	-27,032	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
134 (21)	0	1,0268	-26,153	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
136 (22)	0	1,0279	-32,808	0,00	0,00	54,00	23,00	0,00
138 (23)	0	1,0363	-43,866	0,00	0,00	72,00	34,00	0,00
140 (24)	0	1,0226	-53,450	0,00	0,00	700,00	250,00	0,00
210 (25)	0	1,0482	-27,329	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
213 (26)	0	1,0500	-28,511	0,00	0,00	93,00	39,00	0,00
216 (27)	0	1,0490	-27,601	0,00	0,00	53,00	25,00	0,00
217 (28)	0	1,0504	-32,029	0,00	0,00	364,00	58,00	0,00
218 (29)	0	1,0249	-39,810	0,00	0,00	600,00	200,00	0,00
219 (30)	0	1,0284	-38,680	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
220 (31)	0	1,0521	-31,701	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
225 (32)	0	1,0089	-34,356	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
228 (33)	0	1,0160	-40,376	0,00	0,00	86,00	34,00	0,00
231 (34)	0	1,0125	-49,034	0,00	0,00	89,70	31,90	0,00
233 (35)	0	1,0393	-35,963	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
234 (36)	0	1,0273	-38,775	0,00	0,00	1000,00	350,00	0,00
300 (37)	1	1,0200	-18,722	700,00	-183,92	0,00	0,00	0,00
301 (38)	1	1,0100	-19,170	300,00	-128,54	0,00	0,00	0,00
302 (39)	1	1,0200	-18,045	400,00	-125,06	0,00	0,00	0,00
303 (40)	1	1,0200	-24,046	200,00	-279,34	0,00	0,00	0,00
305 (41)	1	1,0000	-21,887	300,00	-60,50	0,00	0,00	0,00

Tabela 30 continua da página anterior

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt de Barra
Nº	Tipo	Módulo (p.u.)	Fase (°)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Esp. (Mvar)
320 (42)	0	1,0486	-23,816	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
325 (43)	0	1,0464	-23,456	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
326 (44)	0	1,0331	-25,681	0,00	0,00	274,00	104,00	0,00
360 (45)	0	1,0465	-22,207	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
370 (46)	0	1,0492	-25,178	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
396 (47)	0	1,0408	-25,613	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500 (48)	1	1,0200	-21,325	800,00	-118,19	0,00	0,00	0,00
535 (49)	0	1,0350	-25,780	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
536 (50)	0	1,0230	-28,574	0,00	0,00	700,00	150,00	0,00
800 (51)	1	1,0200	-6,882	1100,00	138,39	0,00	0,00	0,00
808 (52)	1	1,0200	3,730	1150,00	114,37	0,00	0,00	0,00
810 (53)	1	1,0200	-3,800	1200,00	-72,20	0,00	0,00	0,00
814 (54)	0	0,9957	-37,307	0,00	0,00	735,40	191,00	0,00
824 (55)	0	1,0379	-17,179	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
834 (56)	0	0,9906	-28,555	0,00	0,00	13,40	4,20	0,00
839 (57)	0	0,9995	-6,168	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
840 (58)	0	0,9863	-9,154	0,00	0,00	159,00	36,00	0,00
848 (59)	0	0,9986	-5,289	0,00	0,00	94,00	18,00	0,00
856 (60)	0	1,0348	-10,655	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
895 (61)	0	1,0442	-35,062	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
896 (62)	0	1,0279	-4,046	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
897 (63)	0	1,0395	-2,775	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
898 (64)	0	1,0118	-1,897	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
904 (65)	1	1,0200	-14,886	700,00	-236,40	0,00	0,00	0,00
915 (66)	1	1,0200	-12,748	700,00	-109,43	0,00	0,00	0,00
919 (67)	1	1,0000	5,987	700,00	89,04	0,00	0,00	0,00
925 (68)	1	1,0200	0,115	950,00	73,05	0,00	0,00	0,00
933 (69)	0	1,0376	-17,546	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
934 (70)	0	0,9983	-17,714	0,00	0,00	237,00	59,00	0,00
938 (71)	0	1,0426	-37,109	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
939 (72)	0	0,9964	-39,518	0,00	0,00	1149,00	53,06	0,00
955 (73)	0	1,0575	-23,464	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
959 (74)	0	1,0332	-34,767	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
960 (75)	0	0,9958	-37,286	0,00	0,00	844,70	469,10	0,00
964 (76)	0	1,0374	-30,784	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
965 (77)	0	1,0031	-33,252	0,00	0,00	755,60	56,24	0,00
976 (78)	0	1,0124	-33,464	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
995 (79)	0	1,0497	-19,212	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1015 (80)	0	0,9984	-39,469	0,00	0,00	70,00	2,00	0,00
1030 (81)	0	1,0518	-20,494	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1047 (82)	0	1,0168	-0,911	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1060 (83)	0	1,0434	-7,845	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 30 continua da página anterior

Barra		Tensão		Geração		Carga		Shunt de Barra
Nº	Tipo	Módulo (p.u.)	Fase (°)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Esp. (Mvar)
1210 (84)	0	1,0038	-36,214	0,00	0,00	1228,00	425,00	0,00
1503 (85)	0	1,0606	-49,276	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1504 (86)	0	1,0261	-53,249	0,00	0,00	145,00	63,00	0,00
2458 (87)	0	1,0007	-6,396	0,00	0,00	403,00	126,00	0,00
4501 (88)	0	1,0299	-60,409	0,00	0,00	31,40	7,10	-45,00
4521 (89)	0	1,0372	-66,022	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4522 (90)	0	1,0368	-68,116	0,00	0,00	0,00	0,00	-20,00
4523 (91)	1	1,0100	-60,350	50,00	-10,81	0,00	0,00	0,00
4530 (92)	0	1,0477	-72,643	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4532 (93)	0	1,0477	-72,643	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4533 (94)	0	1,0184	-72,981	0,00	0,00	75,40	16,10	0,00
4542 (95)	0	1,0299	-71,829	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4552 (96)	0	1,0130	-79,363	0,00	0,00	12,60	1,20	-20,00
4562 (97)	0	1,0190	-87,553	0,00	0,00	23,80	7,40	0,00
4572 (98)	0	1,0157	-84,648	0,00	0,00	18,00	6,40	0,00
4582 (99)	0	1,0256	-90,352	0,00	0,00	65,50	16,70	30,00
4592 (100)	0	1,0204	-66,939	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4596 (101)	1	1,0000	-68,105	230,00	-39,05	0,00	0,00	0,00
4623 (102)	0	1,0225	-71,026	0,00	0,00	128,20	40,76	0,00
4703 (103)	0	1,0067	-74,083	0,00	0,00	182,10	29,75	0,00
4804 (104)	1	1,0000	-74,346	50,00	-19,02	0,00	0,00	0,00
4805 (105)	0	1,0275	-78,066	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4807 (106)	0	1,0284	-79,341	0,00	0,00	128,90	36,30	0,00
4862 (107)	0	1,0509	-77,638	0,00	0,00	0,00	0,00	-30,00

Tabela 31 – Dados de linha do sistema-teste brasileiro de 107 barras

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
1	86	48	0,0000	0,7148	0,0000	1,0000
2	86	122	0,0000	1,9130	0,0000	1,0000
3	86	122	0,0000	1,9130	0,0000	1,0000
4	100	20	0,0000	1,2640	0,0000	1,0000
5	100	101	0,1720	2,7200	231,4000	-
6	100	101	0,1710	2,7000	230,2000	-
7	100	210	0,2090	2,9350	254,6000	-
8	100	213	0,0000	2,3570	0,0000	1,0000
9	100	535	0,1530	2,4000	203,8000	-
10	101	102	0,1560	2,4600	208,5000	-

Tabela 31 continua da página anterior

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
11	101	103	0,1520	2,3900	202,6000	-
12	102	120	0,0000	2,4030	0,0000	1,0000
13	102	1503	0,1100	1,9100	161,8500	-
14	103	123	0,0000	2,4190	0,0000	1,0000
15	104	103	0,1960	3,1000	264,9000	-
16	104	1503	0,0500	0,8200	69,3600	-
17	106	104	0,1520	2,3900	202,7000	-
18	106	104	0,1520	2,3900	203,1000	-
19	106	140	0,0000	2,9230	0,0000	1,0000
20	106	140	0,0000	2,6680	0,0000	1,0000
21	122	103	0,1050	1,6190	136,3500	-
22	123	120	0,3590	3,9450	66,6800	-
23	126	86	0,1090	1,8260	51,1800	-
24	126	86	0,1090	1,8240	51,1800	-
25	126	120	0,6000	5,9500	92,8000	-
26	126	120	0,6060	6,0200	93,8000	-
27	131	22	0,0000	8,8333	0,0000	1,0000
28	134	12	0,0000	1,3350	0,0000	0,9990
29	134	131	0,0920	1,0100	16,9000	-
30	134	396	0,3200	3,5090	59,2400	-
31	136	16	0,0000	1,5360	0,0000	1,0000
32	136	120	0,4360	4,3000	66,6000	-
33	136	120	0,4360	4,3000	66,6000	-
34	136	131	0,3480	3,4200	52,8000	-
35	136	134	0,3750	4,1300	69,9000	-
36	136	138	0,6490	6,4600	100,8000	-
37	136	138	0,5580	6,1900	105,7000	-
38	140	138	0,6520	6,5000	101,4000	-
39	140	138	0,5580	6,1900	105,7000	-
40	210	18	0,0000	0,6667	0,0000	1,0000
41	210	217	0,0000	1,7200	0,0000	1,0000
42	210	217	0,0000	1,7200	0,0000	1,0000
43	210	370	0,1470	2,3200	196,6000	-
44	213	216	0,2190	2,4200	40,7000	-
45	216	396	0,1290	1,4140	23,7700	-
46	217	216	0,5650	6,2480	106,7300	-

Tabela 31 continua da página anterior

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
47	217	218	0,5070	5,6100	95,6000	-
48	217	218	0,5070	5,6100	95,6000	-
49	218	234	0,4300	4,7990	82,2000	-
50	218	234	0,4300	4,7990	82,2000	-
51	219	234	0,0350	0,4330	7,3400	-
52	219	234	0,0350	0,4330	7,3400	-
53	220	35	0,0000	4,4965	0,0000	1,0250
54	220	217	0,2260	2,3960	43,2350	-
55	220	219	0,7260	7,7040	138,0100	-
56	225	217	0,0000	2,7210	0,0000	0,9550
57	225	217	0,0000	2,9380	0,0000	0,9550
58	225	231	4,1000	19,7600	36,0800	-
59	225	231	1,2700	13,6200	49,4700	-
60	228	219	0,0000	3,5950	0,0000	1,0000
61	231	4501	4,5100	21,6900	40,2500	-
62	231	4501	1,4900	16,0900	55,4000	-
63	233	210	0,2800	3,9900	355,3600	-
64	233	320	0,2700	3,8700	344,0300	-
65	234	233	0,0000	1,1130	0,0000	1,0000
66	234	233	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000
67	320	210	0,1250	1,9370	149,9600	-
68	320	300	0,0000	1,3567	0,0000	1,0000
69	320	360	0,0820	1,2560	98,9900	-
70	325	301	0,0000	2,6325	0,0000	1,0000
71	325	326	0,0000	2,1600	0,0000	1,0000
72	325	326	0,0000	2,1600	0,0000	1,0000
73	325	360	0,1000	1,5190	119,6700	-
74	325	370	0,2800	4,8400	419,5000	-
75	326	134	0,0700	0,7600	12,2870	-
76	326	396	0,2400	2,7400	45,4700	-
77	360	302	0,0000	1,9367	0,0000	1,0000
78	370	303	0,0000	1,0575	0,0000	1,0000
79	370	535	0,0931	1,3758	112,3000	-
80	396	305	0,0000	2,2000	0,0000	1,0250
81	535	500	0,0000	1,0250	0,0000	1,0000
82	536	535	0,0000	1,5330	0,0000	1,0000

Tabela 31 continua da página anterior

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
83	536	535	0,0000	1,4200	0,0000	1,0000
84	814	895	0,0320	1,1460	0,0000	0,9652
85	814	895	0,0300	1,1651	0,0000	0,9652
86	824	800	0,0000	1,6800	0,0000	1,0240
87	824	933	0,0100	0,1240	15,2040	-
88	824	933	0,0100	0,1260	15,4280	-
89	834	934	2,4440	12,6520	21,7060	-
90	839	840	0,0000	6,6400	0,0000	1,0000
91	839	840	0,0000	6,2900	0,0000	1,0000
92	839	898	1,1300	6,9900	12,6170	-
93	839	1047	1,2200	7,6900	13,8100	-
94	839	2458	0,2200	1,0900	1,8601	-
95	839	2458	0,1700	1,0300	2,0537	-
96	856	810	0,0000	1,0500	0,0000	1,0000
97	856	933	0,0520	0,6540	80,4930	-
98	856	1060	0,0560	0,6970	85,7460	-
99	895	122	0,3080	3,9580	444,8400	-
100	895	122	0,3080	3,9580	444,8400	-
101	896	897	0,0500	0,7300	78,0600	-
102	897	808	0,0000	1,0200	0,0000	1,0240
103	898	848	0,0000	6,3600	0,0000	1,0000
104	898	1047	0,1500	0,8900	1,6317	-
105	933	895	0,2000	2,5500	312,7200	-
106	933	955	0,1620	2,0480	250,1700	-
107	933	959	0,2000	2,6900	336,4000	-
108	934	933	0,0310	1,2070	0,0000	0,9747
109	934	1047	3,0450	15,7380	27,1230	-
110	934	1047	3,0410	15,7180	27,0890	-
111	938	955	0,2556	2,9224	360,4000	-
112	938	959	0,1270	1,6030	195,8900	-
113	939	938	0,0310	1,1500	0,0000	0,9586
114	939	938	0,0320	1,1630	0,0000	0,9586
115	939	938	0,0000	1,2770	0,0000	0,9586
116	939	1015	1,2710	6,5620	11,3050	-
117	939	1015	1,2830	6,5640	11,5220	-
118	955	964	0,1877	2,3467	287,2400	-

Tabela 31 continua da página anterior

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
119	959	895	0,0500	0,4400	47,5800	-
120	960	834	2,2100	11,4750	19,6870	-
121	960	959	0,0320	1,1630	0,0000	0,9917
122	960	959	0,0310	1,1660	0,0000	0,9917
123	960	1015	1,8920	9,7760	16,8450	-
124	960	1015	1,8950	9,7040	17,0290	-
125	964	976	0,0733	0,9164	112,1700	-
126	965	964	0,0200	1,2110	0,0000	0,9717
127	965	964	0,0200	1,2330	0,0000	0,9717
128	976	995	0,2820	3,8520	493,7000	-
129	995	904	0,0000	1,1538	0,0000	1,0000
130	995	964	0,1643	3,0339	354,8800	-
131	995	1030	0,0730	0,9200	112,2600	-
132	995	1060	0,1720	2,1700	265,1600	-
133	1030	915	0,0000	2,0655	0,0000	1,0000
134	1030	955	0,0470	0,5900	71,8180	-
135	1047	919	0,0000	1,7022	0,0000	1,0250
136	1060	897	0,0760	1,1710	124,5800	-
137	1060	925	0,0000	1,5150	0,0000	1,0240
138	1210	976	0,0300	1,2190	0,0000	1,0110
139	1210	976	0,0390	1,1380	0,0000	1,0110
140	1210	976	0,0360	1,2170	0,0000	1,0110
141	1503	1504	0,0000	5,2000	0,0000	1,0000
142	2458	896	0,0000	1,2700	0,0000	0,9938
143	4501	4522	3,7600	20,6800	35,6600	-
144	4501	4522	1,6400	12,4600	61,5000	-
145	4521	4523	0,0000	20,7100	0,0000	1,0000
146	4522	4521	1,5300	7,6000	14,2500	-
147	4522	4532	3,2500	17,9200	32,7500	-
148	4522	4532	3,2500	17,9200	32,7500	-
149	4522	4623	0,0000	7,9500	0,0000	1,0000
150	4522	4623	0,0000	7,9500	0,0000	1,0000
151	4532	4530	0,0000	14,3000	0,0000	1,0000
152	4532	4533	0,0000	8,6000	0,0000	1,0000
153	4532	4533	0,0000	8,6000	0,0000	1,0000
154	4532	4533	0,0000	8,6000	0,0000	1,0000

Tabela 31 continua da página anterior

Linha	Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Shunt (Mvar)	Tap (p.u.)
155	4532	4542	1,6200	9,6800	19,1500	-
156	4533	4596	0,0000	3,7635	0,0000	1,0000
157	4542	4552	1,8300	10,9300	18,6000	-
158	4552	4572	1,4000	8,3800	17,0000	-
159	4562	4572	0,9400	5,5900	10,6440	-
160	4562	4582	1,2400	7,3800	13,2800	-
161	4592	21	0,0000	6,4000	0,0000	1,0000
162	4592	4542	1,0000	6,1700	12,6000	-
163	4623	4533	17,0600	45,5000	11,3900	-
164	4703	4533	0,9000	2,3100	0,5800	-
165	4703	4533	0,9000	2,3100	0,5800	-
166	4805	4804	0,0000	13,3330	0,0000	1,0000
167	4805	4807	3,0890	8,1340	2,0850	-
168	4805	4807	3,0890	8,1340	2,0850	-
169	4862	4532	2,5700	23,6800	97,4200	-
170	4862	4532	2,5700	23,6800	97,4200	-
171	4862	4807	0,0000	4,0500	0,0000	1,0000