

**UTILIZAÇÃO DO CONTROLE DE PASSO ÓTIMO NO FLUXO DE POTÊNCIA
COM JACOBIANO EXPANDIDO**

Bruno Lacerda Baños

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Alessandro Manzoni, D.Sc.
(Orientador)

Prof. Carmen Lúcia Tancredo Borges, D.Sc.

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2009

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao professor Alessandro Manzoni, por me orientar e me dar foco na execução deste projeto.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, pelo apoio nos momentos de fraqueza e por me proporcionarem tantos momentos de alegria.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família, pela minha educação e pelos meus valores

Resumo do Projeto submetido ao corpo docente do departamento de engenharia elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de engenheiro eletricitista.

UTILIZAÇÃO DO CONTROLE DE PASSO ÓTIMO NO FLUXO DE POTÊNCIA COM JACOBIANO EXPANDIDO

Bruno Lacerda Baños

Agosto / 2009

Orientador: Alessandro Manzoni, D. Sc.

Este trabalho consiste na execução de diversas simulações para averiguar o comportamento do método de controle de passo de Iwamoto quando aplicado diretamente nas formulações do fluxo de potência em coordenadas polares e retangulares.

O trabalho discute as dificuldades da implementação dos métodos de controle de passo no problema do fluxo de potência na presença de controles e os efeitos da aproximação adotada no desempenho do método de Newton.

Para realizar a averiguação supracitada, foram realizados testes nos sistemas de 11, 14 e 45 barras para os casos de carga base, proximidades do limiar de convergência e sobrecarga elevada. A resolução numérica foi feita com o método do fluxo de potência modificado.

Após a análise dos resultados das simulações, pode-se concluir que houve um ganho considerável na utilização do método de Iwamoto, aplicado da forma descrita acima, sobre o cálculo do fluxo de potência. A comparação dos valores obtidos com os valores de referência do método convencional indicam que não houve mudança no tocante ao número de iterações em que o sistema converge. Isto significa que as aproximações utilizadas, tanto no caso da matriz Jacobiana expandida quanto nos controles de tensão, não influenciaram significativamente no resultado final do cálculo. De um modo geral, a formulação do problema em coordenadas polares resultou em um número menor de iterações, enquanto a formulação em coordenadas retangulares apresentou um desempenho melhor nas proximidades do limiar de convergência do sistema.

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Capítulo I Introdução	1
I.1 Considerações Gerais	1
I.2 Estrutura do Trabalho	2
Capítulo II Fluxo de Carga com Controle de Passo	3
II.1 Considerações Gerais	3
II.2 Equações Básicas de Análise de Fluxo de Carga	3
II.3 Método de Newton – Raphson	7
II.4 Método de Newton - Raphson para coordenadas polares	9
II.5 Método de Newton-Raphson para coordenadas retangulares	11
II.6 Controle Ótimo de Passo	14
II.6.1 Método de Iwamoto	15
II.6.2 Método de Scudder	18
II.6.3 Método de Scudder por Castro	18
II.6.4 Método de Duarte	19
II.6.5 Método de Castro	19
II.7 Método de Newton –Raphson com a Jacobiana expandida.....	19
II.8 Conclusão	22
Capítulo III Resultados	24
III.1 Considerações Gerais	24
III.2 Sistema de 11 barras	25
III.2.1 Potência Reativa na Barra 8 - $Q_8 = 123$ Mvar	26
III.2.2 Potência Reativa na Barra 8 - $Q_8 = 122$ Mvar	32
III.2.3 Potência Reativa na Barra 8 - $Q_8 = 120$ Mvar	36
III.2.4 Potência Reativa na Barra 8 - $Q_8 = 101$ Mvar	41

III.3 Sistema IEEE de 14 barras	46
III.3 .1 Caso Base	47
III.3.2 Limiar da convergência	50
III.3.3 Sobrecarga de 50% além do limiar de divergência	64
III.4 Sistema de 45 Barras	70
III.4.1 Caso Base	71
III.4.2 Limiar da Convergência	72
III.4.3 Sobrecarga de 50% além do limiar de divergência	75
III.5 Comparação dos Resultados	77
Capítulo IV Conclusões	79
IV.1 Considerações Gerais	79
IV.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros	80
Referências	81

Lista de Figuras

Figura 2.1: Fluxos em um elemento da rede	5
Figura 2.2: Estrutura da matriz jacobiana expandida.	21
Figura 3.1: Tensões para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar	27
Figura 3.2: Tensões para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.	28
Figura 3.3: Tensões para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.....	29
Figura 3.4: Tensões para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.....	30
Figura 3.5: Tensões para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.	32
Figura 3.6: Tensões para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.....	33
Figura 3.7: Tensões para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.	34
Figura 3.8: Tensões para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.	35
Figura 3.9: Tensões para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.	37
Figura 3.10: Tensões para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.	38
Figura 3.11: Tensões para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.	39
Figura 3.12: Tensões para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.	40
Figura 3.13: Tensões para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.	42
Figura 3.14: Tensões para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.	43
Figura 3.15: Tensões para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.	44
Figura 3.16: Tensões para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.	45
Figura 3.17: Tensões para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga nominal.	47
Figura 3.18: Tensões para coordenadas polares e com controle de passo. Carga nominal.	48
Figura 3.19: Tensões para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga nominal.....	49
Figura 3.20: Tensões para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga nominal.....	50
Figura 3.21: Tensões para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,30%.....	51
Figura 3.22: Potências para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,30%.....	52
Figura 3.23: Tensões para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,35%.....	53
Figura 3.24: Potências para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,35%.....	53
Figura 3.25: Tensões para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,30%.....	54
Figura 3.26: Potências para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,30%.....	55

Figura 3.27: Tensões para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,35%.....	56
Figura 3.28: Potências para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,35%.....	56
Figura 3.29: Tensões para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,40%.....	58
Figura 3.30: Potências para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,40%.....	58
Figura 3.31: Tensões para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,45%.....	59
Figura 3.32: Potências para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,45%.....	60
Figura 3.33: Tensões para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,35%.....	61
Figura 3.34: Potências para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,35%.....	61
Figura 3.35: Tensões para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,40%.....	62
Figura 3.36: Potências para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,40%.....	63
Figura 3.37: Tensões para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 390%.....	64
Figura 3.38: Potências para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 390%.....	65
Figura 3.39: Tensões para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 390%.....	66
Figura 3.40: Potências para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 390%.....	66
Figura 3.41: Tensões para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 390%.....	67
Figura 3.42: Potências para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 390%.....	68
Figura 3.43: Tensões para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 390%.....	69
Figura 3.44: Potências para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 390%.....	69

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Valores de P, Q, V e θ atribuídos ao sistema de 11 barras	25
Tabela 3.2: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.	27
Tabela 3.3: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.....	28
Tabela 3.4: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.....	29
Tabela 3.5: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.....	30
Tabela 3.6: Comparação entre os valores do controle de passo. $Q_8=123$ Mvar.	31
Tabela 3.7: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.....	32
Tabela 3.8: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.....	33
Tabela 3.9: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.....	34
Tabela 3.10: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.....	35
Tabela 3.11: Comparação entre os valores do controle de passo. $Q_8=122$ Mvar.	36
Tabela 3.12: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.....	37
Tabela 3.13: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.....	38
Tabela 3.14: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.	39
Tabela 3.15: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.....	40
Tabela 3.16: Comparação entre os valores do controle de passo. $Q_8=120$ Mvar.	41
Tabela 3.17: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.	42
Tabela 3.18: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.	43
Tabela 3.19: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.	44
Tabela 3.20: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.	45
Tabela 3.21: Comparação entre os valores do controle de passo. $Q_8=101$ Mvar.	46
Tabela 3.22: Características do sistema IEEE 14 barras – caso base.....	46
Tabela 3.23: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga nominal.	47
Tabela 3.24: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. Carga nominal.	48
Tabela 3.25: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga nominal.	48
Tabela 3.26: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga nominal.	49
Tabela 3.27: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,30%.....	51
Tabela 3.28: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,35%.....	52
Tabela 3.29: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,30%.....	54

Tabela 3.30: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,35%.....	55
Tabela 3.31: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,40%.....	57
Tabela 3.32: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,45%.....	59
Tabela 3.33: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,35%.....	60
Tabela 3.34: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,40%.....	62
Tabela 3.35: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 390%.....	64
Tabela 3.36: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 390%.....	65
Tabela 3.37: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 390%.....	67
Tabela 3.38: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 390%.....	68
Tabela 3.39: Características do sistema de 45 barras – caso base.....	70
Tabela 3.40: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga nominal.	71
Tabela 3.41: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. Carga nominal.	71
Tabela 3.42: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga nominal.	71
Tabela 3.43: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga nominal.	71
Tabela 3.44: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 20,5%	72
Tabela 3.45: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 21,0%	72
Tabela 3.46: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 20,5%	73
Tabela 3.47: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 21,0%	73
Tabela 3.48: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 20,5%	74
Tabela 3.49: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 21,0%	74
Tabela 3.50: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 20,5%	75
Tabela 3.51: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 21,0%	75
Tabela 3.52: Relatório para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 81,5%.....	75
Tabela 3.53: Relatório para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 81,5%.....	76
Tabela 3.54: Relatório para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 81,5%.....	76
Tabela 3.55: Relatório para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 81,5%.....	76
Tabela 3.56: Número de iterações no sistema de 11 barras	77
Tabela 3.57: Número de iterações no sistema de 14 barras	78
Tabela 3.58: Número de iterações no sistema de 45 barras	78

Capítulo I

Introdução

I.1 Considerações gerais

Este trabalho tem por objetivo averiguar a utilização do método de Iwamoto diretamente nas formulações de fluxo de potência em coordenadas polares e retangulares e na presença de controles, calculados de forma simultânea no processo iterativo de Newton-Raphson. Essa averiguação foi feita através de uma comparação entre os desempenhos das quatro formulações diferentes utilizadas no cálculo do fluxo de potência.

A idéia para esse trabalho surgiu a partir de [2], onde a autora realizou a comparação entre o método de solução convencional, de Newton-Raphson com formulação em coordenadas polares, com diversos métodos de controle de passo.

O método de cálculo numérico de Newton-Raphson é o mais utilizado atualmente na maioria dos programas de simulação de fluxo de potência. Apesar de requerer algoritmos complexos para sua implementação, este método apresenta um bom desempenho computacional, pois apresenta característica de convergência quadrática na região próxima da solução. Entretanto, ele é muito sensível às condições iniciais, podendo ocorrer dificuldades para atingir a solução se o caso for mal-condicionado. O objetivo do controle ótimo de passo é oferecer um ganho ao processo de Newton-Raphson, de modo a “informar” ao sistema se as correções calculadas estão sendo feitas na direção certa.

O multiplicador ótimo consiste na utilização de um escalar que multiplica o vetor de erros de estado, durante a sua atualização, garantindo que os erros de potência de uma determinada iteração sejam sempre menores do que os erros da iteração anterior. Esse escalar é calculado em cada iteração do método de Newton-Raphson através da minimização da função custo.

Entretanto seria interessante saber se poderíamos utilizar o método de controle de passo de Iwamoto, que é o percussor dos outros métodos e formulado em coordenadas retangulares, juntamente com o problema do fluxo de potência descrito em coordenadas polares. Essa utilização conjunta apresenta algumas simplificações, mas facilita o processo de cálculo no sentido de não precisarmos modificar a estrutura do cálculo para cada tipo de coordenada. O trabalho procura responder questões como: A utilização desse método apresentaria algum ganho no cálculo do fluxo de potência? Como esse método funcionaria próximo dos limites do sistema? Existe uma diferença considerável entre a utilização do método em coordenadas polares e retangulares, mesmo supondo as aproximações?

Para chegar às conclusões sobre esses tópicos, primeiramente foram feitos testes de convergência com o sistema de 11 barras utilizado na dissertação da Roberta Matheus, para validar o método utilizado. A convergência ou não desse sistema ocorre devido à variação da potência reativa na barra de número 8. Após a validação do método, foram realizadas simulações nos sistemas IEEE de 14 barras e em um sistema de 45 barras. Nos sistemas de 11 e 14 barras as trajetórias da convergência das tensões, ângulos e potências em cada barra foram mostrados graficamente.

As simulações com os sistemas de 14 e 45 barras foram feitas para 4 casos diferentes: o caso base, com carregamento normal; com carga aumentada, até o limite de convergência, mas ainda assim convergindo; um pequeno acréscimo após o limite de convergência; e com uma grande sobrecarga (50% após o limite de convergência).

I.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 4 capítulos, que serão sucintamente descritos a seguir.

O Capítulo I apresenta uma visão geral do trabalho, explicando seus objetivos e descrevendo brevemente o que foi feito, como foi feito e por que foi feito.

No Capítulo II são apresentadas as bases teóricas dos métodos utilizados neste trabalho. É apresentado o problema do fluxo de potência e as equações básicas para sua análise. É explicada a solução numérica utilizando-se o método de Newton-Raphson (o método mais utilizado pelos programas de simulação) e a formulação em coordenadas polares e retangulares para que possam ser aplicadas diretamente ao método numérico. Após isso, são apresentados os métodos de controle de passo, dando-se destaque ao equacionamento do método de Iwamoto, que é o método utilizado nas

simulações deste trabalho. Em seguida é descrito o método do fluxo de potência modificado, que utiliza um número maior de equações do que o método convencional, mas fornece o resultado de todas as incógnitas do sistema simultaneamente. Por fim, são apresentadas as conclusões a respeito das formulações utilizadas no trabalho e considerações a respeito das aproximações realizadas em cada caso, assim como as implicações da utilização de controles de tensão nas barras do sistema no processo de cálculo.

O Capítulo III apresenta, primeiramente, os resultados dos relatórios dos fluxos de potência, com e sem passo, para o sistema de 11 barras. Foram utilizados quatro casos de carga reativa na barra de número 8, conforme o trabalho anterior [2] e [4] e os resultados comparados com os seus. A seguir são mostrados os resultados referentes ao sistema IEEE de 14 barras e 45 barras. Nesses dois casos foram aplicadas rampas de carga até que atingissem o limite de convergência. São feitas comparações entre as quatro formulações do fluxo de potência e, nos casos de 11 e 14 barras, ainda são apresentadas, de forma gráfica, as trajetórias das tensões e potências das barras do sistema durante as iterações do método Newton-Raphson.

O Capítulo IV apresenta discussões e comentários sobre os resultados obtidos neste trabalho, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo II

Fluxo de Carga com Controle de Passo

II.1 Considerações Gerais

Neste capítulo será revisado o problema da formulação de equações do fluxo de potência em coordenadas polares e retangulares, o método de solução numérica de Newton –Raphson, assim como a apresentação do método de controle de passo proposto por Iamoto.

II.2 Equações Básicas de Análise de Fluxo de Carga [1] e [7]

Pode-se obter a solução de qualquer rede elétrica em regime permanente através da solução simultânea de um sistema de $2(n-1)$ equações algébricas não-lineares, onde “n” é o número de barras da rede.

Cabe ressaltar que as equações do fluxo de carga são algébricas e não diferenciais, pois o interesse está na solução do sistema operando em regime permanente senoidal e os seus componentes são representados por modelos estáticos.

As equações são não-lineares, assim, não é possível utilizar os processos de análise de malhas ou análise nodal, comumente utilizado na teoria de circuitos. Essa não-linearidade ocorre devido a certas características da modelagem de alguns componentes.

As cargas comportam-se como elementos que absorvem potência ativa e reativa constante, nas faixas habituais de operação de tensão, sendo diferentes dos elementos de impedância constante, onde a potência ativa e reativa são proporcionais ao quadrado da tensão.

Admite-se que todas as variáveis e constantes estão em p.u.

A potência complexa aparente pode ser escrita da seguinte forma:

$$S = VI^* \quad (2.1)$$

Explicitando-se a potência aparente em função de suas componentes retangulares, vem:

$$P - jQ = IV^* \quad (2.2)$$

Para uma rede elétrica com a relação $[I] = [Y_{\text{barra}}][V]$, temos:

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ii}V_i + \dots + Y_{in}V_n \quad (2.3)$$

Substituindo (2.3) em (2.2):

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \quad (2.4)$$

A convenção de P_i e Q_i é de valores positivos quando forem potências injetadas na barra, e negativos quando forem potências absorvidas.

Como tanto as linhas como os transformadores são representados por modelos π , temos conforme a figura abaixo:

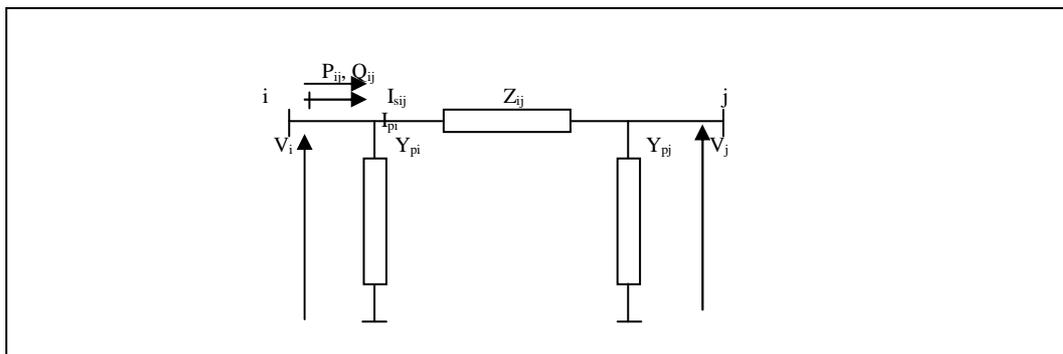


Figura 2.1: Fluxos em um elemento da rede.

$$I_{ij} = I_{sij} + I_{pi} \quad (2.5)$$

$$I_{sij} = \frac{(V_i - V_j)}{Z_{ij}} \quad (2.6)$$

$$I_{pi} = V_i y_{pi} \quad (2.7)$$

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.8)$$

$$S_{ij} = V_i \frac{(V_i^* - V_j^*)}{Z_{ij}^*} + |V_i|^2 y_{pi} \quad (2.9)$$

Como o interesse está apenas no regime permanente senoidal, supõem-se as tensões dos geradores perfeitamente equilibrados, desprezando-se o acoplamento mútuo entre as seqüências causadas por desequilíbrios na rede. Dessa forma os dados de rede incluem apenas a seqüência positiva.

Como a equação (2.4) é complexa, pode ser decomposta em duas equações reais. Isto permite escrever duas equações para cada barra do sistema, e assim para tornar possível a solução do sistema, é necessário especificar, a priori, duas das quatro variáveis de barra de modo a reduzir o número de incógnitas ao número de equações. É usual em sistemas elétricos de potência definir-se três tipos de barras em função da dupla de variáveis que são fixadas.

Tipos de barras:

Barra flutuante ou swing

As variáveis fixadas serão o módulo e a fase da tensão da barra, restando como incógnitas as potências P_g e Q_g . A necessidade desse tipo de barra surge devido ao fato de que as perdas também são uma incógnita e só serão conhecidas ao final da solução, não permitindo que se especifique, a priori, o despacho de todos os geradores.

Barra de carga

São conhecidas as potências ativa e reativa da carga P_c e Q_c e portanto essas serão, naturalmente, as variáveis fixadas. As incógnitas serão o módulo e a fase da tensão de barra. No caso de haver geradores conectados à barra de carga, deve-se fixar também a carga ativa e reativa geradas P_g e Q_g , respectivamente, e utilizamos a soma algébrica das potências no processo de solução.

Barra de Geração

Nessa barra é conhecida a potência ativa gerada P_g e o módulo da tensão da barra, restando como incógnitas a potência reativa Q_c e a fase da tensão da barra. Caso exista uma carga $P_c + jQ_c$ na barra deve-se utilizar o valor $(P_c + P_g)$ durante a solução e o valor de Q_c será armazenado para ser computado só ao final do processo iterativo, pois a potência reativa total injetada ou absorvida na barra é a incógnita do nosso problema.

As equações (2.10) precisam ser respeitadas sob pena de não ser possível a solução para o sistema de equações de fluxo de carga. É para possibilitar a existência de uma solução que se torna indispensável a existência de uma barra swing.

$$\begin{aligned}P_{c \text{ total}} + P_{perdas} &= P_{g \text{ total}} \\Q_{c \text{ total}} + Q_{perdas} &= Q_{g \text{ total}}\end{aligned}\tag{2.10}$$

II.3 Método de Newton – Raphson [7]

O método de Newton – Raphson é o método mais empregado pela maioria dos programas existentes de análise de fluxo de potência. Apresenta um processo iterativo que tem boas características de convergência (convergência quadrática) desde que se parta de uma estimativa inicial suficientemente próxima da solução.

Arbitrando-se um valor $x^{(0)}$ suficientemente próximo de uma das raízes reais da equação $y = f(x)$, pode-se obter uma aproximação melhor $x^{(h+1)}$, onde $h = 0, 1, 2, \dots, k$. A referida função pode ser expandida segundo a série de Taylor da seguinte forma:

$$y = f(x^{(h)}) + f'(x^{(h)})\Delta x^{(h)} + \frac{f''(x^{(h)})}{2!}(\Delta x^{(h)})^2 + \dots\tag{2.11}$$

Admitindo-se estar próximo da solução, os valores da segunda ordem da série de Taylor devem ser muito pequenos e podem ser desprezados. Para um sistema genérico de equações da forma:

$$\begin{aligned}y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_j) \\y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_j) \\y_j &= f_j(x_1, x_2, \dots, x_j)\end{aligned}\tag{2.12}$$

Onde y_1, y_2, \dots, y_j são constantes. As funções f_1, f_2, \dots, f_n podem ser expandidas em série de Taylor em torno de um ponto $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ resultando:

$$f_1(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) = f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f_1}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \frac{\partial f_1}{\partial x_n}$$

$$f_2(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) = f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \frac{\partial f_2}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f_2}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \frac{\partial f_2}{\partial x_n}$$

$$f_n(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_n^0 + \Delta x_n) = f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1 \frac{\partial f_n}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f_n}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \frac{\partial f_n}{\partial x_n}$$

(2.13)

Utilizando-se a expansão indicada em (2.13), o sistema de equações originais pode ser reescrito como:

$$[S] = [J] [\Delta x] \quad (2.14)$$

Onde:

$$[S] = \begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ y_2 - f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \\ \vdots \\ y_n - f_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \end{bmatrix}$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

O processo iterativo se inicia a partir de uma solução estimada $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ que permite o cálculo da matriz $[J]$ e do vetor $[S]$. A seguir calcula-se $[\Delta x]$ através de:

$$[\Delta x] = [J]^{-1}[S] \quad (2.16)$$

Corrige-se a solução estimada com os valores de Δx , calcula-se de novo o vetor $[S]$, a nova matriz $[J]$ e recalcula-se o vetor Δx . Prossegue-se iterando até que o vetor $[S]$ apresente todas as suas coordenadas inferiores a uma tolerância pré-estabelecida ε

II.4 Método de Newton - Raphson para coordenadas polares [7]

O sistema de equações que precisam ser resolvidas, para sistemas elétricos de potência, se resume em:

$$\begin{aligned} P_1 - jQ_1 &= V_1^* \sum_{j=1}^n Y_{1j} V_j \\ P_2 - jQ_2 &= V_2^* \sum_{j=1}^n Y_{2j} V_j \\ &\vdots \\ P_n - jQ_n &= V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{nj} V_j \end{aligned} \quad (2.17)$$

Reescrevendo a linha (2.17) com a notação $Y_{ik} = (G_{ik} + j B_{ik})$ e separando as partes real e imaginária, sendo $\alpha = (\theta_k - \theta_i)$, temos:

$$P_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \cos \alpha - B_{ik} \sin \alpha) \quad (2.18)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n -V_i V_k (B_{ik} \cos \alpha + G_{ik} \sin \alpha) \quad (2.19)$$

Expandindo-se em série de Taylor e colocando-se na forma apropriada ao algoritmo de Newton-Raphson, vem:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix}$$

$$(2.20)$$

Onde:

$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = -V_i V_K (B_{ik} \cos \alpha + G_{ik} \sin \alpha) \quad (2.21)$$

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - V_i^2 B_{ii} \quad (2.22)$$

$$N_{ik} = V_k \frac{\partial P_i}{\partial V_k} = V_i V_K (G_{ik} \cos \alpha - B_{ik} \sin \alpha) \quad (2.23)$$

$$N_{ii} = V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = P_i + V_i^2 G_{ii} \quad (2.24)$$

$$M_{ik} = V_k \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = V_i V_K (B_{ik} \sin \alpha - G_{ik} \cos \alpha) \quad (2.25)$$

$$M_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - V_i^2 G_{ii} \quad (2.26)$$

$$L_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} = -V_i V_K (B_{ik} \cos \alpha + G_{ik} \sin \alpha) \quad (2.27)$$

$$L_{ii} = V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = Q_i - V_i^2 B_{ii} \quad (2.28)$$

No método de cálculo em coordenadas polares, as equações correspondentes a Q_m das barras de geração não entram no processo de cálculo. Como o módulo da tensão não varia para essas barras, todas as derivadas parciais com relação a essa tensão são nulas, reduzindo assim a dimensão das submatrizes [J] e [L].

Para uma dada iteração “k” calcular a matriz Jacobiana utilizando os valores de V e θ já conhecidos, disponíveis na iteração (k-1). Com os valores de $\Delta P_i^{(k-1)}$ e $\Delta Q_i^{(k-1)}$ da iteração anterior, resolve-se o sistema linear da equação (2.29) e redefinimos os valores de V_i e θ_i através da relação (2.30).

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

(2.29)

$$\begin{aligned}\theta_i^{(k)} &= \theta_i^{(k-1)} + \Delta\theta_i^{(k-1)} \\ V_i^{(k)} &= V_i^{(k-1)} + \Delta V_i^{(k-1)}\end{aligned}\tag{2.30}$$

Calcula-se o novo vetor de mismatches $[S]^{(k)}$ e verifica-se se as coordenadas do vetor de erros ΔP e ΔQ estão inferiores ao valor pré-estabelecido ε . Em caso afirmativo admite-se a convergência e em caso contrário inicia-se uma nova iteração.

II.5 Método de Newton-Raphson para coordenadas retangulares [7]

Reescrevendo a linha (2.17) com V_i e Y_{ij} em coordenadas cartesianas, temos:

$$V_i = E_i + jF_i\tag{2.31}$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}\tag{2.32}$$

Substituindo (2.31 e 2.32) em (2.4) temos:

$$P_i - jQ_i = (E_i + jF_i)^* \sum_{j=1}^n (G_{ij} + jB_{ij})(E_j + jF_j)\tag{2.33}$$

Separando-se as partes real e imaginária, resulta:

$$P_i = \sum_{j=1}^n E_i(G_{ij}E_j - F_jB_{ij}) + F_i(F_jG_{ij} + E_jB_{ij})\tag{2.34}$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n F_i(G_{ij}E_j - F_jB_{ij}) - E_i(F_jG_{ij} + E_jB_{ij})\tag{2.35}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta F \end{bmatrix}$$

(2.36)

Onde se tem:

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial E_i} = 2E_i G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (E_j G_{ij} - F_j B_{ij}) \quad (2.37)$$

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial E_j} = (E_i G_{ij} + F_i B_{ij}) \text{ com } (j \neq i) \quad (2.38)$$

$$N_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial F_i} = 2F_i G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (F_j G_{ij} + E_j B_{ij}) \quad (2.39)$$

$$N_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial F_j} = (-E_i B_{ij} + F_i G_{ij}) \text{ com } (j \neq i) \quad (2.40)$$

$$M_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial E_i} = -2E_i B_{ii} - \sum_{j=1, j \neq i}^n (E_j B_{ij} + F_j G_{ij}) \quad (2.41)$$

$$M_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial E_j} = (F_i G_{ij} - E_i B_{ij}) \text{ com } (j \neq i) \quad (2.42)$$

$$L_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial F_i} = -2F_i B_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (E_j G_{ij} - F_j B_{ij}) \quad (2.43)$$

$$L_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial F_j} = -(F_i B_{ij} + E_i G_{ij}) \text{ com } (j \neq i) \quad (2.44)$$

A atualização dos valores é feita de forma análoga à modelagem em coordenadas polares.

O processo de cálculo resume-se em, numa dada iteração “k” calcular inicialmente a matriz Jacobiana utilizando-se os valores de E_i e F_i disponíveis na iteração (k-1). Com o vetor de mismatches $[S]^{(k-1)}$ já calculado e os valores de $\Delta P_i^{(k-1)}$ e $\Delta Q_i^{(k-1)}$ da iteração anterior, resolve-se o sistema linear da equação (2.45) e redefinem-se os valores de E_i e F_i através da relação (2.46).

$$\begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

(2.45)

$$\begin{aligned} E_i^{(k)} &= E_i^{(k-1)} + \Delta E_i^{(k-1)} \\ F_i^{(k)} &= F_i^{(k-1)} + \Delta F_i^{(k-1)} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Calcula-se então o vetor $[S]^{(k)}$ com os novos valores de E_i e F_i , e se as suas coordenadas forem inferiores a ϵ , admite-se a convergência do processo, caso contrário deve-se iniciar uma nova iteração.

O método de cálculo por coordenadas retangulares exige uma pequena diferença na matriz Jacobiana e no vetor de mismatches: nas barras de geração são especificadas a potência ativa da barra e o módulo da tensão, restando a fase da tensão na barra e a potência reativa como incógnitas. Entretanto, em coordenadas retangulares, não é possível separar o módulo e a fase das tensões, sendo necessária a inclusão de mais algumas linhas na equação.

As equações para a potência ativa são as mesmas das barras de carga, sendo que a segunda equação deve refletir a restrição ao módulo da tensão na barra, que deve permanecer constante

Chamando de $V_{i\text{esp}} = \sqrt{E_i^2 + F_i^2}$ a tensão especificada na barra geradora “i”, devemos acrescentar novos termos a matriz Jacobiana da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta |V|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \\ A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta F \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$[A]_{ii} = \frac{\partial V_{i\text{esp}}^2}{\partial E_i} = 2E_i \quad (2.48)$$

$$[A]_{ij} = \frac{\partial V_{i\text{esp}}^2}{\partial E_j} = 0 \quad (j \neq i) \quad (2.49)$$

$$[B]_{ii} = \frac{\partial V_{i\text{esp}}^2}{\partial F_i} = 2F_i \quad (2.50)$$

$$[B]_{ij} = \frac{\partial V_{i\text{esp}}^2}{\partial F_j} = 0 \quad (j \neq i) \quad (2.51)$$

Consideramos “n” barras no sistema, sendo “m” barras de geração e “k” barras de carga. A barra de número 1 é a barra swing. Então a dimensão do vetor ΔP é (n-1) e a dimensão de ΔQ será (n-m-1), e a dimensão de $\Delta|V|^2$ será (m).

II.6 Controle Ótimo de Passo [9] e [2]

Nesta seção, será apresentado o método de cálculo do multiplicador ótimo do método de Iwamoto, assim como uma breve descrição dos demais métodos de controle de passo.

O método de controle de passo consiste na utilização de um escalar, chamado de multiplicador ótimo, durante a atualização das variáveis de estado, da seguinte forma:

$$x^{(h+1)} = x^{(h)} + \mu^{(h)} \Delta x^{(h)} \quad (2.52)$$

O vetor x é o vetor das variáveis de estado do problema de fluxo de potência (magnitudes e ângulos das tensões em coordenadas polares e parte real e imaginária da tensão em coordenadas retangulares) que é atualizado a cada iteração do método Newton- Raphson.

O μ é o multiplicador ótimo utilizado nos métodos de controle de passo. O valor desse multiplicador varia de 0 a 1, e é calculado através da função custo mostrada abaixo:

$$F(x^{(h+1)}) = \frac{1}{2} [\Delta S(x^{(h)})]^T \cdot [\Delta S(x^{(h)})] \quad (2.53)$$

Onde $\Delta S(x)$ é o vetor de erros de potência ativa e reativa (na forma polar ou retangular)

A utilização da metodologia de controle de passo garante que enquanto o valor de MO não tender a zero, o valor da função custo em uma dada iteração seja sempre menor que o seu valor na iteração anterior. Assim sendo, indiretamente, ele garante que os erros de potência a cada iteração sejam menores que na iteração precedente, até que MO tenda a zero. Neste caso, o MO indica que não é mais possível proceder com a minimização da função custo, diagnosticando o caso como sem solução, ou seja, que a partir daquele ponto, não será possível diminuir mais os erros de potência.

O vetor de erros de potência (mismatches) é a diferença entre os valores especificados de potência ativa e reativa líquida em cada barra e o calculado pelas equações de injeção de potência.

$$\Delta S = S^{esp.} - S = \begin{bmatrix} P^{esp.} - P \\ Q^{esp.} - Q \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

O método de otimização de passo iterativo do cálculo do fluxo de potência pode ser definido como um problema de minimização unidirecional e pode ser enunciado da seguinte forma:

$$\min_{\mu} F(x^{(h)} + \mu \Delta x^{(h)}) \quad (2.55)$$

Onde F é a função custo a ser minimizada, sendo tal minimização feita na direção Δx (correções nos valores de estado), a partir de um ponto de operação da rede elétrica x

A minimização unidirecional baseia-se em regras para a escolha do comprimento de passo μ para a atualização da solução em uma direção descendente $\Delta x^{(h)}$ a cada iteração h , de maneira que com a nova solução $x^{(h+1)}$ se obtenha:

$$F(x^{(h+1)}) < F(x^h) \quad (2.56)$$

Assim sendo, quando da solução do fluxo de potência, se o MO assume um valor próximo de zero, isto significa que a única forma de se conseguir o critério $F(x^{(h+1)}) < F(x^h)$, é não atualizando mais a solução. Ao contrário, se o MO assume um valor próximo a 1.0, este é um indicativo de que a direção do vetor de correções (e o comprimento do passo que se dá nessa direção) é suficiente para determinar a solução do fluxo de potência.

II.6.1 Método de Iwamoto [9] e [2]

O método de Iwamoto trabalha com as coordenadas do problema do fluxo de potência na sua forma retangular e foi o primeiro método criado na formulação de otimizadores de passo.

A seguir, veremos como é calculado o valor do MO no método de Iwamoto:

A função custo pode ser escrita da seguinte forma:

$$F(x^{(h+1)}) = \frac{1}{2} [\Delta S(x^{(h)} + \mu \Delta x^{(h)})]^T \cdot [\Delta S(x^{(h)} + \mu \Delta x^{(h)})] \quad (2.57)$$

Que pode ser reescrita na forma de um somatório:

$$F(x^{(h+1)}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2n} [\Delta S_i(x^{(h)} + \mu \Delta x^{(h)})]^2 \quad (2.58)$$

Sendo o vetor de erros de potência dado por:

$$\Delta S(x^{(h)} + \mu \Delta x^{(h)}) = S^{esp.} - S(x^{(h)} + \mu \Delta x^{(h)}) \quad (2.59)$$

Expandindo-se as equações de injeção de potência na série de Taylor até segunda ordem, tem-se que:

$$S(x^{(h)} + \mu \Delta x^{(h)}) = S(x^{(h)}) + \mu J(x^{(h)}) \Delta x^{(h)} + \mu^2 S(\Delta x^{(h)}) \quad (2.60)$$

Substituindo-se (2.60) em (2.59):

$$\Delta S(x^{(h)} + \mu \Delta x^{(h)}) = S^{esp.} - S(x^{(h)}) - \mu J(x^{(h)}) \Delta x^{(h)} - \mu^2 S(\Delta x^{(h)}) = 0 \quad (2.61)$$

E definindo-se:

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{2k+m} \end{bmatrix} = S^{esp.} - S(x^{(h)}) \quad (2.62)$$

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{2k+m} \end{bmatrix} = -J \Delta x^{(h)} \quad (2.63)$$

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{2k+m} \end{bmatrix} = -S(\Delta x^{(h)}) \quad (2.64)$$

Onde os vetores \mathbf{a} , \mathbf{b} e \mathbf{c} possuem dimensão $([2k+m] \times 1)$. O vetor \mathbf{a} equivale a $\mathbf{a} = \Delta S(x)$, que é o vetor de erros de potência. O vetor $\mathbf{b} = -\mathbf{a}$, e \mathbf{c} é o vetor das equações de injeção de potência calculadas para as correções das variáveis de estado.

Cabe aqui uma pequena discussão a respeito do vetor \mathbf{c} , onde demonstra-se em [2] que ele é exatamente igual à $\mathbf{c} = -\frac{1}{2}H(\Delta X)^2$, onde “H” é a matriz Hessiana das equações de potência, mas apenas para coordenadas retangulares. Quando o problema é formulado em coordenadas polares, essa correspondência sofre aproximações decorrentes do aparecimento de funções transcendentais (senos e cossenos) que apresentam termos não nulos na segunda ordem da expansão em série de Taylor.

Substituindo-se as equações (2.62), (2.63) e (2.64) em (2.61) temos:

$$a + \mu b + \mu^2 c = 0 \quad (2.65)$$

E podemos reescrever a função custo :

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2n} [a_i + \mu b_i + \mu^2 c_i]^2 \quad (2.66)$$

Aplicando-se o critério proposto em (2.55) a cada iteração:

$$\frac{\partial F^{(h)}}{\partial \mu^{(h)}} = 0 \quad (2.67)$$

$$g_0 + g_1 \mu + g_2 \mu^2 + g_3 \mu^3 = 0 \quad (2.68)$$

Onde:

$$g_0 = \sum_{i=1}^{2n} a_i b_i \quad (2.69)$$

$$g_1 = \sum_{i=1}^{2n} b_i^2 + 2c_i a_i \quad (2.70)$$

$$g_2 = 3 \sum_{i=1}^{2n} c_i b_i \quad (2.71)$$

$$g_3 = 2 \sum_{i=1}^{2n} c_i^2 \quad (2.72)$$

A equação cúbica acima é resolvida pelo método de Tartália. Suas raízes podem ser puramente reais ou possuir um par de raízes complexas conjugadas. Resolvendo-se esta equação, tem-se que a raiz real positiva mais próxima de 1.0 do polinômio é, a priori, o valor a ser atribuído ao MO que ajustará o passo iterativo da correção das variáveis do fluxo de potência.

II.6.2 Método de Scudder [10] e [2]

O método de Scudder consiste numa tentativa de adaptação do método de Iwamoto (formulado em coordenadas retangulares) para coordenadas polares.

A formulação desse método assume que as equações de injeção de potência calculadas para coordenadas polares têm o mesmo valor das equações calculadas para coordenadas retangulares, assim como o valor de tais equações calculadas para as correções das variáveis de estado para ambas as formulações, no entanto, essa última consideração é uma aproximação, pois os vetores de correção são diferentes: $S(\Delta X^r) \neq S(\Delta X^p)$. Essa diferença se deve às matrizes Jacobianas.

No método de Scudder, o vetor \mathbf{a} é o mesmo da formulação de Iwamoto, assim como o vetor \mathbf{c} . Este último consiste numa aproximação. O vetor \mathbf{b} , entretanto não é o mesmo e não podemos mais afirmar que $\mathbf{b} = -\mathbf{a}$.

II.6.3 Método de Scudder por Castro [4] e [2]

O método anterior sofre uma pequena alteração para tentar reproduzir, com maior rigor, o método de Iwamoto, assumindo que o vetor \mathbf{c} não é o mesmo nas duas formulações.

O problema desse método é que ele utiliza o cálculo do vetor \mathbf{c} do controle de passo em coordenadas retangulares e as equações do fluxo de potência em coordenadas polares. A solução adotada foi uma relação de transformação entre o vetor ΔX^r e ΔX^p . Cabe salientar que a diferença entre $S(\Delta X^r)$ e $S(\Delta X^p)$ será tanto maior quanto mais distante se estiver da solução. Assim sendo, quando estiver próximo da convergência, o método de Scudder e o método de Scudder por Castro tenderão a apresentar o mesmo valor do multiplicador ótimo.

II.6.4 Método de Duarte [11] e [2]

A proposta do método de Duarte é proceder com o cálculo do multiplicador ótimo em coordenadas retangulares e o problema do fluxo de potência em coordenadas polares. Esse processo se dá através de uma relação entre essas duas coordenadas.

Esse método possibilita um cálculo exato de μ , pois nesse caso, a expansão em série de Taylor de $\Delta \mathbf{S} = -\mathbf{J}\Delta \mathbf{X}$ é exata. No entanto, como $\Delta \mathbf{X}^r \neq \Delta \mathbf{X}^p$, não necessariamente o valor de μ determinado para $\Delta \mathbf{S}^r$ na direção $\Delta \mathbf{X}^r$ será o mais adequado para a atualização de \mathbf{X}^p .

II.6.5 Método de Castro [4], [8] e [2]

Em vez de tentar adaptar a formulação do controle de passo (originalmente formulado em coordenadas retangulares) para coordenadas polares, o método de Castro apresenta uma metodologia de otimização de passo inteiramente formulada em coordenadas polares, eliminando assim as aproximações.

Os termos coeficientes \mathbf{a} , \mathbf{b} e \mathbf{c} não sofrem mudanças de coordenadas polar-retangular e a minimização unidirecional μ ocorre exatamente na direção \mathbf{X}^p .

II.7 Método de Newton-Raphson com a Jacobiana Expandida

Quando trabalhamos com o fluxo de potência na formulação convencional, em coordenadas polares, utilizamos duas equações para cada barra PQ e uma equação para cada barra PV (total de $2n-m-2$ equações). Na formulação em coordenadas retangulares, como não conseguimos separar o módulo e a fase da tensão, utilizamos duas equações para cada barra PQ e duas para cada barra PV, onde uma equação auxiliar é adicionada na formulação, suprimindo apenas as equações da barra swing (total de $2n-2$ equações).

No fluxo de potência modificado, são utilizadas duas equações para cada uma das barras do sistema (geração, carga e swing), sendo adicionadas as equações (2.73) e (2.74) para reproduzir o efeito das barras PV ou $V\theta$. Essas equações são resolvidas simultaneamente, desta forma, ao terminar o processo de convergência, já temos as respostas para todas as incógnitas de todas as barras do sistema.

Como a barra swing tem fixos os valores de V e θ , as novas equações devem atender a essa restrição. As equações a serem incorporadas no processo de solução são:

$$\text{Barra PV: } 0 = V_{esp} - V \quad (2.73)$$

$$\text{Barra V}\theta: \begin{cases} 0 = V_{esp} - V \\ 0 = \theta_{esp} - \theta \end{cases} \quad (2.74)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J^{exp.}] \begin{bmatrix} \Delta P_{ref.} \\ \Delta Q_{ref.} \\ Q_{ger.} \\ \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

A matriz abaixo pode ser encarada como uma expansão da matriz jacobiana da solução convencional das equações de fluxo de carga pelo método Newton-Raphson. Nela aparecem termos adicionais que são as derivadas parciais de (2.4) em relação às potências ativa e reativa da barra de referência e potências reativas das barras de tensão controlada (PV) e também termos devido à inclusão de linhas adicionais na matriz, e que seriam aquelas relativas às equações de desvios ativo e reativo na barra de referência e desvio reativo nas barras de tensão controlada.

Convencionou-se que “g” corresponde às barras de geração, “c” às barras de carga e “ref” à barra de referência.

		$V\theta$		PV			<i>Fluxo tradicional</i>					
		P_{ref}	Q_{ref}	Q_{g1}	...	Q_{gm}	θ_1	...	θ_n	V_1	...	V_n
ΣP	ref	1					$\frac{\partial P}{\partial \theta}$	[H]	$\frac{\partial P}{\partial V}$	[N]		
	g_1											
	\vdots											
	g_m											
	c_1											
	c_k											
ΣQ	ref		1				$\frac{\partial Q}{\partial \theta}$	$\frac{\partial Q}{\partial V}$				
	g_1			1								
	\vdots				1							
	g_m					1						
	c_1						[M]	[L]				
	c_k											
$0 = \theta_{esp} - \theta$	ref						-1					
$0 = V_{esp} - V$	ref									-1		
	g_1										-1	
	g_m											-1

Figura 2.2: Estrutura da matriz jacobiana expandida. Dimensão $(2n) \times (2n)$.

A matriz jacobiana expandida acima considera um sistema de (n) barras, sendo (m) barras de tensão controlada e (k) barras de carga. As submatrizes [H], [N], [M] e [L] são as mesmas da matriz jacobiana tradicional.

A estrutura dessa matriz expandida pode ser utilizada tanto para coordenadas retangulares quanto para coordenadas polares. No caso da utilização em coordenadas retangulares, em vez de θ e V teremos as partes real e imaginária de V .

II.8 Conclusão

Neste capítulo foram descritas as formulações do problema do fluxo de potência e controle de passo que serão utilizadas nas simulações do próximo capítulo.

Num sistema elétrico real, além do problema do equacionamento das tensões e potências nas barras, existe também a necessidade de se incluir equações relativas aos equipamentos de controle. Entretanto, a representação desses dispositivos de controle no problema do fluxo de potência pode ter um impacto desfavorável no processo de solução, ocorrendo redução de eficiência no método de Newton-Raphson.

A incorporação de dispositivos de controle pode ser feita através da inclusão de uma variável de controle, que é atualizada entre as iterações sucessivas do processo do fluxo de potência; ou pela inclusão das equações referentes ao controle na própria matriz jacobiana. Em ambos os casos pode existir o problema do aumento do número de iterações ou até mesmo da divergência de um sistema que é realizável, pois os controles realizados durante as primeiras iterações normalmente trabalham com valores muito distantes do valor real do sistema.

Conforme descrito em estudos anteriores [2], a utilização de variáveis de controle fora da matriz jacobiana não funciona apropriadamente quando o sistema está operando em pontos de operação próximos aos seus limites.

A metodologia de solução simultânea pode representar um complicador adicional, quando utilizado junto com o controle de passo. A utilização de uma matriz jacobiana expandida implica na necessidade de se modificar os vetores **a**, **b** e **c** dos métodos de controle de passo, de forma a incluir as novas equações.

Entretanto, conforme foi demonstrado em [2], as equações de controle de um LTC dependem apenas da tensão na barra controlada, sendo as suas derivadas, de primeira e segunda ordem, nulas. Isto implica que o vetor **c** não é modificado, pois só são incorporados termos nulos a ele.

Os vetores que representam os erros de tensão de cada barra controlada a cada iteração do processo de solução do fluxo de potência são muito menores do que a segunda derivada das equações de potência, assim sendo as raízes da equação cúbica (2.68) e conseqüentemente o valor de μ praticamente não são afetados pela incorporação das equações de controle à função custo.

Com base nisso, pode-se dizer que não é necessária a incorporação explícita das equações de controle de tensão de LTCs à função custo e que a metodologia de cálculo do MO não precisa ser modificada.

O método de Iwamoto apresenta desempenho ótimo para formulação em coordenadas retangulares, no entanto sofre aproximações para aplicação direta no caso de coordenadas polares. Isso se deve às aproximações nos vetores **b** e **c**, já que o vetor **a** representa o vetor de erros de potência ativa e reativa, em qualquer formulação.

A formulação do fluxo de potência modificado apresenta uma matriz jacobiana expandida. Ao utilizar o controle de passo nesse método, também é necessário fazer algumas simplificações, que são relativas às equações da barra swing, no caso de coordenadas retangulares; e das barras swing e de tensão controlada, no caso das coordenadas polares. Como o objetivo deste trabalho não é conseguir o multiplicador ótimo, e sim conseguir um ganho no processo de cálculo numérico, podemos utilizar o método mesmo assim.

Capítulo III

Resultados

III.1 Considerações Gerais

Este capítulo tem como objetivo a apresentação dos resultados obtidos através de simulações de diferentes casos de carregamentos para os sistemas de 11 barras, IEEE de 14 barras e um sistema de 45 barras.

O sistema de 11 barras foi utilizado como sistema teste para validação do método de controle de passo utilizado, pois os seus resultados já eram conhecidos [2] e [4].

Para os casos de 14 e 45 barras, o fluxo de carga primeiro foi calculado para o caso base e depois a carga foi aumentada até o limite de convergência através da aplicação de uma função rampa que age sobre a carga de todas as barras do sistema. Após isso o sistema foi sobrecarregado de novo de duas formas. Primeiro a carga foi aumentada em 0,05%, o suficiente para que o resultado não fosse mais convergente, e depois a carga foi aumentada em 50% sobre o limiar de convergência.

Os resultados aqui apresentados permitem estabelecer uma comparação do efeito do controle de passo no desempenho do cálculo do fluxo de potência nas formulações polar e retangular.

Com o objetivo de facilitar a visualização dos resultados, são apresentados gráficos das trajetórias das tensões em cada barra e dos valores de potência para as simulações dos casos de 11 e 14 barras.

O programa utilizado para as simulações foi o PSLab versão educacional. Todas as cargas foram modeladas como potência constante e a tolerância máxima pré-estabelecida para as potências ativa e reativa é de 1.0 MW/MVAr. A condição inicial adotada na solução foi o *flat start*. Se o processo não conseguir convergir em até 20 iterações, ou o mismatch aumentar durante 4 iterações consecutivas, assume-se que o sistema é divergente.

III.2 Sistema de 11 barras

Os resultados do fluxo de potência do sistema a seguir visam validar o método utilizado, através da comparação com os resultados obtidos em [2] e [4]. O método utilizado para comparação é o método de Iwamoto.

A seguir a descrição do sistema de 11 barras:

Barra	Tipo	V (pu)	θ (Graus)	P(MW)	Q(MVAr)
1	Carga			400*	87.00
2	Carga			500.00	165.00
3	Carga			-75.00	42.00
4	Carga			25.00	81.00
5	Carga			0.00	0.00
6	Carga			-250.00	-11.00
7	Carga			-200.00	-42.00
8	Carga			-250.00	Q_8^{**}
9	Carga			-175.00	-3.00
10	Carga			-375.00	-59.00
11	Slack	1.0400	0.00		

* Potências positivas indicam geração e potências negativas indicam consumo

** Valor a ser variado nas simulações

Tabela 3.1: Valores de P, Q, V e θ atribuídos ao sistema de 11 barras.

Os valores das resistências, reatâncias e susceptâncias foram atribuídas às linhas de transmissão conforme descrito em [2] e [4].

O sistema utilizado é mal condicionado, e tem um comportamento diferente dependendo do valor da injeção de potência reativa na barra número 8 conforme descrito abaixo:

- Para $Q_8 \geq 123 \text{ Mvar}$ a solução do fluxo de potência converge e a barra swing (barra de número 11) consome potência reativa.
- Para $120 \text{ Mvar} < Q_8 \leq 123 \text{ Mvar}$ a solução do fluxo de potência não converge.

-
- Para $101 \text{ Mvar} < Q_8 \leq 120 \text{ Mvar}$ a solução converge e a barra swing fornece potência reativa.
 - Para $Q_8 \leq 101 \text{ Mvar}$ a solução não converge.

Os resultados apresentados a seguir estão de acordo com o que era esperado com base em estudos anteriores, tanto em relação à convergência ou não-convergência quanto ao valor da potência reativa na barra swing para os diversos valores de Q_8 .

Deve-se ressaltar, que nos casos a seguir *sem controle de passo*, apesar de o valor de alpha aparecer nos relatórios de convergência, ele não é aplicado ao cálculo do fluxo de potência.

III.2.1 Potência Reativa na Barra 8 - $Q_8 = 123 \text{ Mvar}$

As tabelas a seguir mostram os valores dos mismatches em cada iteração do cálculo do fluxo de carga, assim como os valores do alpha (multiplicador ótimo). Como era de se esperar a barra swing está consumindo potência reativa.

- **Formulação em coordenadas polares sem controle de passo – $Q_8=123$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]
	ERRO MW/MVAR	T BARRA		ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.000000
1 X	1874.18	P	2	0.000733	GERD	UG11	Q	0.56124
2 X	7659.45	P	2	0.001187	GERD	UG11	Q	0.61464
3 X	17722.13	P	2	0.001240	GERD	UG11	Q	0.74115
4 X	3197.22	P	2	0.000625	GERD	UG11	Q	0.98702
5 X	722.76	P	2	0.001480	GERD	UG11	Q	0.90615
6 X	144.75	Q	7	0.000688	GERD	UG11	Q	0.91515
7 X	26.11	P	10	0.000273	GERD	UG11	Q	0.91345
8 X	7.45	P	2	0.000080	GERD	UG11	Q	0.97526
9 X	0.32	P	2	0.000014	GERD	UG11	Q	0.99887

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.26	-266.10

Tabela 3.2: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.

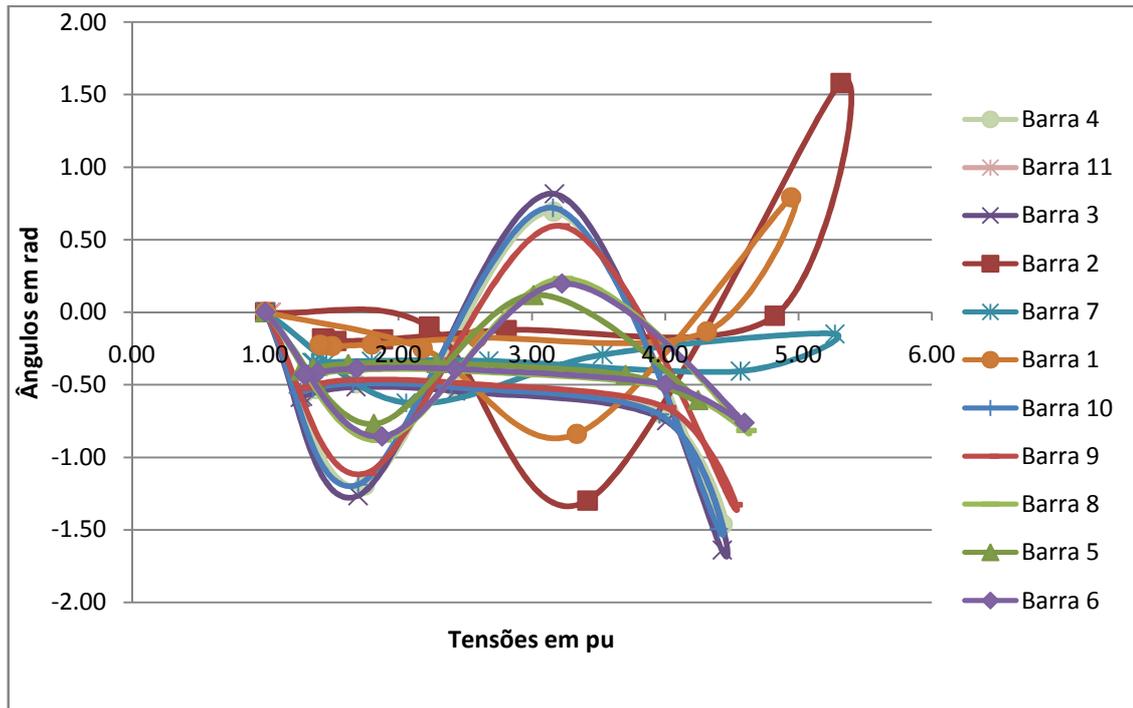


Figura 3.1: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.

Pode-se observar pelo gráfico das trajetórias que os valores de tensão primeiro aumentam para ordem de 5.0 pu e depois voltam para a proximidade de 1.5 pu.

- **Formulação em coordenadas polares com controle de passo – $Q_8=123$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE]	ELETRICA	T	BARRA	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	[ALPHA] P.U.
0	X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11		P	1.00000
1	X	278.36	P	2	0.000411	GERD	UG11		Q	0.56124
2	X	33.87	P	2	0.000359	GERD	UG11		Q	0.99005
3	X	0.75	P	11	0.000047	GERD	UG11		Q	0.99671

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.23	-267.77

Tabela 3.3: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar

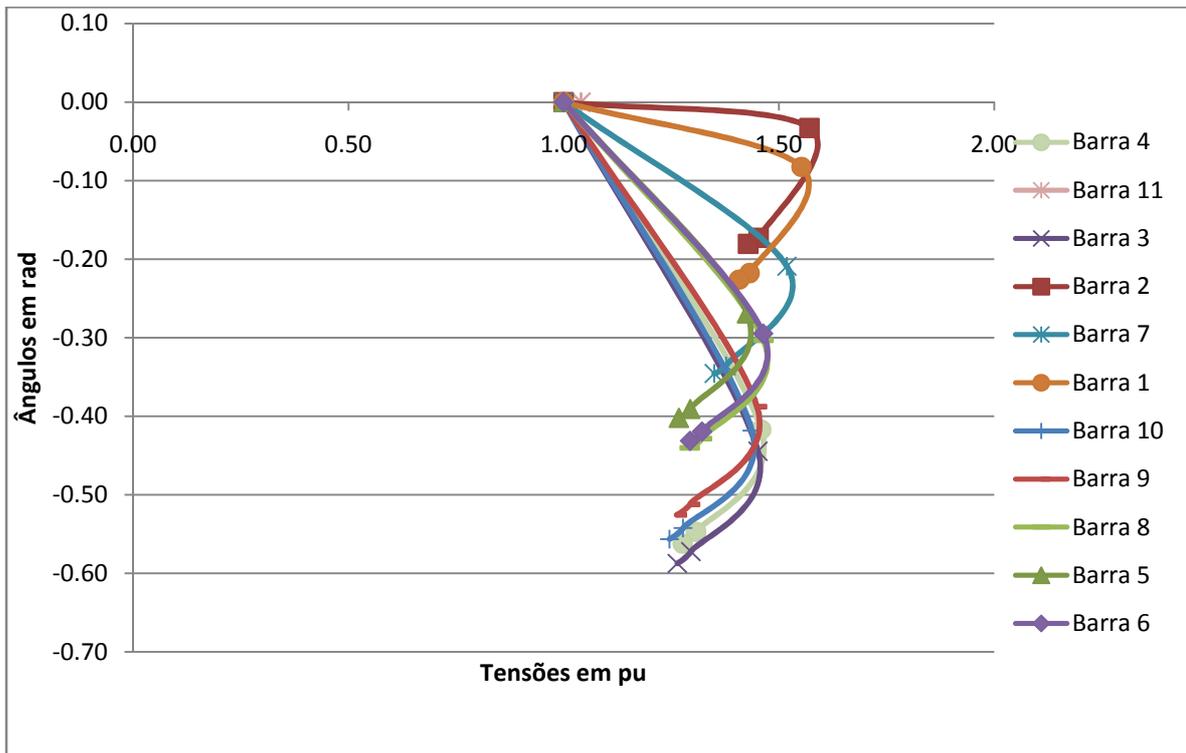


Figura 3.2: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.

Com a utilização do controle de passo os valores de tensão não aumentam tanto como no caso anterior, sendo a primeira excursão limitada em torno de 1.5 pu.

- **Formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo – $Q_8=123$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000	
1 X	623.49	P	2	0.000731	GERD	UG11	Q	0.49881	
2 X	90.26	P	2	0.000519	GERD	UG11	Q	0.88038	
3 X	7.70	Q	10	0.000181	GERD	UG11	Q	0.94278	
4 X	0.39	Q	10	0.000032	GERD	UG11	Q	0.97123	

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.24	-267.08

Tabela 3.4: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar

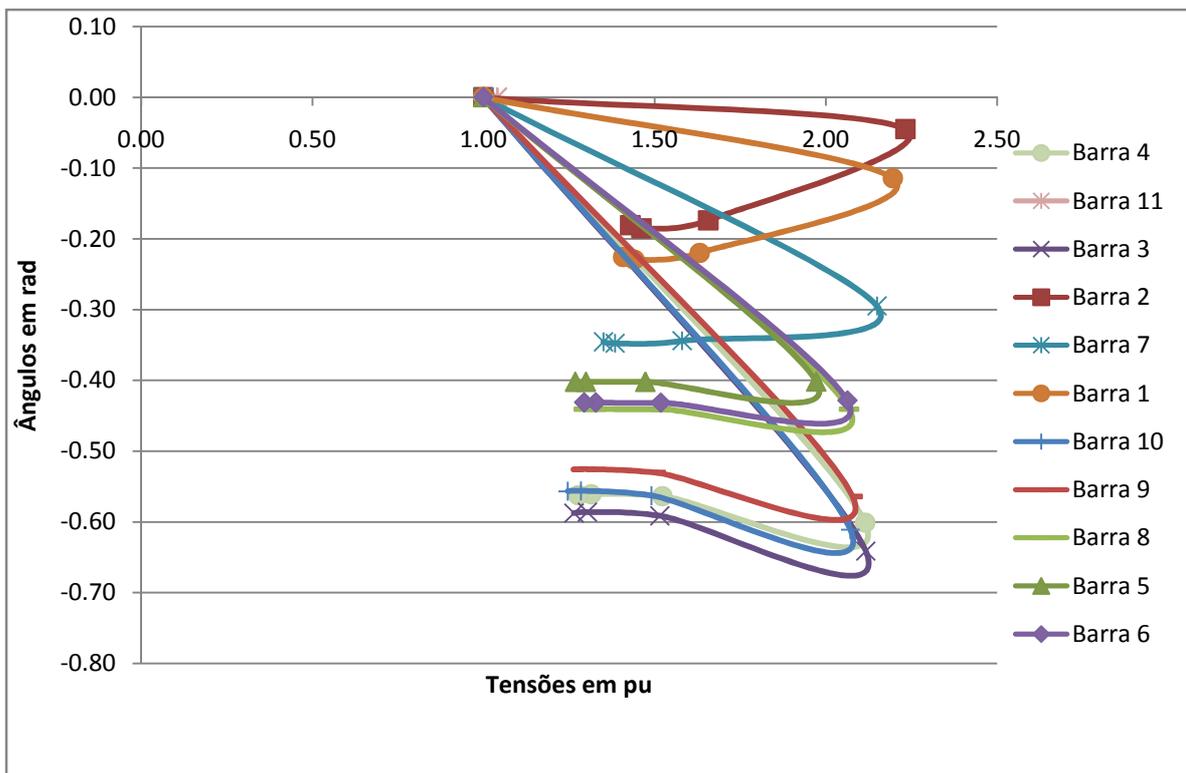


Figura 3.3: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.

• **Formulação em coordenadas retangulares com controle de passo – $Q_8=123$ MVar**

[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	
NO. ITR	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000	
1 X	206.74	P	11	0.000365	GERD	UG11	Q	0.49871	
2 X	32.00	Q	10	0.000242	GERD	UG11	Q	0.93681	
3 X	5.49	Q	10	0.000103	GERD	UG11	Q	0.92006	
4 X	0.27	Q	10	0.000020	GERD	UG11	Q	0.97657	

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.25	-266.46

Tabela 3.5: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar

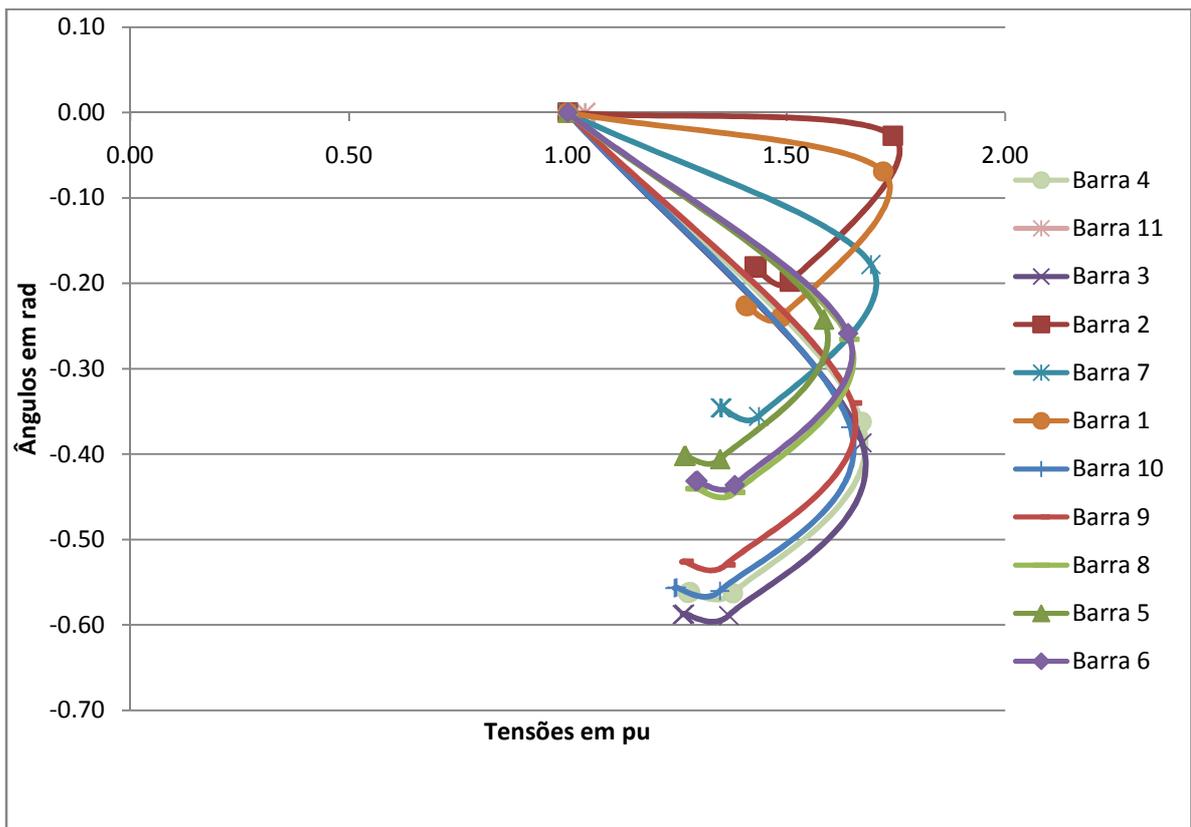


Figura 3.4: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 123$ Mvar.

No trabalho anterior [2], a convergência se deu em 10 iterações contra 9 iterações conseguidas neste trabalho na simulação para o caso sem controle de passo e em 4 iterações para o caso com controle de passo (Iwamoto) e os valores do alpha também estão dentro do esperado.

	Valores de Alpha encontrados		
Iteração	Iwamoto [2]	Fluxo Modificado - Retangular	Fluxo Modificado - Polar
1	0.582462	0.49871	0.56124
2	1.041739	0.93681	0.99005
3	1.062270	0.92006	0.99671
4	1.005363	0.97657	-

Tabela 3.6: Comparação entre os valores do controle de passo obtidos em [2] e os valores obtidos neste trabalho. $Q_8=123$ Mvar.

III.2.2 Potência Reativa na Barra 8 - $Q_8 = 122 \text{ Mvar}$

Para este valor de potência reativa na barra 8, o resultado deve ser divergente para o caso sem controle de passo e convergente para a simulação com controle de passo.

- **Formulação em coordenadas polares sem controle de passo – $Q_8=122 \text{ MVar}$**

MISMATCHS: REDE ELETRICA				MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS				ALPHA	
NO. ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA		ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000	
1 X	1870.12	P	2	0.000731	GERD	UG11	Q	0.56188	
2 X	7686.66	P	2	0.001190	GERD	UG11	Q	0.61317	
3 X	19336.33	P	2	0.001313	GERD	UG11	Q	0.72087	
4 X	50922.02	P	2	0.002054	GERD	UG11	Q	0.71480	

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.25	-266.46

Tabela 3.7: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 122 \text{ Mvar}$

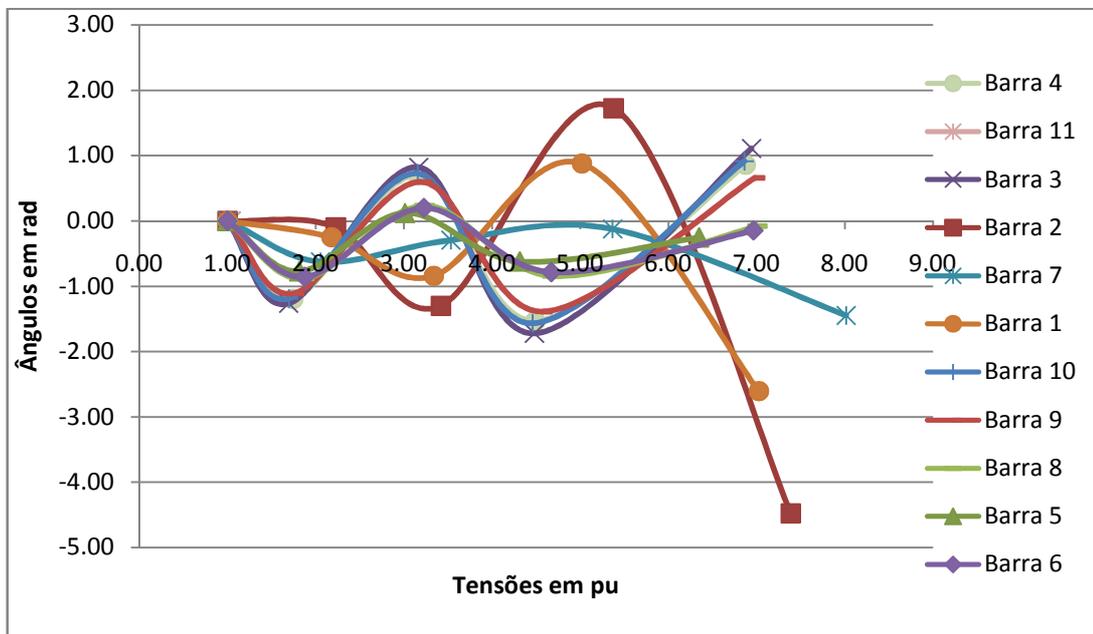


Figura 3.5: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 122 \text{ Mvar}$.

O sistema é divergente para a formulação utilizada. O gráfico mostra o valor das tensões explodindo para valores entre 7.0 e 8.0 pu.

- **Formulação em coordenadas polares com controle de passo – $Q_8=122$ MVar**

MISMATCHS: REDE ELETRICA				MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS				ALPHA	
NO.	ITR	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.
0	X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000
1	X	278.99	P	2	0.000411	GERD	UG11	Q	0.56188
2	X	33.99	P	2	0.000360	GERD	UG11	Q	0.99001
3	X	0.76	P	11	0.000048	GERD	UG11	Q	0.99667

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.23	-266.44

Tabela 3.8: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar

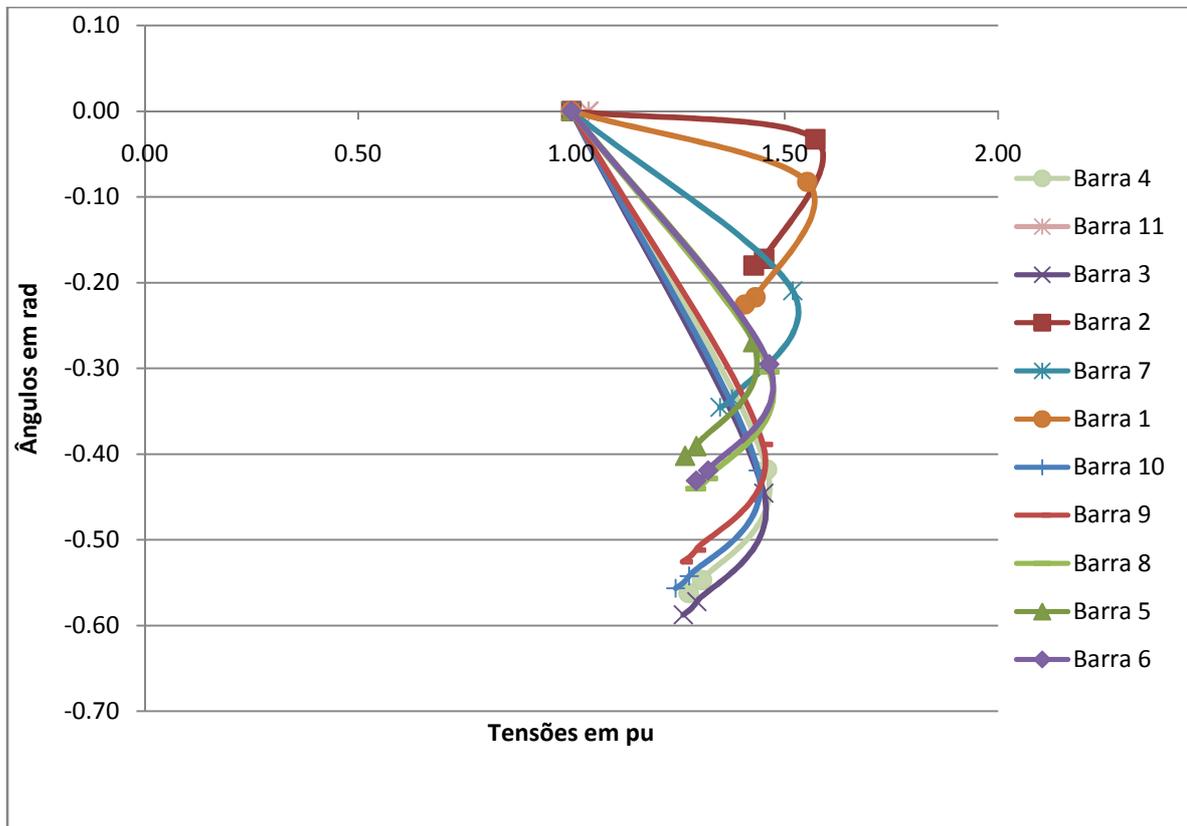


Figura 3.6: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.

- **Formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo – $Q_8=122$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE]	ELETRICA	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]
	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	P.U.
0 X	500.00	P 2	0.000000	GERD UG11 P 1.00000
1 X	622.55	P 2	0.000731	GERD UG11 Q 0.49931
2 X	90.08	P 2	0.000518	GERD UG11 Q 0.88040
3 X	7.72	Q 10	0.000181	GERD UG11 Q 0.94276
4 X	0.39	Q 10	0.000032	GERD UG11 Q 0.97092

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.24	-265.74

Tabela 3.9: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar

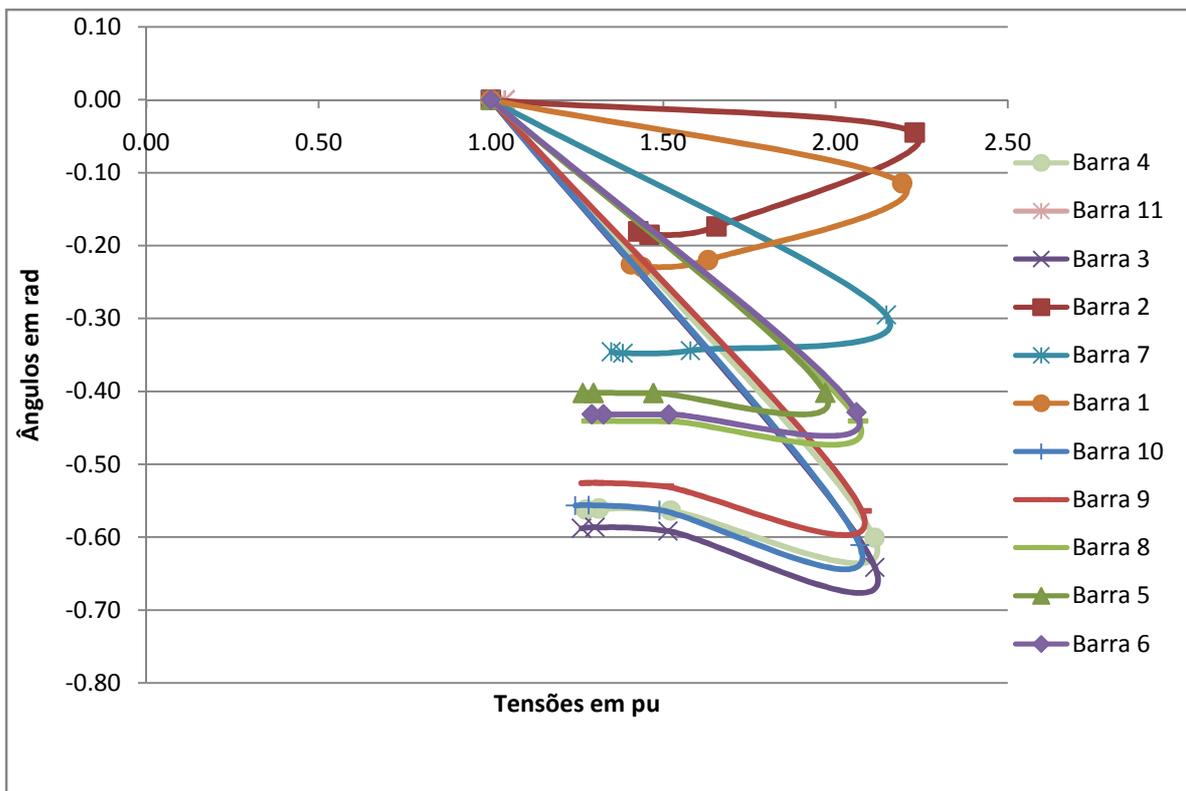


Figura 3.7: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.

- **Formulação em coordenadas retangulares com controle de passo – $Q_8=122$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000
1 X	206.54	P	11	0.000365	GERD	UG11	Q	0.49921
2 X	32.05	Q	10	0.000242	GERD	UG11	Q	0.93636
3 X	5.53	Q	10	0.000103	GERD	UG11	Q	0.91959
4 X	0.27	Q	10	0.000020	GERD	UG11	Q	0.97621

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.26	-265.13

Tabela 3.10: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar

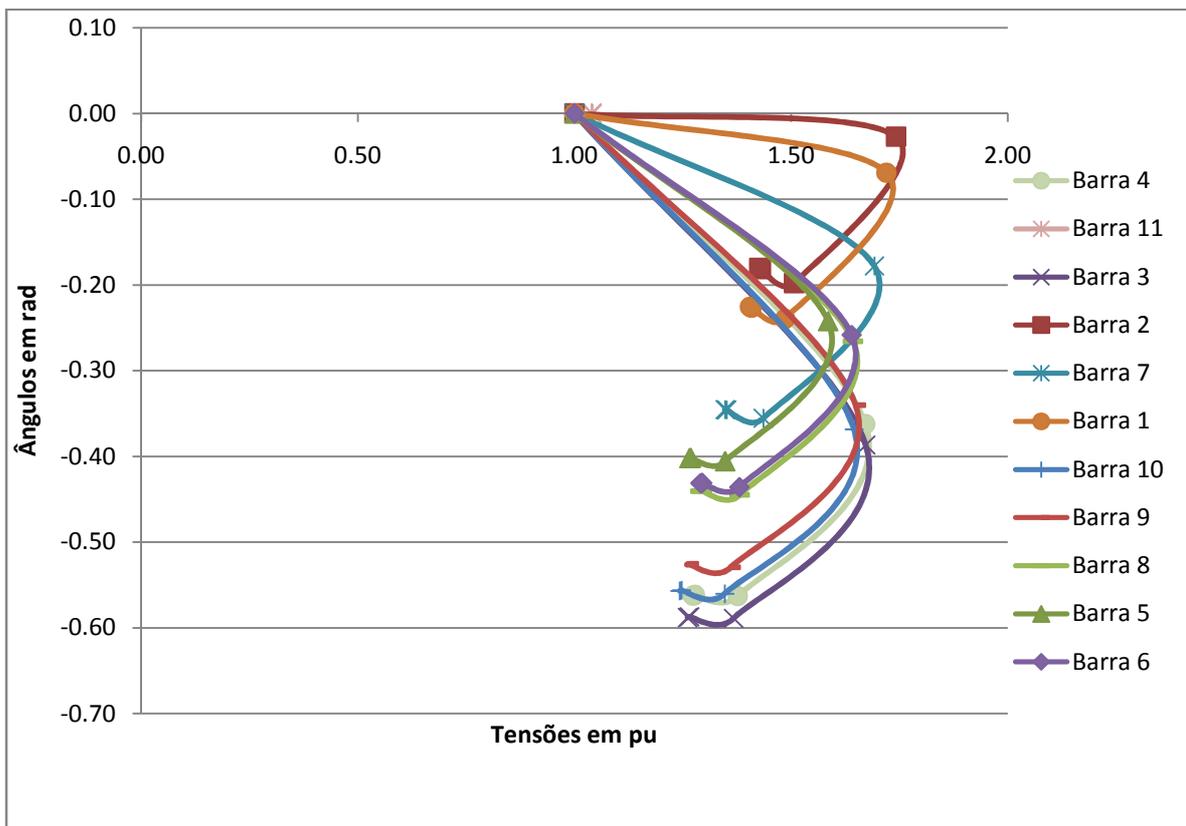


Figura 3.8: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 122$ Mvar.

Os resultados mostram que o sistema é divergente para o caso polar sem passo e convergente para os casos nas coordenadas polar com passo, retangular e retangular com passo. O número de iterações se das simulações estão de acordo com os estudos anteriores: 4 iterações. Os valores de alpha também estão de acordo com o esperado.

	Valores de Alpha encontrados		
Iteração	Iwamoto [2]	Fluxo Modificado - Retangular	Fluxo Modificado - Polar
1	0.582727	0.49921	0.56188
2	1.041641	0.93636	0.99001
3	1.062748	0.91959	0.99667
4	1.005469	0.97621	-

Tabela 3.11: Comparação entre os valores do controle de passo obtidos em [2] e os valores obtidos neste trabalho. $Q_8=122$ Mvar.

Cabe ressaltar aqui o desempenho da simulação feita em coordenadas retangulares sem controle de passo, tanto pelo simples falto de convergir como pelo número de iterações, que se equipara aos casos simulados com controle de passo.

III.2.3 Potência Reativa na Barra 8 - $Q_8 = 120$ Mvar

Para esse carregamento na barra de número 8, o sistema deve convergir e a barra de referência deve fornecer potência reativa.

- **Formulação em coordenadas polares sem controle de passo – $Q_8=120$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]
	ERRO MW/MVAR	T BARRA	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000
1 X	1862.00	P	2	0.000727	GERD	UG11	Q	0.56316
2 X	7742.05	P	2	0.001195	GERD	UG11	Q	0.61022
3 X	23168.11	P	2	0.001475	GERD	UG11	Q	0.67741
4 X	1285.42	P	2	0.003421	GERD	UG11	Q	0.94581
5 X	254.45	P	2	0.000408	GERD	UG11	Q	0.98423
6 X	28.03	Q	7	0.000121	GERD	UG11	Q	0.99537
7 X	13.52	P	1	0.000058	GERD	UG11	Q	0.98178
8 X	0.92	P	2	0.000014	GERD	UG11	Q	1.00049

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	424.54	-213.27

Tabela 3.12: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar

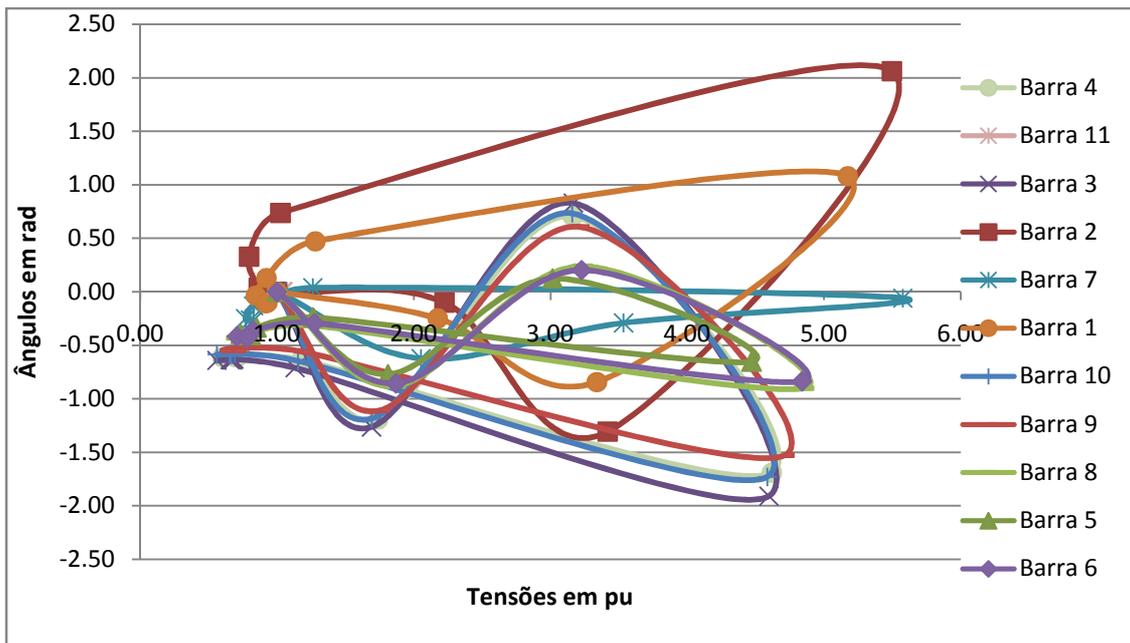


Figura 3.9: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.

Neste gráfico, pode-se perceber que a convergência ocorreu para valores de tensão um pouco abaixo de 1.0 pu

- **Formulação em coordenadas polares com controle de passo – $Q_8=120$ MVar**

[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	
NO.	ITR	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.
0	X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000
1	X	273.17	P	2	0.000676	GERD	UG11	Q	0.56034
2	X	33.03	P	2	0.000148	GERD	UG11	Q	0.98915
3	X	0.77	P	11	0.000045	GERD	UG11	Q	0.99656

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.24	-263.73

Tabela 3.13: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar

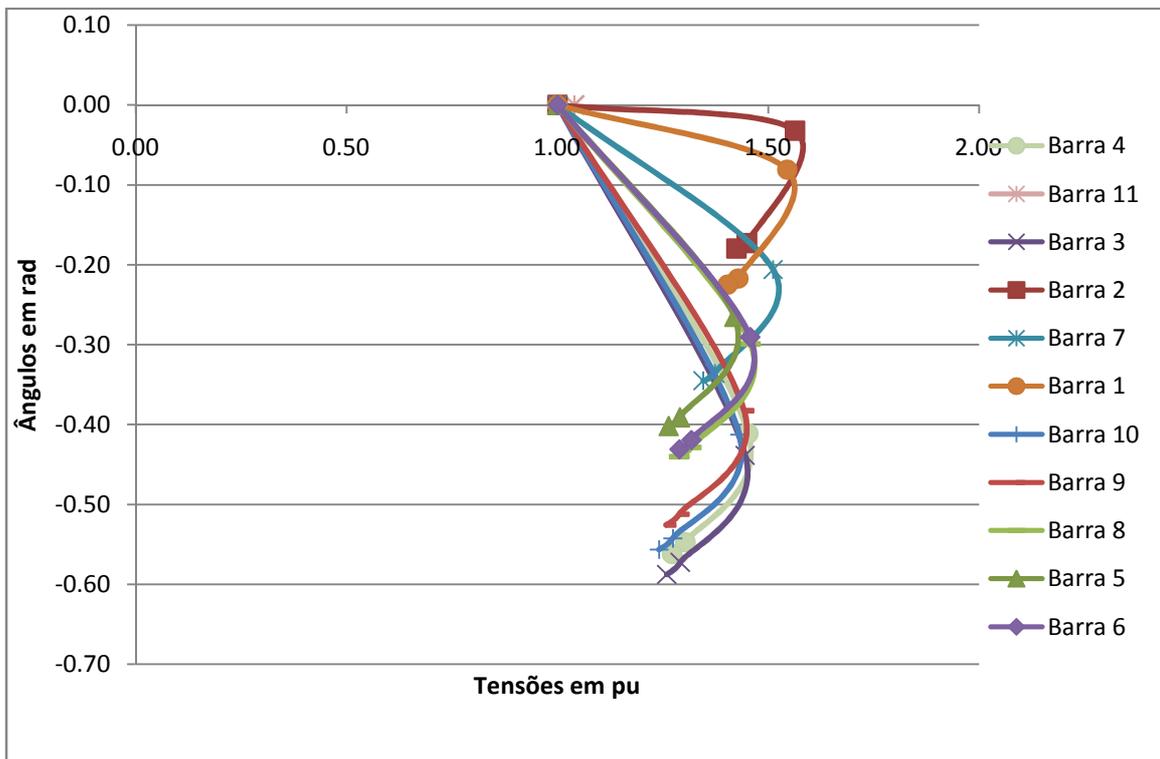


Figura 3.10: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.

O gráfico acima mostra um resultado interessante, se comparado com o caso sem controle de passo. Pode-se notar que a convergência ocorreu para valores de tensão próximos a 1.4 pu, enquanto a convergência da formulação polar sem controle de passo ocorreu para valores inferiores a 1.0 pu.

- **Formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo – $Q_8=120$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000
1 X	620.66	P	2	0.000730	GERD	UG11	Q	0.50031
2 X	89.71	P	2	0.000517	GERD	UG11	Q	0.88046
3 X	7.75	Q	10	0.000181	GERD	UG11	Q	0.94271
4 X	0.40	Q	10	0.000033	GERD	UG11	Q	0.97028

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.25	-263.05

Tabela 3.14: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.

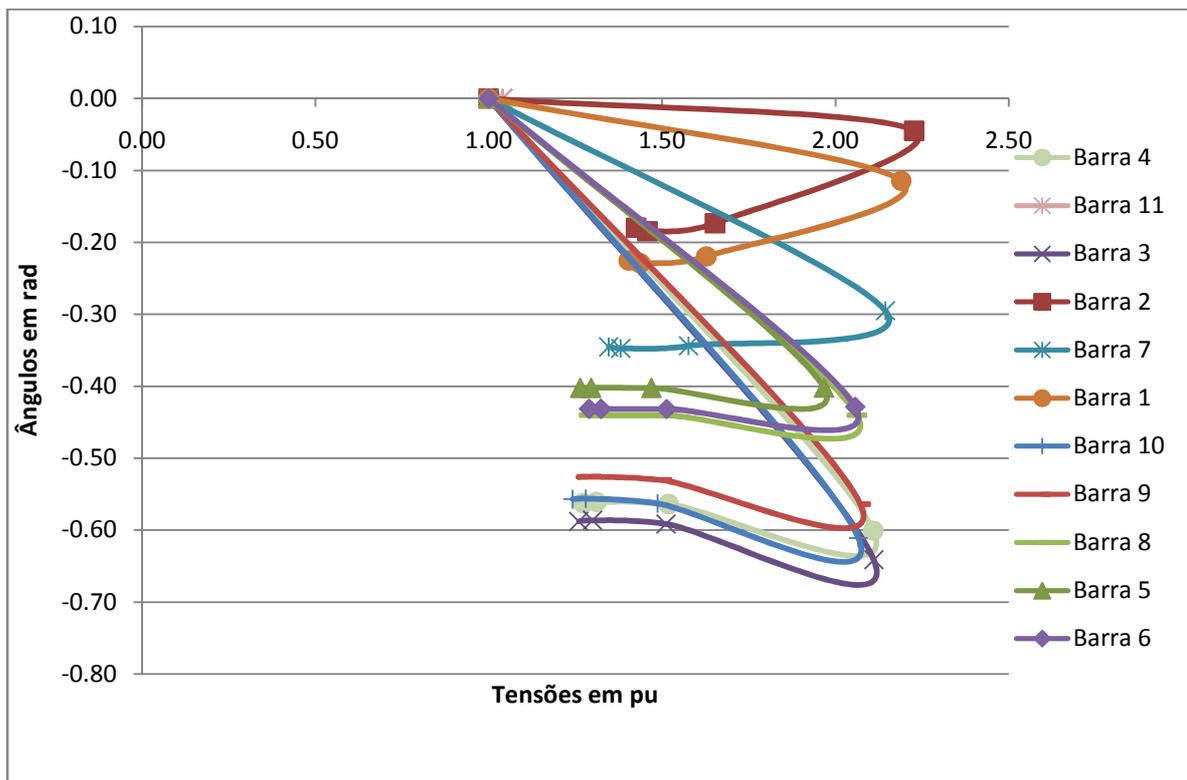


Figura 3.11: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.

- **Formulação em coordenadas retangulares com controle de passo – $Q_8=120$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000
1 X	206.12	P	11	0.000366	GERD	UG11	Q	0.50021
2 X	32.15	Q	10	0.000241	GERD	UG11	Q	0.93546
3 X	5.61	Q	10	0.000104	GERD	UG11	Q	0.91862
4 X	0.29	Q	10	0.000020	GERD	UG11	Q	0.97546

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.26	-262.45

Tabela 3.15: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar

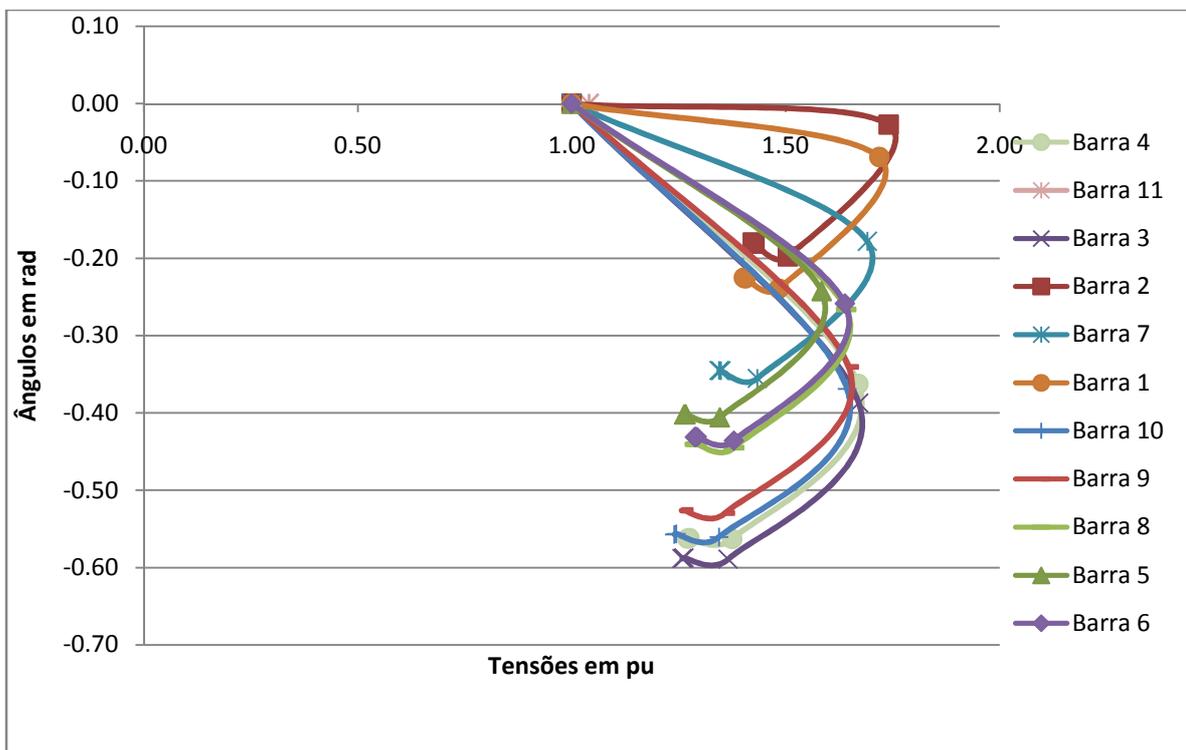


Figura 3.12: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_8 = 120$ Mvar.

Como era de se esperar, a barra swing está fornecendo potência reativa. O número de iterações para a simulação com controle de passo ocorreu de acordo com os estudos anteriores, ou seja, em 4 iterações. Os valores de alpha também estão de acordo com essas simulações. No caso sem controle de passo a convergência se deu em 8 iterações contra 9 dos estudos anteriores (coordenadas polares) [2].

Na simulação em coordenadas polares sem controle de passo o algoritmo encontrou um ponto de solução diferente dos demais, sendo os valores das tensões nas barras mais baixos, próximos de 1.0 pu enquanto os valores das demais simulações estiveram mais próximos de 1.5 pu.

	Valores de Alpha encontrados		
Iteração	Iwamoto [2]	Fluxo Modificado - Retangular	Fluxo Modificado - Polar
1	0.583260	0.50021	0.56034
2	1.041437	0.93546	0.98915
3	1.063727	0.91862	0.99656
4	1.005691	0.97546	-

Tabela 3.16: Comparação entre os valores do controle de passo obtidos em [2] e os valores obtidos neste trabalho. $Q_8=120$ Mvar.

III.2.4 Potência Reativa na Barra 8 - $Q_8 = 101$ Mvar

Este caso deve ser divergente para a simulação sem controle de passo e convergente para as simulações com MO.

- **Formulação em coordenadas polares sem controle de passo – $Q_8=101$ MVar**

[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	
NO. ITR	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000	
1 X	1785.46	P	2	0.001155	GERD	UG11	Q	0.57191	
2 X	8344.26	P	2	0.001254	GERD	UG11	Q	0.58041	
3 X	321008.64	Q	7	0.006171	GERD	UG11	Q	0.15756	
4 X	80974.84	Q	8	0.007730	GERD	UG11	P	0.93156	
5 X	20310.56	Q	8	0.007892	GERD	UG11	P	0.90099	
6 X	5071.53	Q	8	0.004226	GERD	UG11	Q	0.89980	
7 X	1241.80	Q	8	0.001155	GERD	UG11	Q	0.89937	
8 X	463.91	P	10	0.000555	GERD	UG11	Q	0.89746	
9 X	209.41	P	10	0.000250	GERD	UG11	Q	0.89771	
10 X	1201.69	P	2	0.000081	GERD	UG11	Q	0.41244	
11 X	909.55	P	2	0.000106	GERD	UG11	Q	0.92316	
12 X	295.95	P	2	0.000493	GERD	UG11	Q	0.69687	
13 X	3649.96	Q	7	0.000271	GERD	UG11	Q	0.20866	
14 X	923.54	P	2	0.000053	GERD	UG11	P	0.95719	
15 X	493.10	P	2	0.000045	GERD	UG11	Q	0.88860	
16 X	2386.28	P	10	0.000725	GERD	UG11	Q	0.33142	
17 X	663.36	Q	7	0.000908	GERD	UG11	Q	0.63770	
18 X	283763.09	Q	1	0.000636	GERD	UG11	Q	0.01511	
19 X	71858.07	Q	1	0.000281	GERD	UG11	Q	0.84825	

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	423.49	193.84

Tabela 3.17: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.

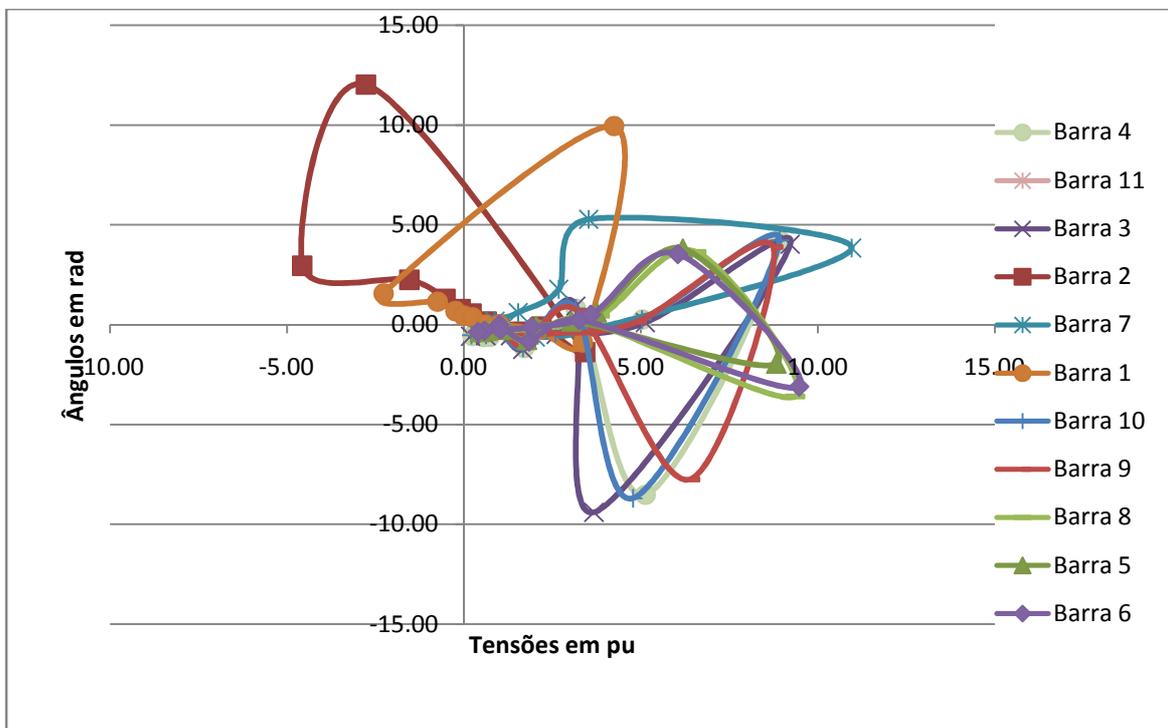


Figura 3.13: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.

- **Formulação em coordenadas polares com controle de passo – $Q_8=101$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETTRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]						
	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.		
0	X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000
1	X	282.71	P	2	0.000660	GERD	UG11	Q	0.57191
2	X	34.72	P	2	0.000171	GERD	UG11	Q	0.98835
3	X	0.98	P	11	0.000051	GERD	UG11	Q	0.99577

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.29	-237.37

Tabela 3.18: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.

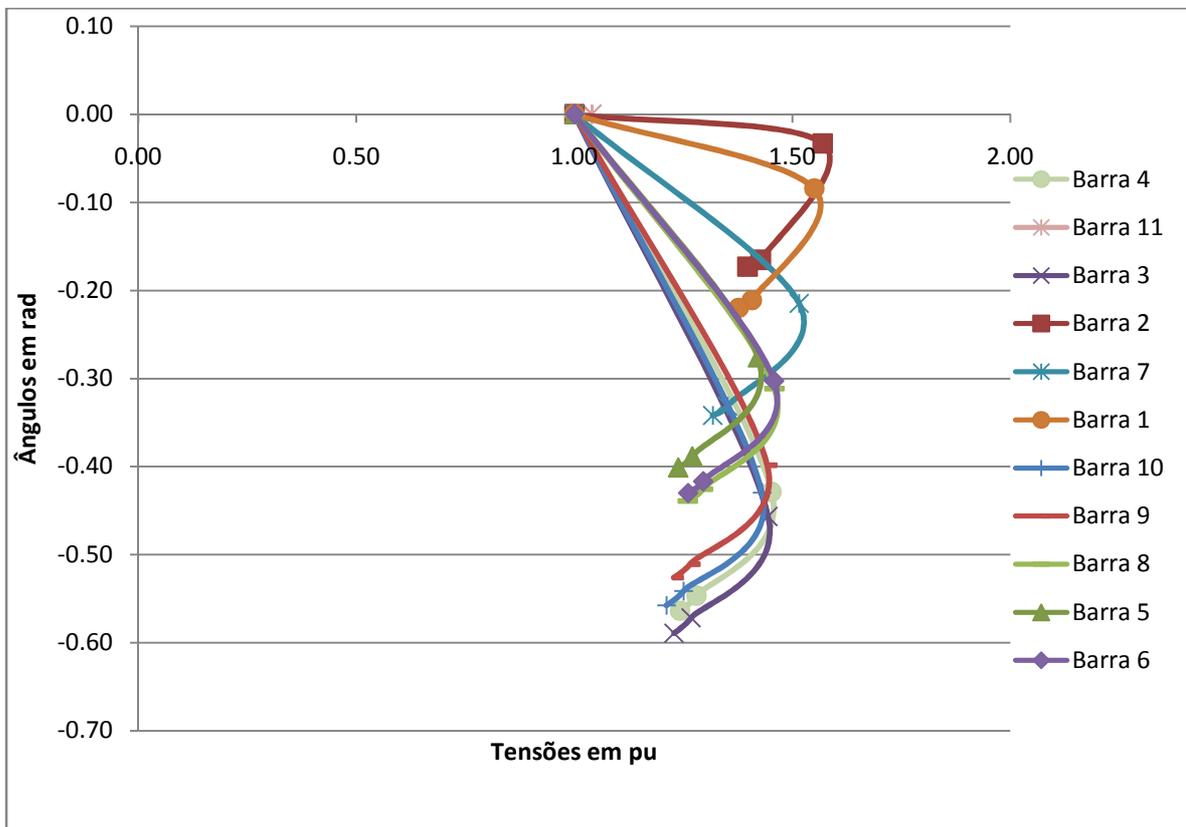


Figura 3.14: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.

- **Formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo – $Q_8=101$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	
0	X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000
1	X	602.72	P	2	0.000725	GERD	UG11	Q	0.50998
2	X	86.29	P	2	0.000508	GERD	UG11	Q	0.88098
3	X	8.12	Q	10	0.000181	GERD	UG11	Q	0.94208
4	X	0.49	Q	10	0.000036	GERD	UG11	Q	0.96275

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.30	-236.24

Tabela 3.19: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.

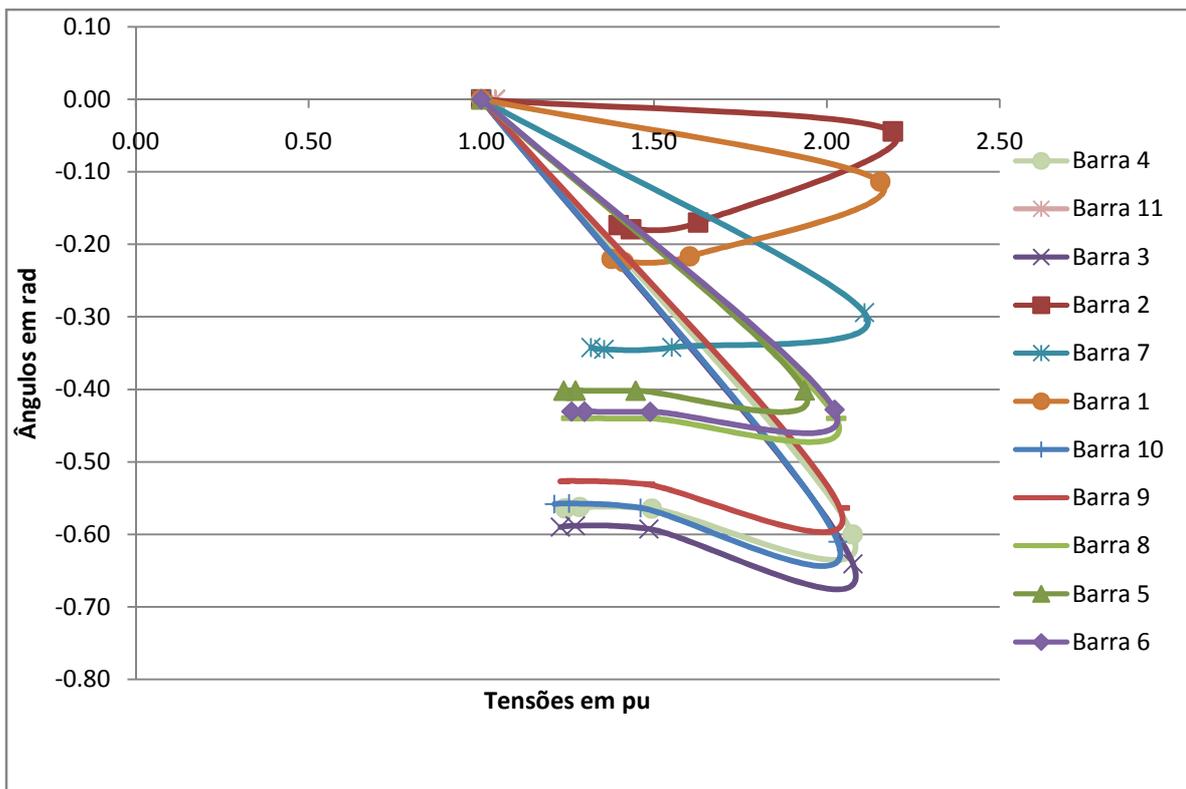


Figura 3.15: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. $Q_8 = 101$ Mvar.

- **Formulação em coordenadas retangulares com controle de passo – $Q_g=101$ MVar**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.
0 X	500.00	P	2	0.000000	GERD	UG11	P	1.00000
1 X	202.12	P	11	0.000370	GERD	UG11	Q	0.50998
2 X	33.19	Q	10	0.000231	GERD	UG11	Q	0.92634
3 X	6.51	Q	10	0.000111	GERD	UG11	Q	0.90856
4 X	0.45	Q	10	0.000026	GERD	UG11	Q	0.96670

BARRA	Tensão Mód (P.U.)	Tensão Ang (gra)	Geração MW	Geração MVar
11	1.04	0.0	413.31	-235.82

Tabela 3.20: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_g = 101$ Mvar.

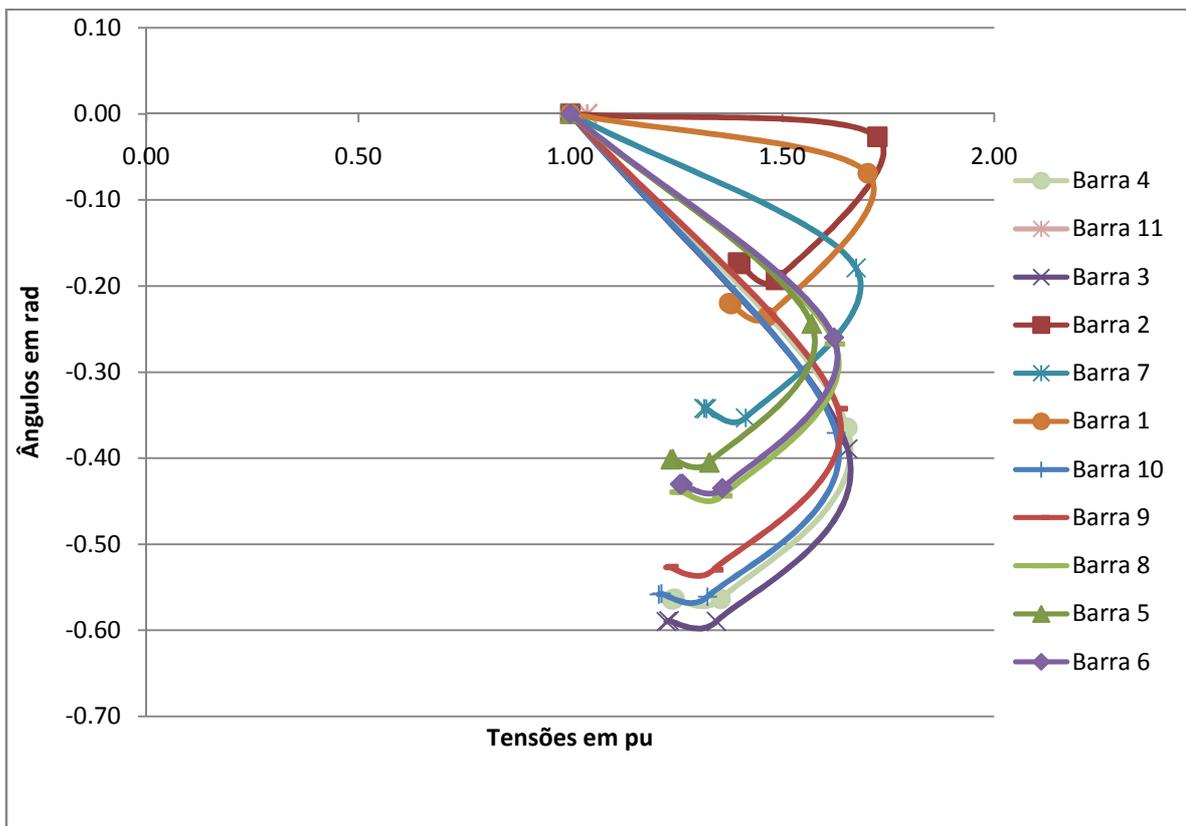


Figura 3.16: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. $Q_g = 101$ Mvar.

Os resultados mostram que a simulação sem o controle de passo (polar) não conseguiu convergir, enquanto os casos com controle de passo convergiram. O método base de comparação, em coordenadas retangulares convergiu como esperado, em 4 iterações e os valores de alpha estão de acordo com o esperado. Cabe ressaltar novamente o desempenho do caso de coordenadas retangulares sem controle de passo, que convergiu em 4 iterações, assim como o caso com controle de passo.

	Valores de Alpha encontrados		
Iteração	Iwamoto [2]	Fluxo Modificado - Retangular	Fluxo Modificado - Polar
1	0.588394	0.50998	0.57191
2	1.038946	0.92634	0.98835
3	1.074549	0.90856	0.99577
4	1.008595	0.96670	-

Tabela 3.21: Comparação entre os valores do controle de passo obtidos em [2] e os valores obtidos neste trabalho. $Q_3=101$ Mvar.

III.3 Sistema IEEE de 14 barras

Os resultados do sistema IEEE de 14 barras têm o objetivo de comparar o desempenho do sistema de coordenadas polares e retangulares com e sem controle de passo. Além do relatório de mismatches de potência para cada iteração, também é apresentado um relatório de barras, com as tensões e ângulos em cada barra, assim como as potências geradas ou consumidas.

Nos casos que apresentam resultado divergente, os relatórios de barras foram omitidos pois o programa utilizado retorna os valores do caso base. O gráfico com as trajetórias das tensões e potências nos permite melhor visualizar as diferenças entre os casos.

Dados do sistema	Quantidade
Barras	14
Circuitos	20
Barras PV	4
Transformadores	3
Carga Ativa (MW)	277.8 MW
Carga Reativa (MVar)	103.8 MVar

Tabela 3.22: Características do sistema IEEE 14 barras – caso base

III.3 .1 Caso Base

As simulações no caso base foram feitas sem nenhuma modificação sobre as cargas do sistema. Apenas foi rodado o fluxo de potência nas formulações polar e retangular, com e sem controle de passo.

- **Formulação em coordenadas polares sem controle de passo. Carga nominal.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA		ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	255.89	P	1		0.000000	GERD	UG8	Q	1.00000	9.0825E+00
1 X	19.02	Q	2		0.000033	GERD	UG2	Q	1.00000	9.2307E-02
2 X	0.18	Q	5		0.000033	GERD	UG2	Q	1.00000	5.2234E-06

Tabela 3.23: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga nominal.

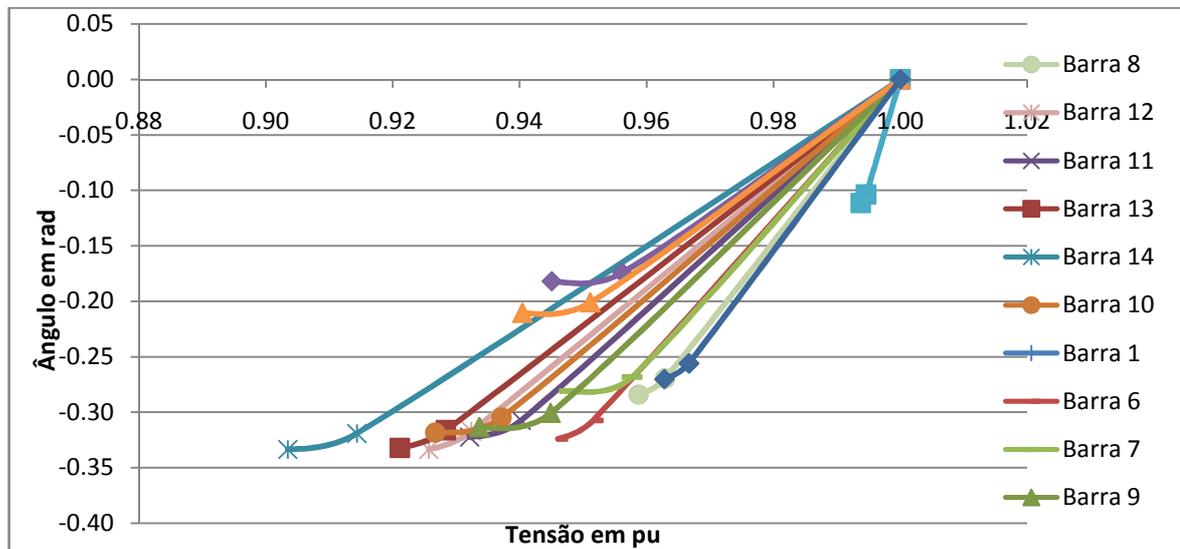


Figura 3.17: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga nominal.

- **Formulação em coordenadas polares com controle de passo. Carga nominal.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR T BARRA	ERRO P.U. TIPO NOME ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	255.89 P 1	0.000000 GERD UG8 Q	1.00000	9.0825E+00
1 X	19.10 Q 2	0.000033 GERD UG2 Q	1.00077	9.2669E-02
2 X	0.14 Q 5	0.000033 GERD UG2 Q	1.00275	2.8249E-06

Tabela 3.24: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga nominal.

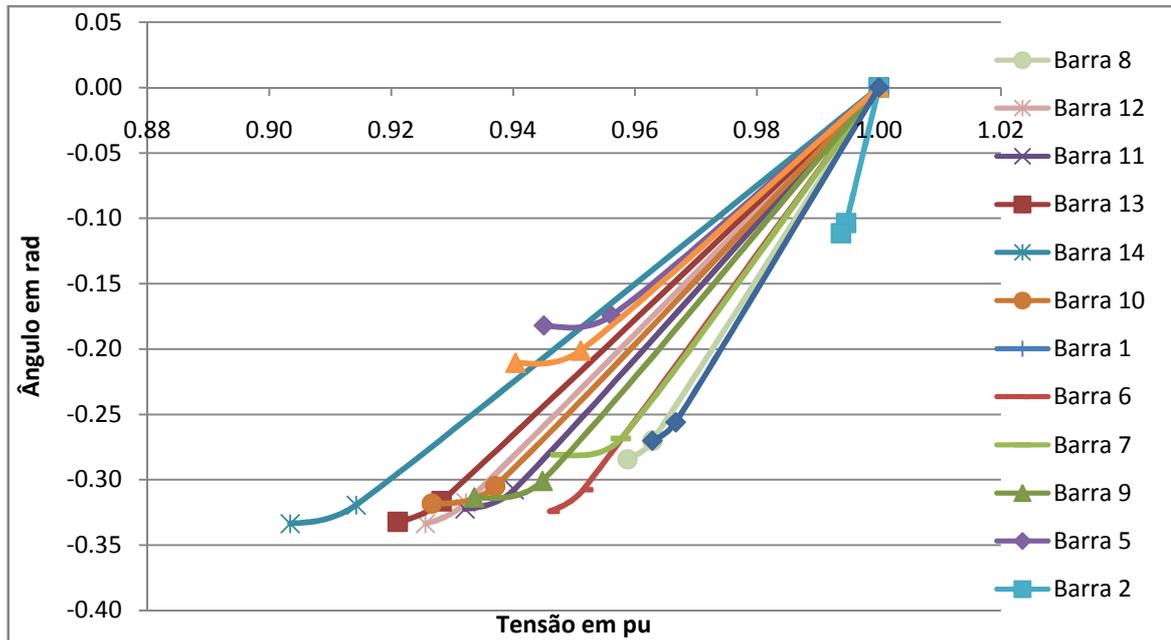


Figura 3.18: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga nominal.

- **Formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo. Carga nominal.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR T BARRA	ERRO P.U. TIPO NOME ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	255.89 P 1	0.000000 GERD UG8 Q	1.00000	9.0825E+00
1	24.12 Q 3 X	0.954197 GERD UG6 Q	1.00000	2.0031E+00
2	0.68 Q 3 X	0.007086 GERD UG6 Q	1.00000	2.3833E-04

Tabela 3.25: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga nominal.

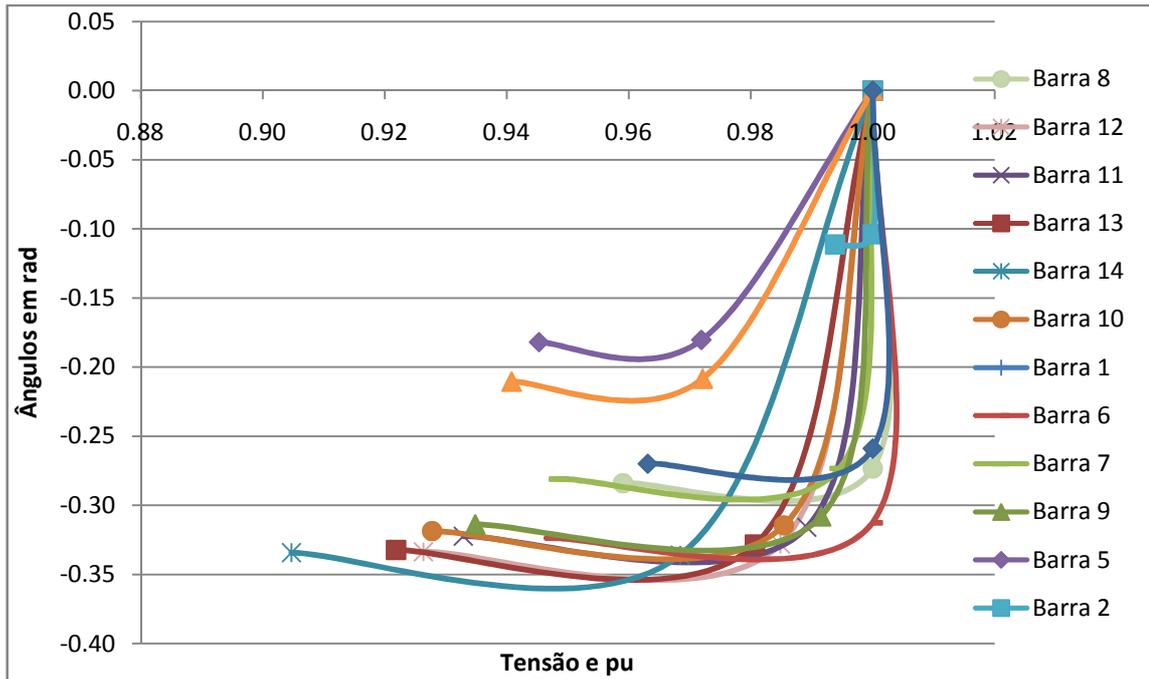


Figura 3.19: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga nominal.

- **Formulação em coordenadas retangulares com controle de passo. Carga nominal.**

NO.		[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]
ITR	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.		
0	X	255.89	P	1	0.000000	GERD	UG8	Q	1.00000	9.0825E+00	
1		21.72	Q	3	X	0.910704	GERD	UG6	Q	0.97643	1.8288E+00
2		0.70	Q	3	X	0.009452	GERD	UG6	Q	1.00189	3.1804E-04

Tabela 3.26: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga nominal.

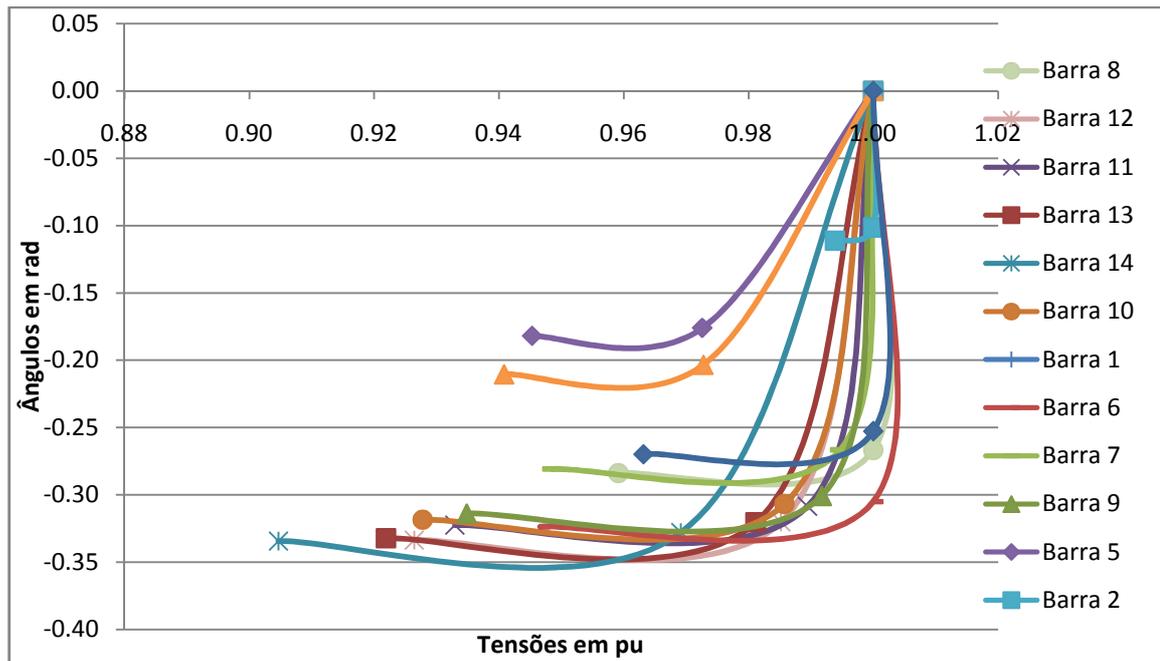


Figura 3.20: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga nominal.

Podemos notar que no caso sem sobrecarga, o controle de passo pouco influenciou na trajetória das tensões e potências ou no número de iterações. As respostas com e sem passo são aproximadamente as mesmas, entretanto existe uma interessante diferença na trajetória das simulações nas formulações polar e retangular.

III.3.2 Limiar da convergência

Ao sistema estudado foi aplicada uma função rampa que age sobre as cargas ativas e reativas do sistema, aumentando o seu valor até que o calculo do fluxo de potência chegue ao limite da convergência. Os resultados são mostrados a seguir:

- **Formulação em coordenadas polares sem controle de passo. Carga = 226,30% (convergente).**

MISMATCHS: REDE ELETRICA				MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS				ALPHA	FOBJ
NO. ITR	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	1379.52	P	1	0.000000	GERD	UG8	Q	1.00000	3.5195E+02
1 X	218.17	Q	2	0.000912	GERD	UG2	Q	1.00026	1.2133E+01
2 X	30.30	Q	5	0.000538	GERD	UG2	Q	1.02819	2.5178E-01
3 X	6.60	Q	5	0.000198	GERD	UG2	Q	1.06475	1.5381E-02
4 X	1.86	P	6	0.000105	GERD	UG2	Q	1.01111	1.3104E-03
5 X	0.97	P	6	0.000074	GERD	UG2	Q	0.86892	3.0263E-04

RELATORIO DE BARRAS:

No. Barra	Nome de Barra	Tensao		Geracao		Carga		Outros	
		Modulo	Angulo	[MW]	[MVAR]	[MW]	[MVAR]	[MW]	[MVAR]
1	barra1	1.0000	0.00	1381.23	253.90				
2	barra2	1.0000	-38.88	40.00	1062.51	70.81	41.44		
3	barra3	1.0000	-83.08	0.00	472.35	307.37	62.00		
4	barra4	0.6776	-70.79			155.97	12.73		
5	barra5	0.6482	-61.34			24.80	5.22		
6	barra6	1.0000	-113.15	0.00	468.46	97.89	97.89		
7	barra7	0.7631	-94.35						
8	barra8	1.0000	-94.35	-0.00	134.48				
9	barra9	0.6980	-106.42			96.26	54.17	-0.00	-9.26
10	barra10	0.7160	-109.66			29.37	18.93		
11	barra11	0.8415	-112.13			11.42	5.87		
12	barra12	0.9206	-116.49			19.90	5.22		
13	barra13	0.8811	-116.18			44.05	18.93		
14	barra14	0.6817	-117.91			48.62	16.32		

TOTAIS DO SISTEMA:

Geracao Total		Carga Total		Outros Total	
[MW]	[MVAR]	[MW]	[MVAR]	[MW]	[MVAR]
1421.2	2391.7	906.5	338.7	-0.0	-9.3

Tabela 3.27: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo e relatório de barras. Carga = 226,30%.

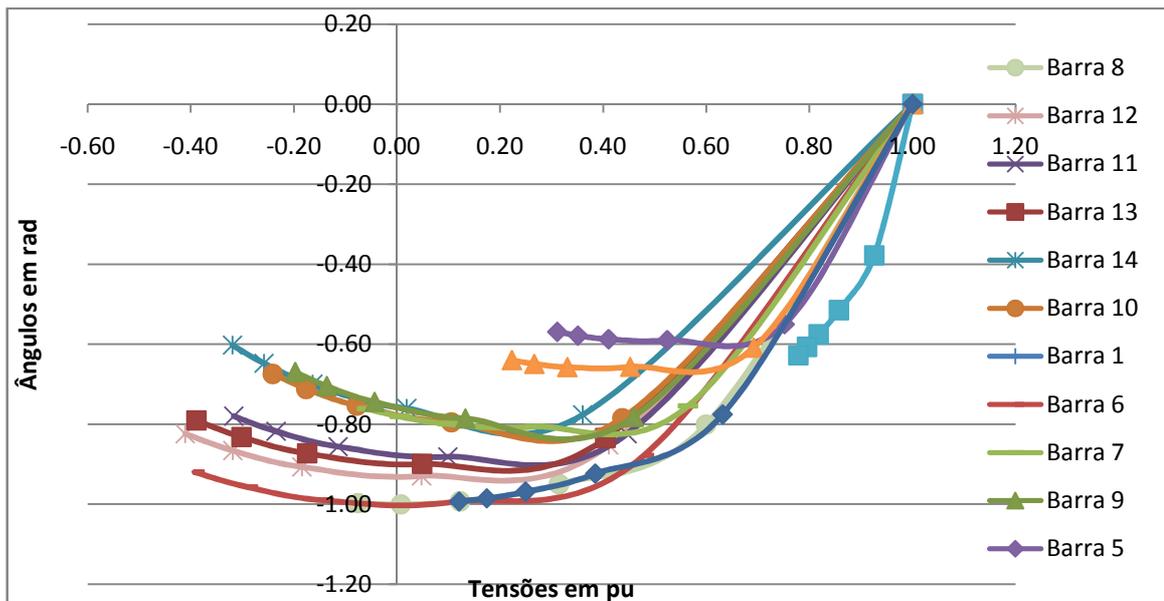


Figura 3.21: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,30%.

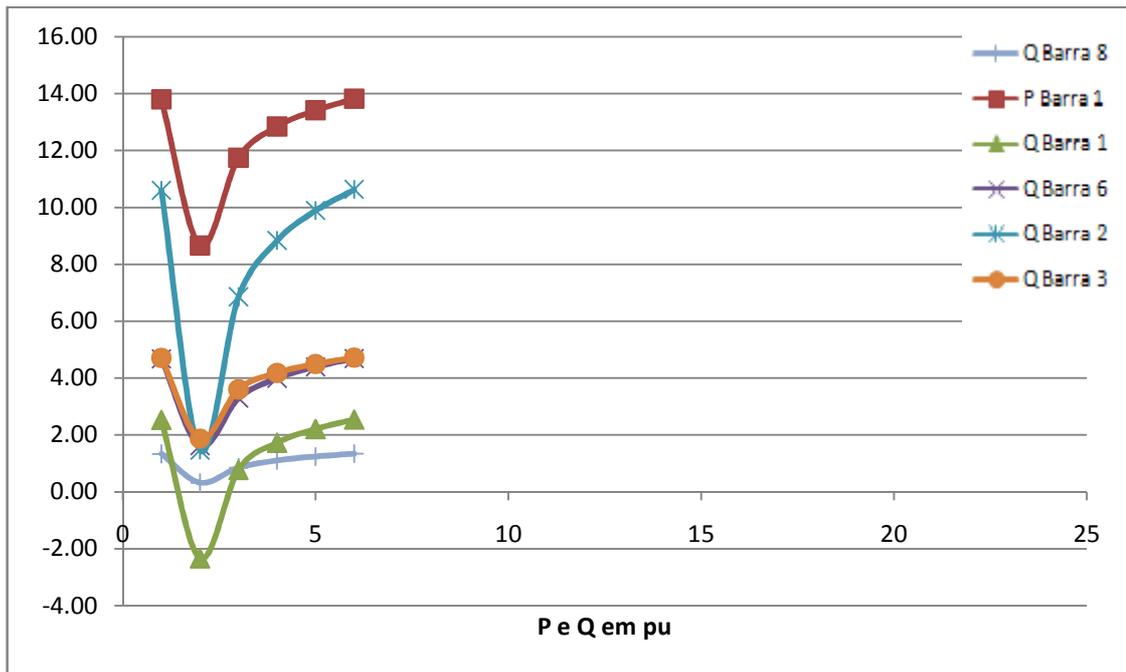


Figura 3.22: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,30%.

- **Formulação em coordenadas polares sem controle de passo. Carga = 226,35% (divergente).**

[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]
NO.	ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.
0	X	1381.23	P 1	0.000000	GERD	UG8	Q	1.00000	3.5326E+02
1	X	218.24	Q 2	0.000915	GERD	UG2	Q	1.00026	1.2140E+01
2	X	30.32	Q 5	0.000538	GERD	UG2	Q	1.02819	2.5219E-01
3	X	6.62	Q 5	0.000198	GERD	UG2	Q	1.06464	1.5466E-02
4	X	1.88	P 6	0.000106	GERD	UG2	Q	1.00999	1.3385E-03
5	X	1.02	P 6	0.000076	GERD	UG2	Q	0.85776	3.3278E-04
6	X	312.18	P 1	0.001563	GERD	UG2	Q	0.00320	2.8338E+01
7	X	32711.50	Q 1	0.042407	GERD	UG2	Q	0.07076	2.2419E+05
8	X	34959.76	Q 4	0.015927	GERD	UG1	Q	0.59670	2.0201E+05
9	X	1097998.03	Q 12	0.028971	GERD	UG6	Q	0.07403	1.8882E+08

Tabela 3.28: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,35%.

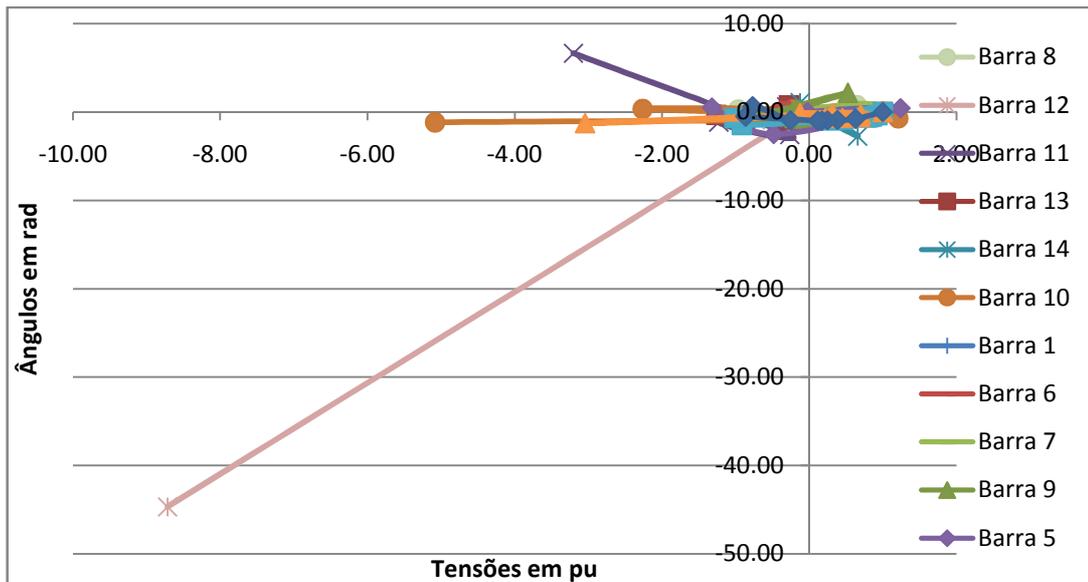


Figura 3.23: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,35%.

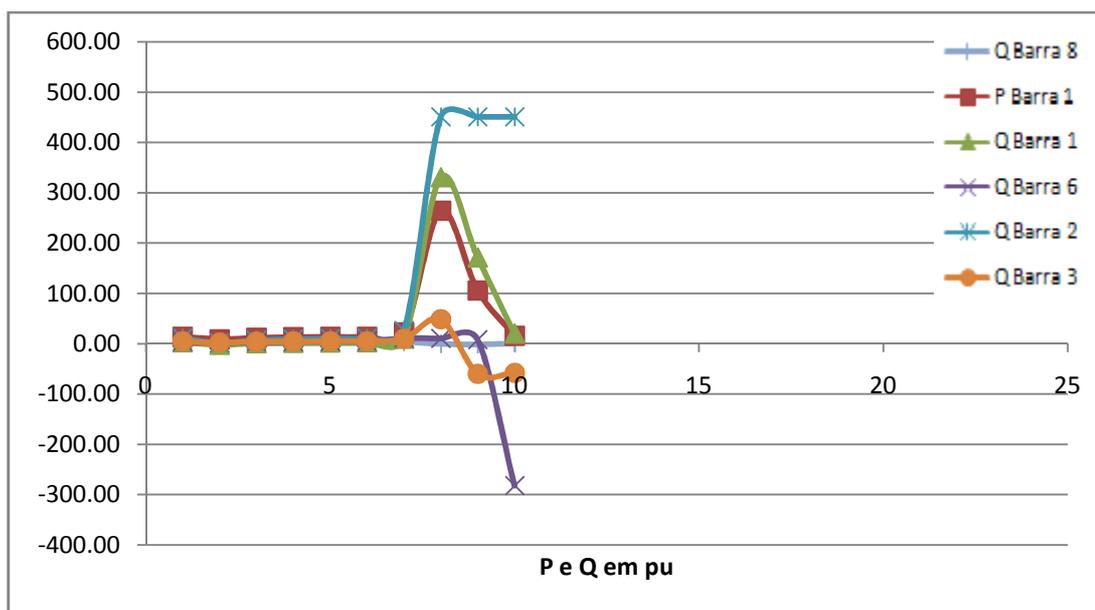


Figura 3.24: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 226,35%.

- **Formulação em coordenadas polares com controle de passo. Carga = 226,30% (convergente).**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]				
	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	1378.44	P 1	0.000000	GERD	UG8	Q	1.00000	3.5107E+02
1 X	218.56	Q 2	0.000911	GERD	UG2	Q	1.00026	1.2161E+01
2 X	28.05	Q 5	0.000579	GERD	UG2	Q	1.02814	2.0515E-01
3 X	5.17	Q 5	0.000162	GERD	UG2	Q	1.06638	1.0974E-02
4 X	1.68	P 6	0.000098	GERD	UG2	Q	0.99315	1.0108E-03
5 X	0.96	P 6	0.000078	GERD	UG2	Q	0.82570	3.0452E-04

RELATORIO DE BARRAS:									
No. Barra	Nome de Barra	Tensao Modulo	Angulo	Geracao [MW]	[MVAR]	Carga [MW]	[MVAR]	Outros [MW]	[MVAR]
1	barral	1.0000	0.00	1379.61	252.55				
2	barra2	1.0000	-38.82	40.00	1059.50	70.81	41.44		
3	barra3	1.0000	-82.95	0.00	471.45	307.37	62.00		
4	barra4	0.6786	-70.66			155.97	12.73		
5	barra5	0.6493	-61.24			24.80	5.22		
6	barra6	1.0000	-112.89	0.00	467.27	97.89	97.89		
7	barra7	0.7639	-94.16						
8	barra8	1.0000	-94.16	-0.00	134.07				
9	barra9	0.6988	-106.20			96.26	54.17	-0.00	-9.28
10	barra10	0.7167	-109.42			29.37	18.93		
11	barra11	0.8418	-111.88			11.42	5.87		
12	barra12	0.9207	-116.24			19.90	5.22		
13	barra13	0.8812	-115.93			44.05	18.93		
14	barra14	0.6823	-117.66			48.62	16.32		

TOTAIS DO SISTEMA:					
Geracao Total [MW]	[MVAR]	Carga Total [MW]	[MVAR]	Outros Total [MW]	[MVAR]
1419.6	2384.8	906.5	338.7	-0.0	-9.3

Tabela 3.29: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo e relatório de barras. Carga = 226,30%.

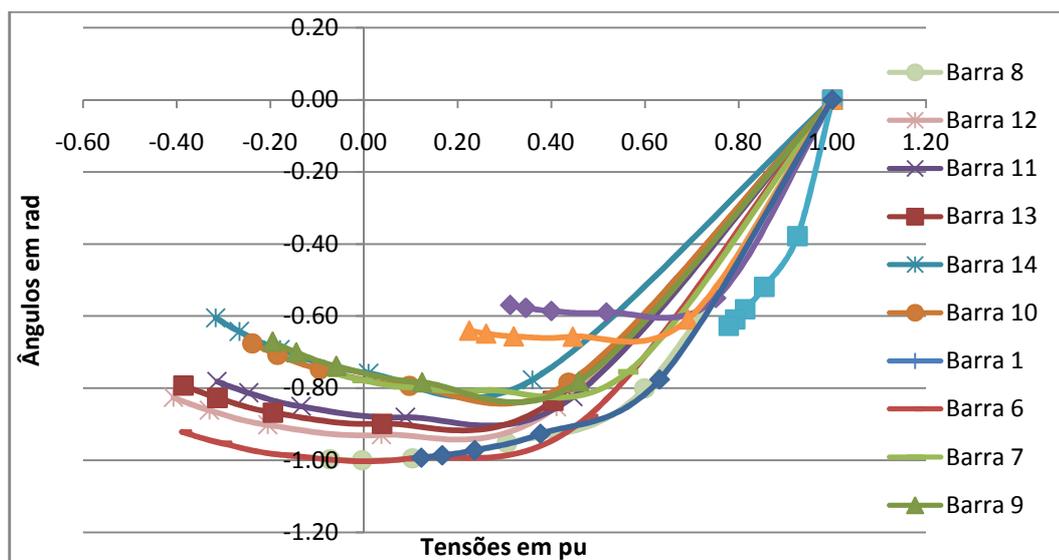


Figura 3.25: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,30%.

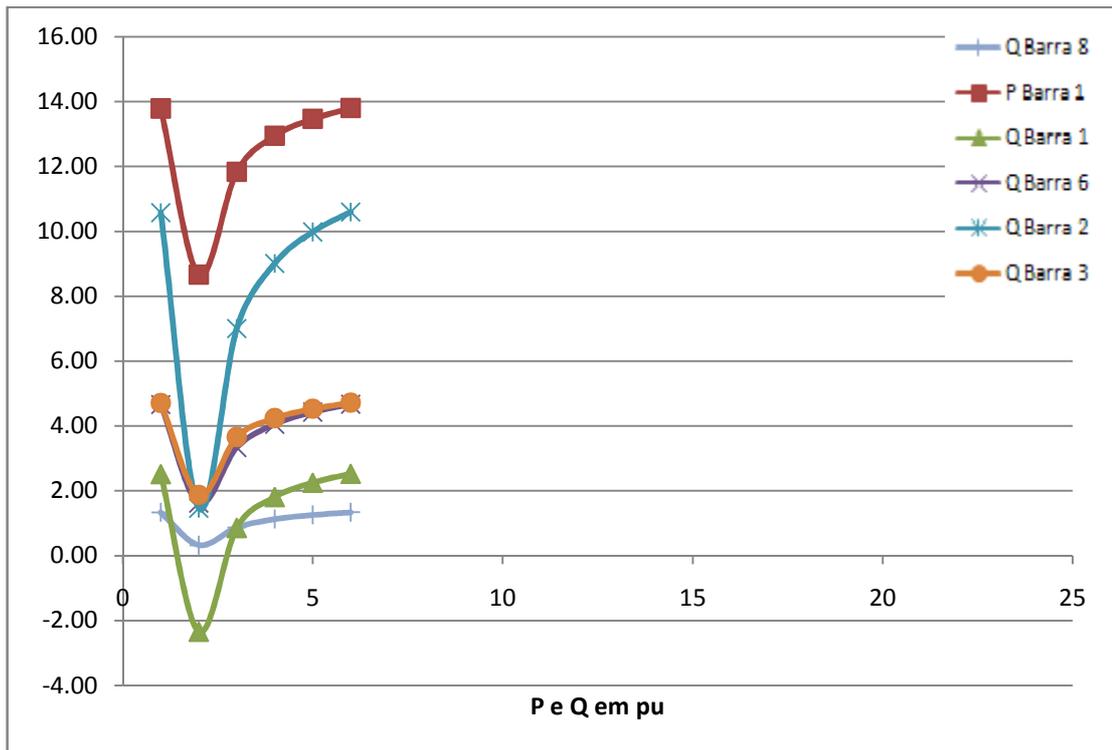


Figura 3.26: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,30%.

A comparação do caso polar com controle de passo e polar sem controle mostra que o uso do multiplicador não foi capaz de aumentar o carregamento máximo suportado pelo sistema.

- **Formulação em coordenadas polares com controle de passo. Carga = 226,35% (divergente).**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.	
0 X	1379.61	P	1	0.000000	GERD	UG8	Q	1.00000	3.5194E+02	
1 X	218.62	Q	2	0.000912	GERD	UG2	Q	1.00026	1.2168E+01	
2 X	28.07	Q	5	0.000580	GERD	UG2	Q	1.02814	2.0552E-01	
3 X	5.19	Q	5	0.000162	GERD	UG2	Q	1.06624	1.1056E-02	
4 X	1.70	P	6	0.000099	GERD	UG2	Q	0.99176	1.0409E-03	
5 X	1.00	P	6	0.000081	GERD	UG2	Q	0.81165	3.3387E-04	
6 X	1.02	P	6	0.000094	GERD	UG2	Q	0.03277	3.4216E-04	
7 X	1.05	P	6	0.000059	GERD	UG2	Q	0.09100	3.6250E-04	
8 X	1.07	P	6	0.000083	GERD	UG2	Q	0.18875	3.7325E-04	
9 X	1.09	P	6	0.000026	GERD	UG2	Q	0.22801	3.8055E-04	

Tabela 3.30: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,35%.

Os valores de alpha muito pequenos (circulados em vermelho) indicam divergência

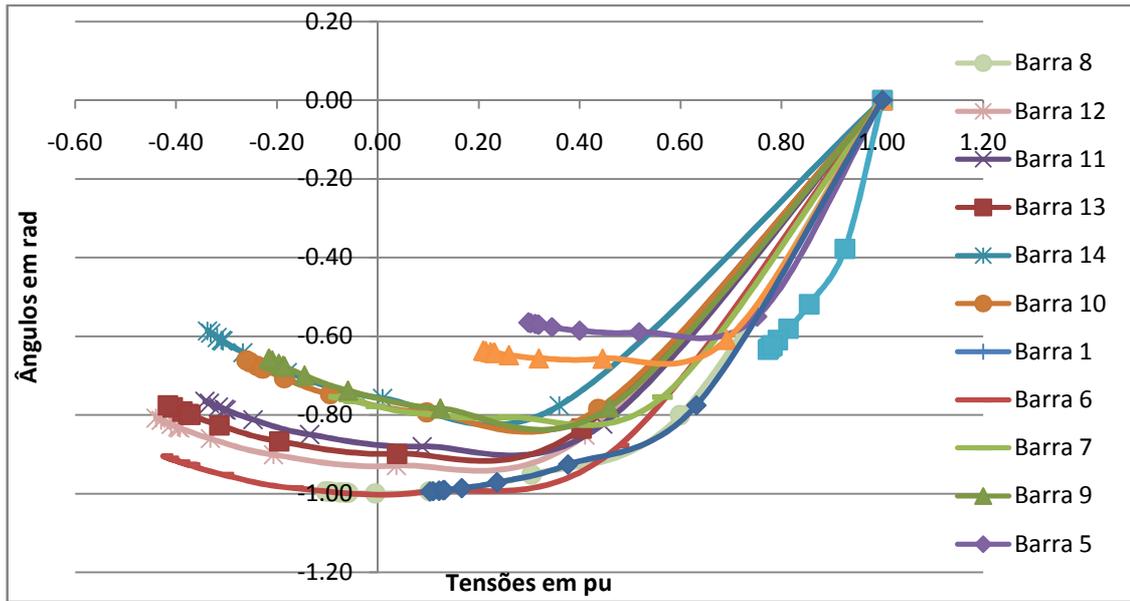


Figura 3.27: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,35%.

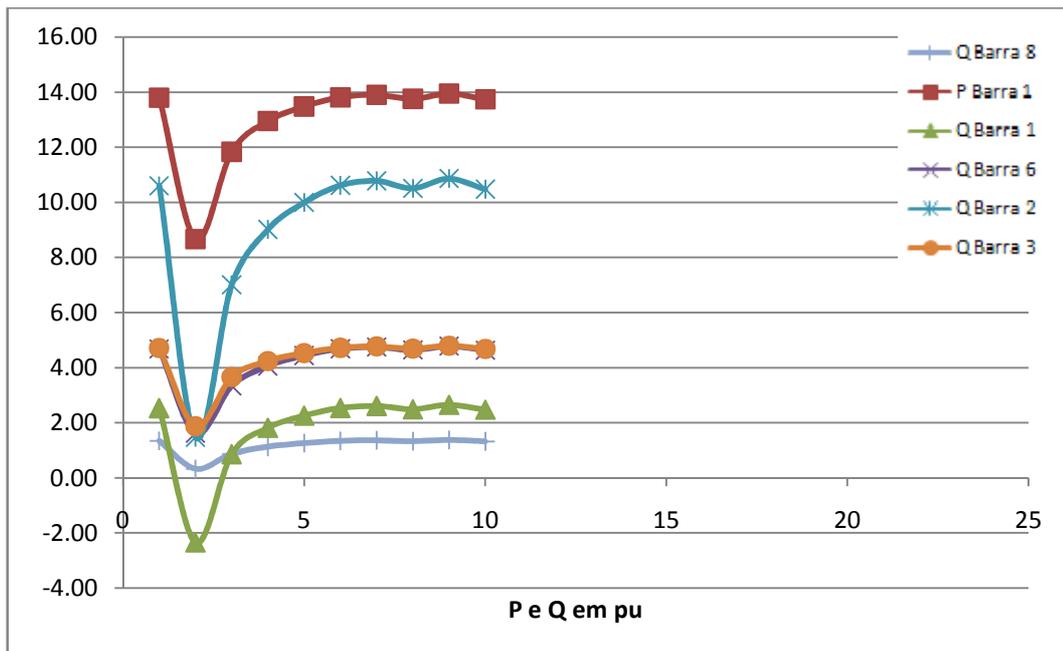


Figura 3.28: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 226,35%.

Os gráficos de potências e tensões indicam que o resultado oscilou em torno da última solução convergente encontrada.

- **Formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo. Carga = 225,40% (convergente).**

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]	
ITR	ERRO	MW/MVAR	T	BARRA	ERRO	P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	

0	X	1370.79	P	1	0.000000		GERD	UG8	Q	1.00000	3.4626E+02
1		268.14	Q	3	X	9.269988	GERD	UG6	Q	0.91882	1.9890E+02
2		108.91	Q	3	X	2.303180	GERD	UG6	Q	1.00023	1.1680E+01
3		36.72	P	6	X	0.895387	GERD	UG6	Q	1.00988	1.5872E+00
4		14.52	Q	6	X	0.367590	GERD	UG6	Q	1.01514	2.3372E-01
5		5.13	Q	6	X	0.124169	GERD	UG6	Q	1.02746	2.4888E-02
6		1.31	Q	6	X	0.034324	GERD	UG6	Q	1.02367	1.8957E-03
7		0.43	Q	6	X	0.011466	GERD	UG6	Q	1.01837	2.1211E-04
8		0.46	Q	6	X	0.012237	GERD	UG6	Q	0.86664	2.4139E-04
9		0.41	Q	6	X	0.010996	GERD	UG6	Q	0.91026	1.9493E-04
10		0.52	Q	6	X	0.013963	GERD	UG6	Q	0.81505	3.1425E-04
11		0.36	Q	6	X	0.009526	GERD	UG6	Q	0.96410	1.4629E-04

RELATORIO DE BARRAS:											

No.	Nome	Tensao		Geracao		Carga		Outros			
Barra	de Id. Barra	Modulo	Angulo	[MW]	[MVAR]	[MW]	[MVAR]	[MW]	[MVAR]		

1	barral	1.0000	0.00	1377.08	252.49						
2	barral2	1.0000	-38.77	40.00	1059.47	70.61	41.33				
3	barral3	1.0001	-82.86	0.00	471.21	306.53	61.83				
4	barral4	0.6780	-70.64			155.54	12.69				
5	barral5	0.6484	-61.20			24.73	5.21				
6	barral6	1.0004	-113.03	0.00	467.84	97.62	97.62				
7	barral7	0.7636	-94.22								
8	barral8	1.0002	-94.21	-0.00	134.33						
9	barral9	0.6987	-106.28			95.99	54.02	0.00	-9.28		
10	barral10	0.7168	-109.53			29.29	18.87				
11	barral11	0.8421	-112.01			11.39	5.86				
12	barral12	0.9213	-116.37			19.85	5.21				
13	barral13	0.8818	-116.06			43.93	18.87				
14	barral14	0.6827	-117.76			48.48	16.27				

TOTAIS DO SISTEMA:											

Geracao Total		Carga Total		Outros Total							
[MW]	[MVAR]	[MW]	[MVAR]	[MW]	[MVAR]						

1417.1	2385.3	904.0	337.8	0.0	-9.3						

Tabela 3.31: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo e relatório de barras. Carga = 225,40%.

Pode-se notar que a formulação polar, tanto com controle de passo como sem controle, suportou um carregamento máximo maior do que o caso retangular.

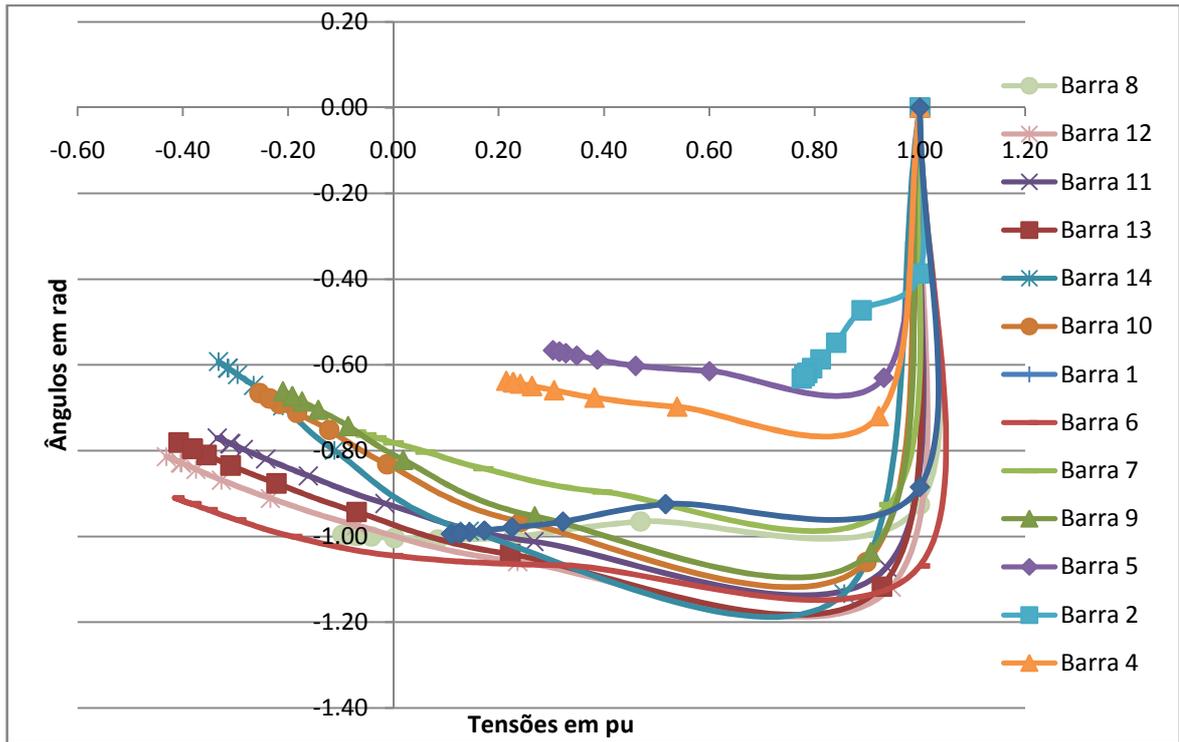


Figura 3.29: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,40%.

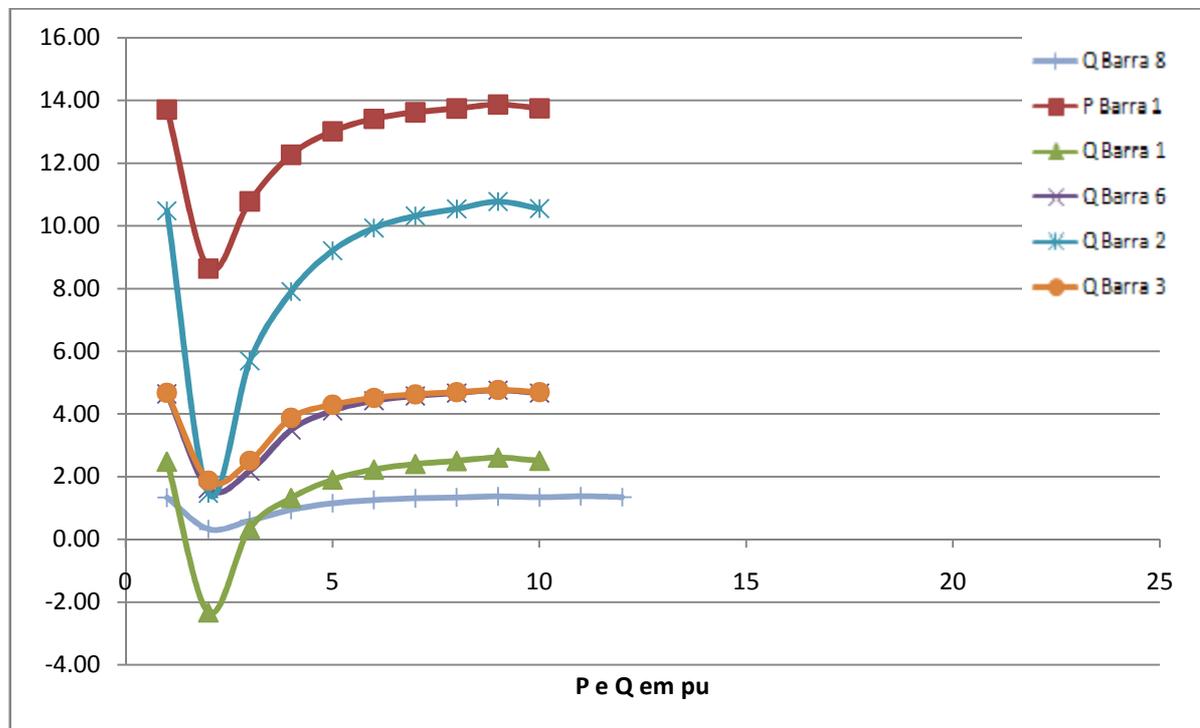


Figura 3.30: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,40%.

- **Formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo. Carga = 225,45% (divergente).**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETTRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR T BARRA	ERRO P.U. TIPO NOME ESTADO	P.U.	P.U.
0	X 1377.07 P 1	0.000000 GERD UG8 Q	1.00000	3.5125E+02
1	268.22 Q 3 X	9.272438 GERD UG6 Q	0.91947	1.9901E+02
2	108.98 Q 3 X	2.304691 GERD UG6 Q	1.00022	1.1695E+01
3	36.78 P 6 X	0.896935 GERD UG6 Q	1.00983	1.5926E+00
4	14.59 Q 6 X	0.369486 GERD UG6 Q	1.01495	2.3613E-01
5	5.23 Q 6 X	0.126458 GERD UG6 Q	1.02726	2.5815E-02
6	1.41 Q 6 X	0.036928 GERD UG6 Q	1.02353	2.1944E-03
7	0.59 Q 6 X	0.015782 GERD UG6 Q	1.01059	4.0181E-04
8	5.66 Q 6 X	0.151411 GERD UG6 Q	0.23449	3.7018E-02
9	1.59 Q 6 X	0.042079 GERD UG6 Q	1.01967	2.8757E-03
10	0.62 Q 6 X	0.016624 GERD UG6 Q	1.01392	4.4597E-04
11	2.26 Q 6 X	0.060594 GERD UG6 Q	0.46533	5.9220E-03
12	0.76 Q 6 X	0.020232 GERD UG6 Q	1.01768	6.6124E-04
13	0.78 Q 6 X	0.020961 GERD UG6 Q	0.87494	7.0843E-04
14	0.74 Q 6 X	0.019857 GERD UG6 Q	0.89749	6.3578E-04
15	0.83 Q 6 X	0.022241 GERD UG6 Q	0.85270	7.9752E-04
16	0.68 Q 6 X	0.018176 GERD UG6 Q	0.93127	5.3271E-04
17	1.12 Q 6 X	0.030173 GERD UG6 Q	0.72659	1.4677E-03
18	0.58 Q 6 X	0.015487 GERD UG6 Q	0.99769	3.8692E-04
19	242.44 Q 6 X	5.699441 GERD UG6 Q	0.00806	5.6205E+01
20	83.96 Q 6 X	1.340607 GERD UG6 Q	1.02007	4.4344E+00

Tabela 3.32: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,45%.

Os valores circulados em vermelho indicam divergência do sistema.

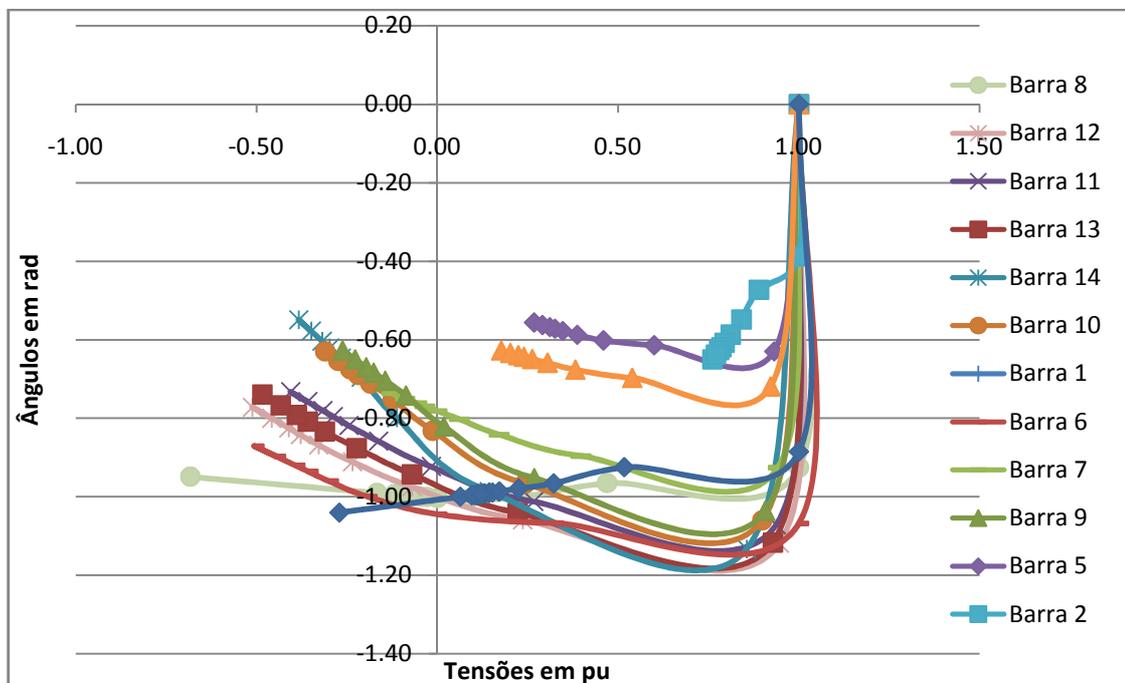


Figura 3.31: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,45%.

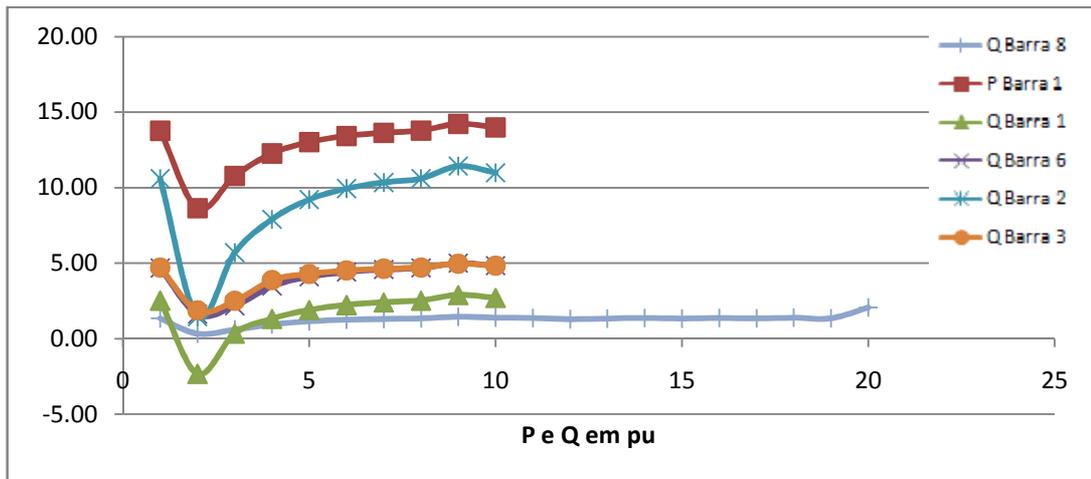


Figura 3.32: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 225,45%.

- **Formulação em coordenadas retangulares com controle de passo. Carga = 225,35% (convergente).**

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]	
	ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.	
0	X	1368.51	P	1	0.000000	GERD	UG8	Q	1.00000	3.4450E+02	
1		192.94	Q	3	X	8.023053	GERD	UG6	Q	0.91861	1.4866E+02
2		108.23	Q	3	X	2.744698	GERD	UG6	Q	0.99131	1.6075E+01
3		36.99	P	6	X	0.930375	GERD	UG6	Q	1.00904	1.7004E+00
4		14.66	Q	6	X	0.364222	GERD	UG6	Q	1.01695	2.2975E-01
5		4.84	Q	6	X	0.116121	GERD	UG6	Q	1.02821	2.1668E-02
6		1.06	Q	6	X	0.028167	GERD	UG6	Q	1.02311	1.2778E-03
7		0.27	Q	6	X	0.007305	GERD	UG6	Q	1.01985	8.6154E-05
RELATORIO DE BARRAS:											
No. Barra	Nome de Id. Barra	Tensao Modulo	Angulo	Geracao [MW] [MVAR]		Carga [MW] [MVAR]		Outros [MW] [MVAR]			
1	barra1	1.0000	0.00	1371.68	248.12						
2	barra2	1.0000	-38.56	40.00	1049.73	70.60	41.32				
3	barra3	1.0000	-82.45	0.00	468.26	306.48	61.82				
4	barra4	0.6811	-70.22			155.52	12.69				
5	barra5	0.6521	-60.85			24.73	5.21				
6	barra6	1.0003	-112.20	0.00	464.05	97.60	97.60				
7	barra7	0.7658	-93.59								
8	barra8	1.0002	-93.58	-0.00	133.05						
9	barra9	0.7012	-105.55			95.98	54.01	-0.00	-9.34		
10	barra10	0.7190	-108.76			29.28	18.87				
11	barra11	0.8432	-111.20			11.39	5.86				
12	barra12	0.9214	-115.54			19.85	5.21				
13	barra13	0.8822	-115.23			43.92	18.87				
14	barra14	0.6847	-116.94			48.48	16.27				
TOTAIS DO SISTEMA:											
Geracao Total		Carga Total		Outros Total							
[MW] [MVAR]		[MW] [MVAR]		[MW] [MVAR]		[MW] [MVAR]		[MW] [MVAR]			
1411.7 2363.2		903.8 337.7		-0.0 -9.3							

Tabela 3.33: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo e relatório de barras. Carga = 225,35%.

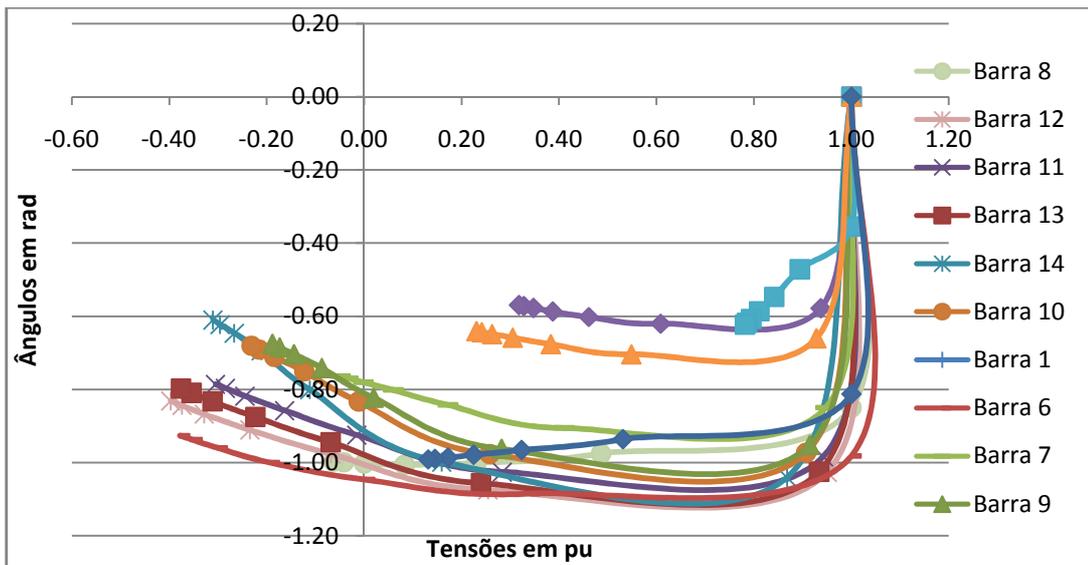


Figura 3.33: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,35%.

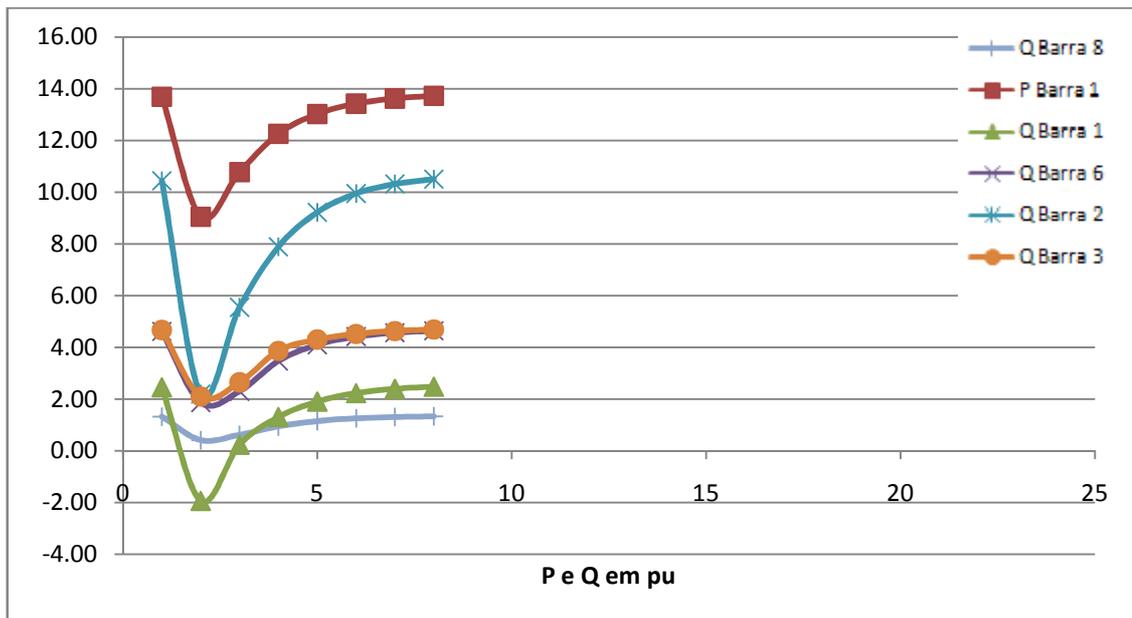


Figura 3.34: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,35%.

Os resultados da convergência mostram que o método formulado em coordenadas retangulares sem passo suportou um carregamento um pouco maior do que o método em coordenadas retangulares com passo.

- **Formulação em coordenadas retangulares com controle de passo. Carga = 225,40% (divergente).**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR T BARRA	ERRO P.U. TIPO NOME ESTADO	P.U.	P.U.
0	X 1371.68 P 1	0.000000 GERD UG8 Q	1.00000	3.4697E+02
1	193.15 Q 3 X	8.029837 GERD UG6 Q	0.91892	1.4891E+02
2	108.29 Q 3 X	2.744733 GERD UG6 Q	0.99133	1.6077E+01
3	37.04 P 6 X	0.931816 GERD UG6 Q	1.00900	1.7056E+00
4	14.73 Q 6 X	0.366169 GERD UG6 Q	1.01677	2.3221E-01
5	4.93 Q 6 X	0.118502 GERD UG6 Q	1.02805	2.2569E-02
6	1.16 Q 6 X	0.030662 GERD UG6 Q	1.02320	1.5141E-03
7	0.39 Q 6 X	0.010518 GERD UG6 Q	1.01698	1.7858E-04
8	0.43 Q 6 X	0.011669 GERD UG6 Q	0.76030	2.1955E-04
9	0.40 Q 6 X	0.010638 GERD UG6 Q	0.87700	1.8242E-04
10	0.44 Q 6 X	0.011690 GERD UG6 Q	0.76777	2.2026E-04
11	0.40 Q 6 X	0.010644 GERD UG6 Q	0.87748	1.8263E-04
12	0.44 Q 6 X	0.011688 GERD UG6 Q	0.76841	2.2017E-04
13	0.40 Q 6 X	0.010647 GERD UG6 Q	0.87728	1.8272E-04
14	0.44 Q 6 X	0.011685 GERD UG6 Q	0.76882	2.2006E-04
15	0.40 Q 6 X	0.010649 GERD UG6 Q	0.87707	1.8281E-04
16	0.43 Q 6 X	0.011682 GERD UG6 Q	0.76920	2.1995E-04
17	0.40 Q 6 X	0.010652 GERD UG6 Q	0.87687	1.8289E-04
18	0.43 Q 6 X	0.011679 GERD UG6 Q	0.76957	2.1985E-04
19	0.40 Q 6 X	0.010654 GERD UG6 Q	0.87668	1.8297E-04
20	0.43 Q 6 X	0.011677 GERD UG6 Q	0.76991	2.1975E-04

Tabela 3.34: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,40%.

O relatório dos erros de potência mostra que nesse caso específico, os valores de alpha não indicam divergência.

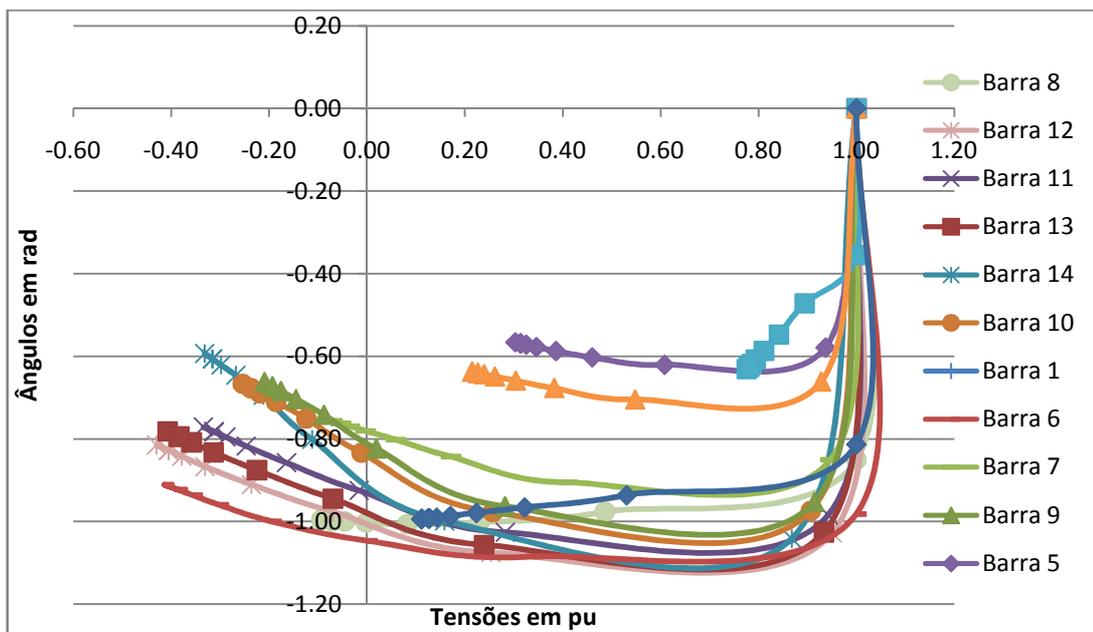


Figura 3.35: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,40%.

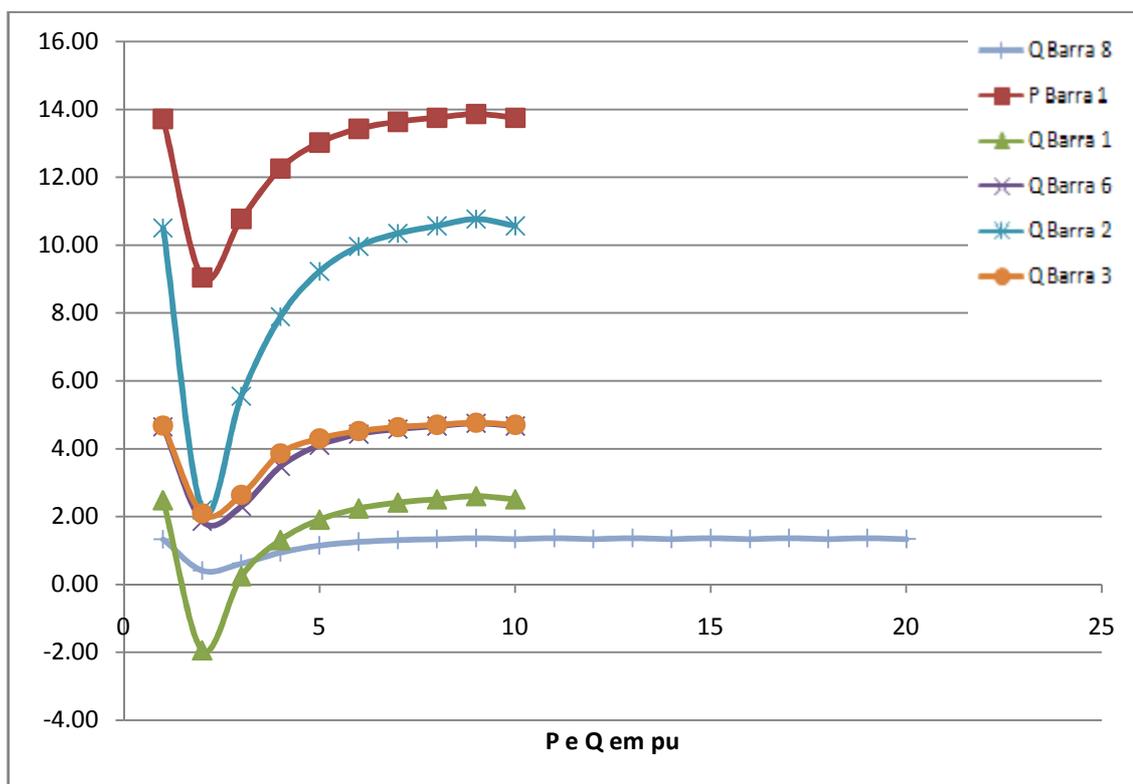


Figura 3.36: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 225,40%.

Na simulação em coordenadas retangulares, houve uma pequena diminuição nos valores dos ângulos das tensões durante o processo iterativo, mas apresentam basicamente os mesmo valores finais. Houve diferença significativa do efeito do passo nos valores dos estados de potência ativa e reativa, em coordenadas retangulares, sendo os valores com controle de passo sensivelmente menores.

Pode-se notar que o valor do carregamento para cada tipo de coordenada é diferente. Interessante observar que a simulação em coordenadas retangulares, que normalmente apresentam os melhores resultados, suportou um carregamento um pouco menor do que a simulação em coordenadas polares.

Nos casos divergentes, pode-se notar claramente o efeito do controle de passo sobre as coordenadas polares – na trajetória das tensões o desempenho do cálculo com o controle de passo se mostrou muito superior ao caso sem o controle de passo, no qual as tensões ficam “andando em círculos”, sem ter uma direção certa. A trajetória das potências também apresentou um comportamento claramente diferente. As simulações em coordenadas retangulares com e sem passo apresentaram um desempenho muito próximo, tanto na trajetória das tensões quanto nas potências.

III.3.3 Sobrecarga de 50% além do limiar de convergência

Nesta simulação o valor do carregamento do sistema IEEE 14 barras foi aumentado em aproximadamente 50% sobre o valor limite de convergência (seção III.3.3). O objetivo do estudo nessa condição de carga é de averiguar o comportamento do multiplicador alpha. No método convencional de Iwamoto o valor de alpha deve ser zero nos casos divergentes. Como as simulações deste trabalho lidam com aproximações, os valores de alpha não chegam exatamente a zero, mas devem ser pequenos o suficiente para indicar a divergência. Os resultados são apresentados a seguir.

- **Formulação em coordenadas polares sem controle de passo. Carga = 390%.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR T BARRA	ERRO P.U. TIPO NOME ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	460.99 P 3	0.000000 GERD UG8 Q	1.00000	4.1045E+01
1 X	484.35 Q 2	0.001064 GERD UG1 P	1.00000	5.9861E+01
2 X	396.77 P 1	0.002022 GERD UG2 Q	1.00000	3.4372E+01
3 X	518.50 P 5	0.000999 GERD UG2 Q	1.00000	7.2632E+01
4 X	924.65 P 1	0.002103 GERD UG2 Q	1.00000	1.4213E+02
5 X	3548.05 Q 2	0.001975 GERD UG3 Q	1.00000	2.2719E+03
6 X	17398.62 Q 4	0.010838 GERD UG2 Q	1.00000	6.8133E+04

Tabela 3.35: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 390%.

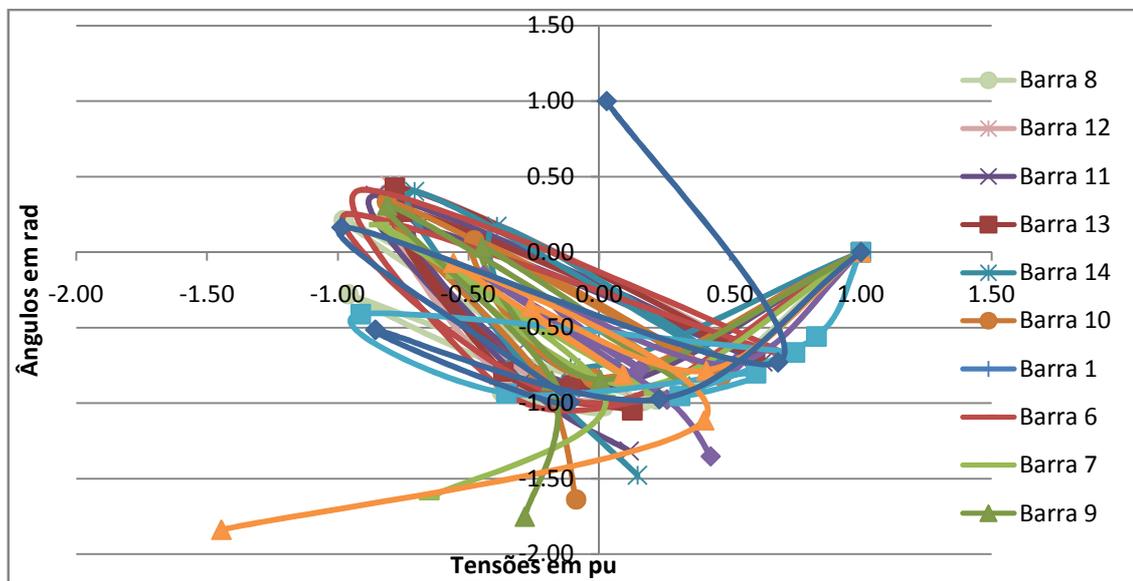


Figura 3.37: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 390%.

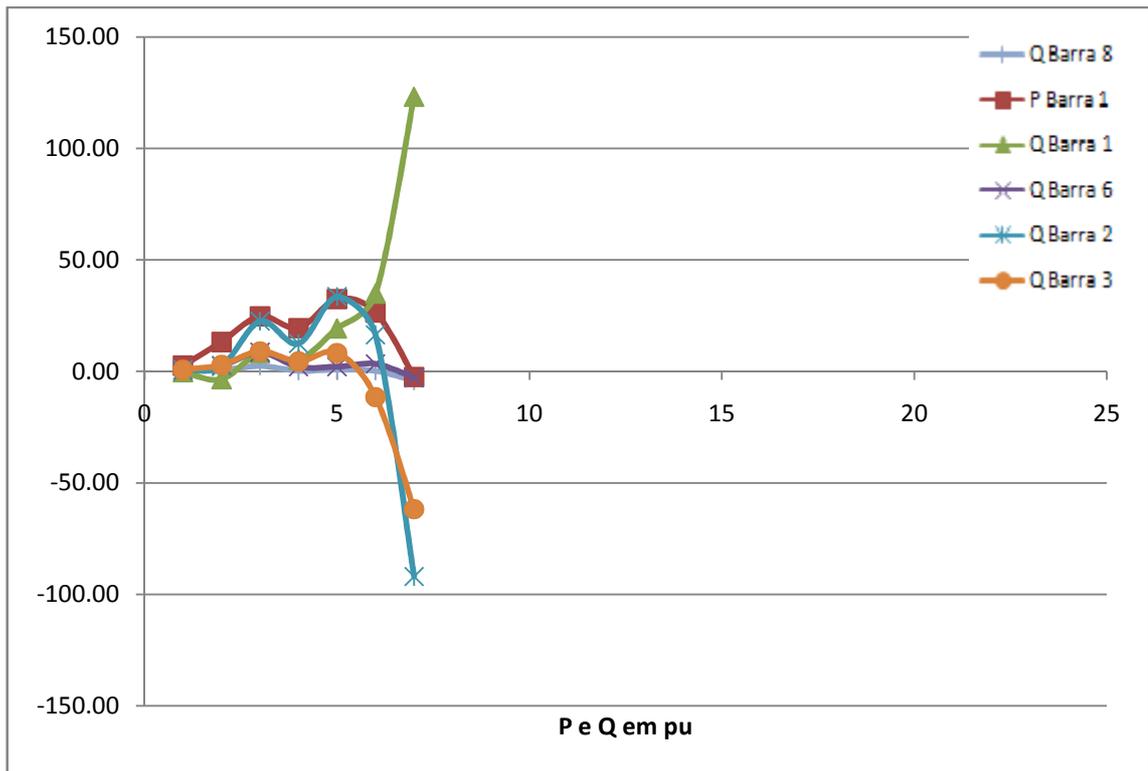


Figura 3.38: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 390%.

- **Formulação em coordenadas polares com controle de passo. Carga = 390%.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	461.13	P	3	0.000000	GERD	UG8	Q	1.00000	4.1067E+01
1 X	490.66	Q	2	0.001071	GERD	UG1	P	1.00640	6.1249E+01
2 X	272.06	Q	2	0.001529	GERD	UG2	Q	0.72438	2.5552E+01
3 X	447.35	P	1	0.000776	GERD	UG2	Q	0.56733	5.2440E+01
4 X	330.03	P	1	0.001097	GERD	UG2	Q	0.75353	3.6895E+01
5 X	378.41	P	1	0.000407	GERD	UG2	Q	0.33595	4.4329E+01
6 X	325.24	P	1	0.000477	GERD	UG2	Q	0.32759	3.5970E+01
7 X	540.18	P	6	0.000185	GERD	UG1	Q	0.37437	6.8295E+01
8 X	651.58	P	1	0.001844	GERD	UG2	Q	0.64004	8.3077E+01
9 X	1585.79	P	1	0.002808	GERD	UG1	Q	0.40969	4.8262E+02
10 X	706.50	Q	3	0.000783	GERD	UG1	Q	0.94631	1.9879E+02
11 X	700.18	Q	3	0.001035	GERD	UG1	Q	0.01510	1.8926E+02
12 X	662.91	Q	3	0.001259	GERD	UG1	Q	0.05413	1.7883E+02
13 X	943.64	P	4	0.000341	GERD	UG2	Q	0.40615	3.9902E+02
14 X	1254.13	P	1	0.002288	GERD	UG1	Q	1.02127	5.0858E+02
15 X	1877.91	Q	2	0.002803	GERD	UG2	Q	0.35770	7.2089E+02
16 X	1547.44	Q	2	0.001803	GERD	UG2	Q	0.19624	6.7661E+02
17 X	1500.59	Q	2	0.001134	GERD	UG2	Q	0.12992	7.9573E+02
18 X	2045.46	Q	6	0.002125	GERD	UG2	Q	0.70675	7.5344E+02
19 X	2276.19	Q	5	0.001029	GERD	UG3	Q	0.78788	1.5855E+03
20 X	6241.21	P	1	0.004646	GERD	UG2	Q	0.20042	7.2631E+03

Tabela 3.36: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 390%.

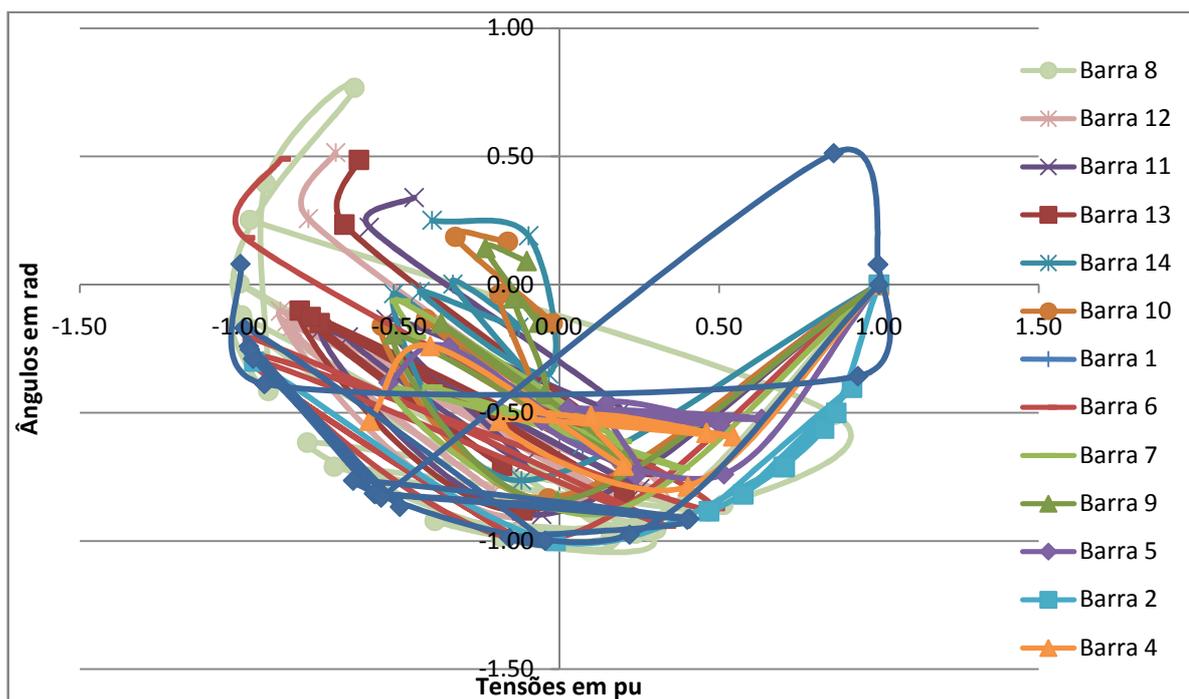


Figura 3.39: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 390%.

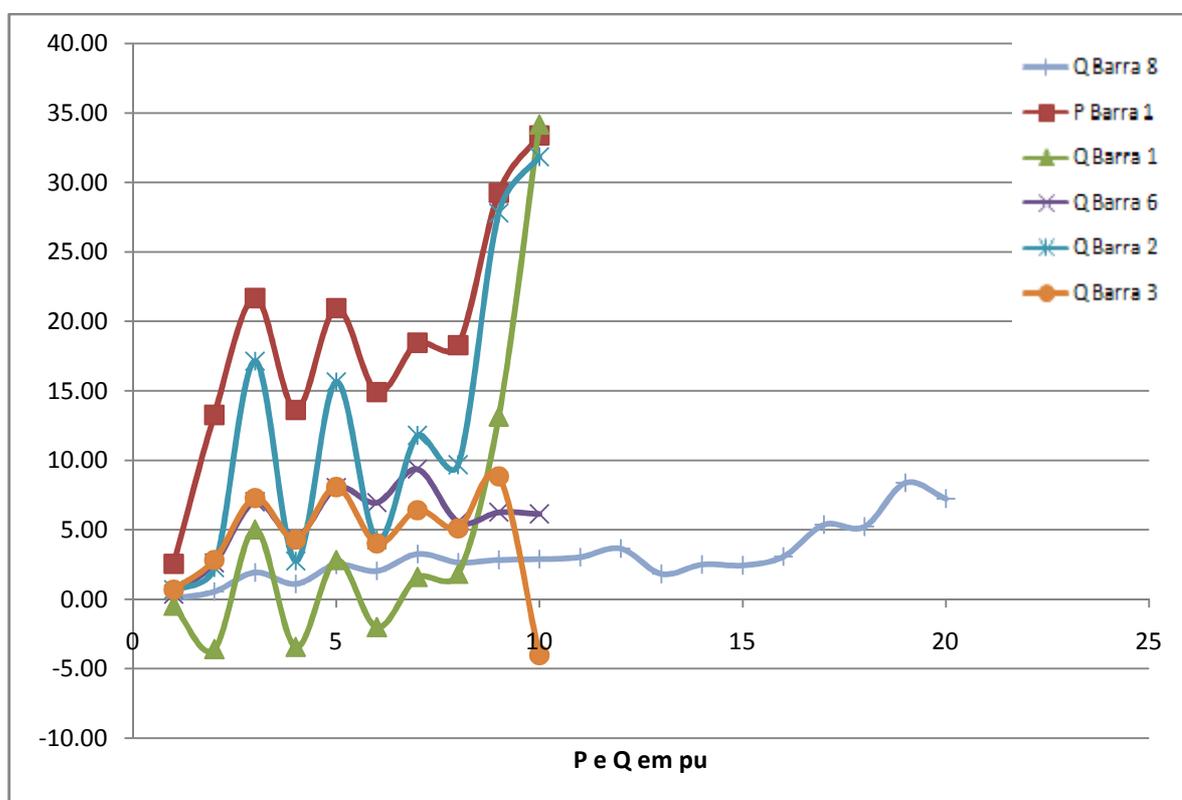


Figura 3.40: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 390%.

- **Formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo. Carga = 390%.**

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]
	ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.
0	X	459.86	P 3	0.000000	GERD	UG8	Q	1.00000	4.0873E+01
1		607.70	Q 3	X 17.981200	GERD	UG6	Q	1.00000	7.8804E+02
2		533.30	Q 3	X 10.767306	GERD	UG6	Q	1.00000	2.7122E+02
3	X	11606.40	P 2	105.463515	GERD	UG6	Q	1.00000	5.8976E+04
4	X	35908.52	Q 2	67.454384	GERD	UG2	Q	1.00000	1.6427E+05
5	X	12857.22	Q 2	22.895368	GERD	UG8	Q	1.00000	2.0317E+04
6	X	193999.70	Q 2	148.523225	GERD	UG2	Q	1.00000	4.6576E+06
7	X	503351.52	Q 2	200.531322	GERD	UG8	Q	1.00000	3.0943E+07
8	X	134366.53	Q 2	0.384588	GERD	UG6	Q	1.00000	2.2406E+06
9	X	78531.58	Q 9	0.003956	GERD	UG1	Q	1.00000	1.3882E+06
10	X	45895.40	Q 9	0.001807	GERD	UG1	Q	1.00000	3.4705E+05
11	X	110266.00	Q 6	0.002978	GERD	UG1	P	1.00000	1.4048E+06
12	X	69509.21	Q 3	0.005346	GERD	UG1	P	1.00000	6.5289E+05
13	X	143670.87	Q 3	0.013972	GERD	UG1	P	1.00000	3.4045E+06
14	X	123973.67	Q 3	0.013122	GERD	UG1	P	1.00000	3.0415E+06
15	X	128508.14	Q 8	0.007086	GERD	UG1	Q	1.00000	2.1501E+06
16	X	375858.28	Q 8	0.011979	GERD	UG1	P	1.00000	1.6252E+07
17	X	6549383.00	Q 8	0.050432	GERD	UG1	P	1.00000	4.8378E+09
18	X	2494499.78	Q 8	0.030655	GERD	UG1	P	1.00000	7.1581E+08
19	X	626458.04	Q 8	0.013685	GERD	UG1	P	1.00000	4.5484E+07
20	X	182670.97	Q 8	0.007705	GERD	UG1	Q	1.00000	3.7498E+06

Tabela 3.37: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 390%.

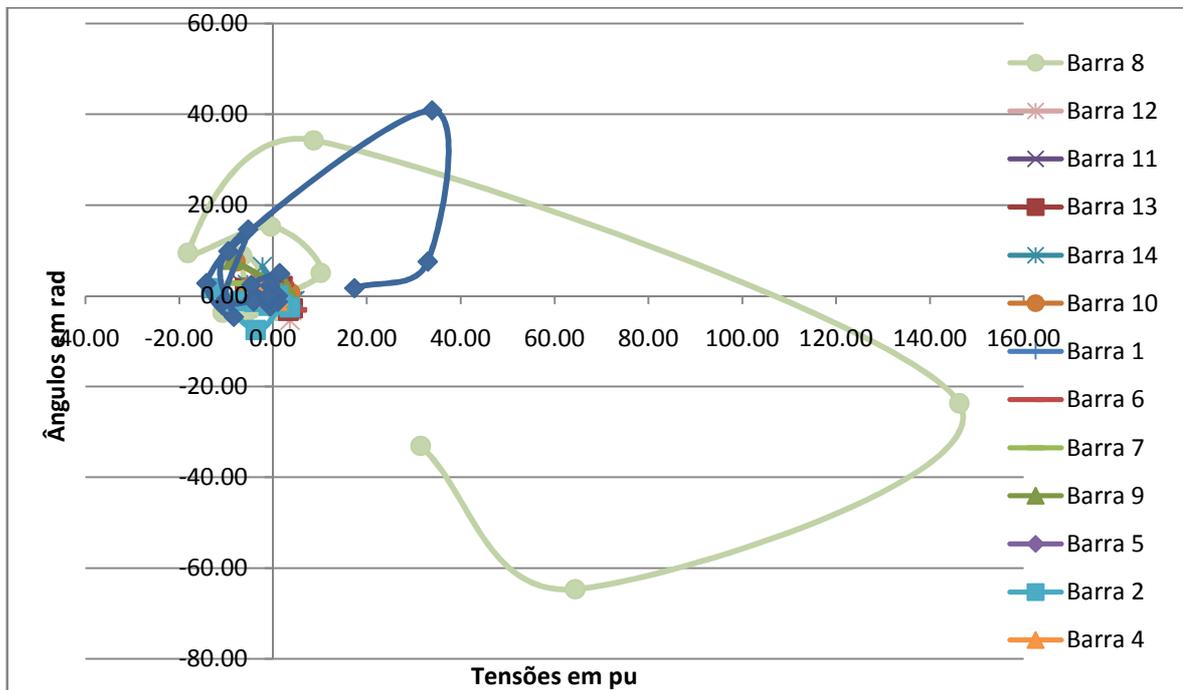


Figura 3.41: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 390%.

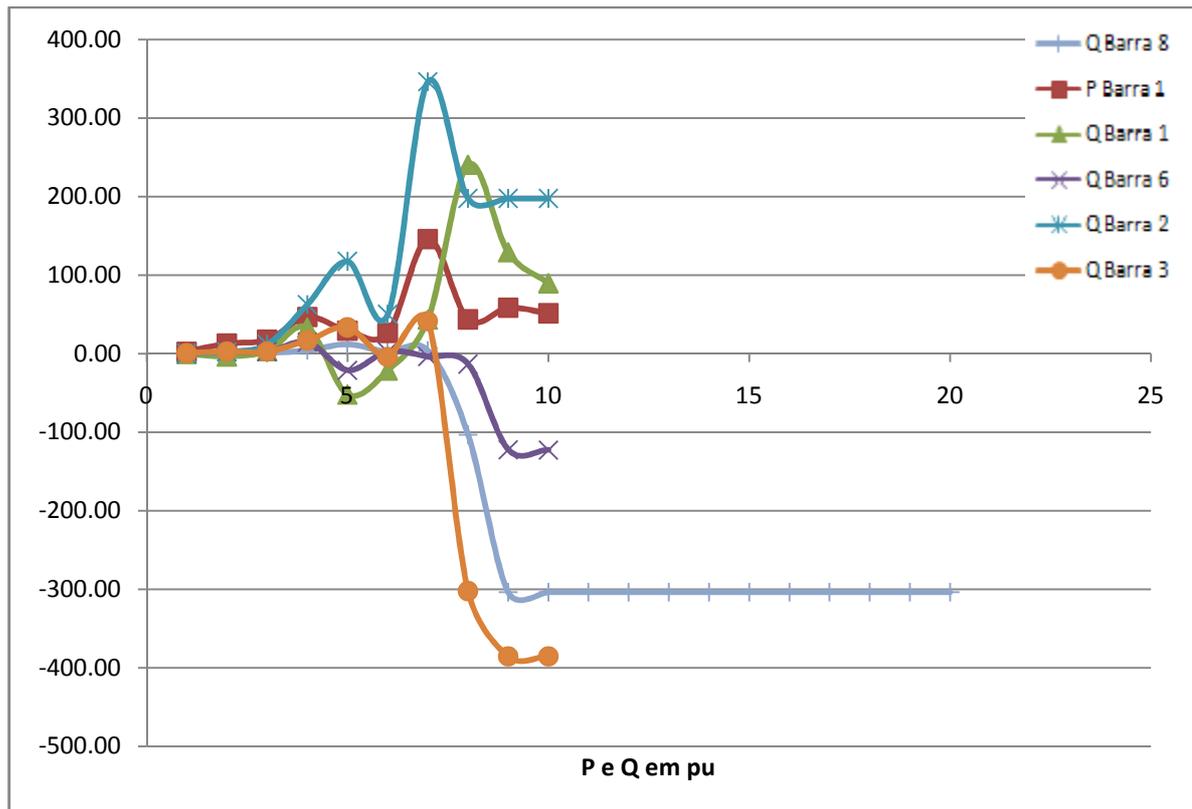


Figura 3.42: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 390%.

- **Formulação em coordenadas retangulares com controle de passo. Carga = 390%.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR T BARRA	ERRO P.U. TIPO NOME ESTADO	P.U.	P.U.
0	X 459.79 P 3	0.000000 GERD UG8 Q	1.00000	4.0863E+01
1	297.64 P 3 X	5.355620 GERD UG6 Q	0.48276	8.0080E+01
2	245.60 Q 3 X	7.925297 GERD UG6 Q	0.61543	1.4551E+02
3	309.18 Q 3 X	9.796986 GERD UG6 Q	0.53541	2.1584E+02
4	312.92 Q 3 X	9.926374 GERD UG6 Q	0.00794	2.2170E+02

Tabela 3.38: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 390%.

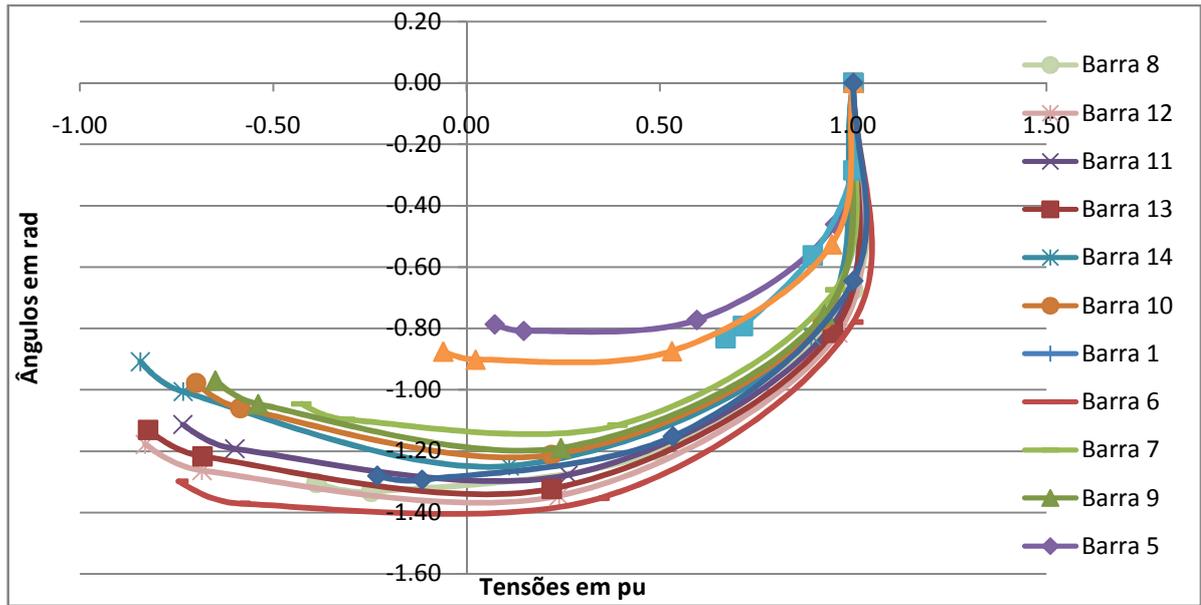


Figura 3.43: Gráfico das trajetórias das tensões em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 390%.

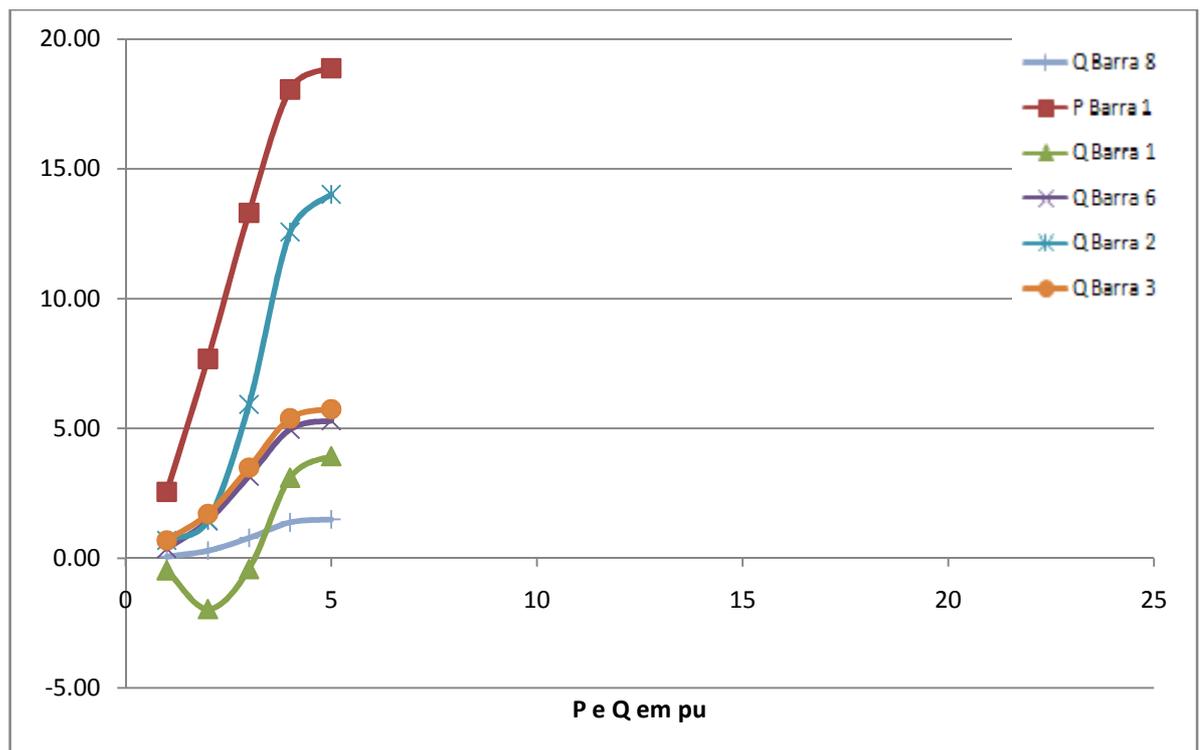


Figura 3.44: Gráfico das trajetórias das potências em cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 390%.

Nas simulações de fluxo de potência com sobrecarga muito elevada podemos notar que houve uma diferença no comportamento da formulação em coordenadas polares e controle de passo – a trajetória das tensões não explodiu, apresentando um comportamento semelhante ao caso convergente. No caso de coordenadas polares a diferença entre a formulação com passo e sem passo se dá basicamente pelos limites das tensões no método com passo, que se situam mais próximos de 1 pu.

De modo geral, o controle de passo exerceu maior influência na formulação polar próximo ao limite da convergência, enquanto que na formulação retangular essa influência ocorreu nos casos de carregamento bem superiores ao limiar.

Cabe ressaltar também o desempenho da formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo, que mostrou um comportamento semelhante ao obtido com o controle de passo mesmo para grandes carregamentos, até o limite de divergência.

III.4 Sistema de 45 Barras

A seguir, serão apresentados os relatórios do fluxo de potência para um caso de 45 barras. Como nos itens anteriores, o sistema primeiro foi rodado no caso base e depois foi estressado até atingir o limite de convergência. Após estabelecer esse limite foi aplicada uma carga 50% maior, para podermos observar o comportamento das diversas formulações (polar e retangular, com e sem controle de passo) frente a grandes perturbações.

Os relatórios de barra e o gráfico das trajetórias não serão apresentados nesse item pois essas informações ficariam muito confusas para um sistema desse porte.

Dados do sistema	Quantidade
Barras	45
Circuitos	55
Barras PV	8
Transformadores	17
Carga Ativa (MW)	6481.1 MW
Carga Reativa (MVar)	944.9 MVar

Tabela 3.39: Características do sistema de 45 barras – caso base

III.4.1 Caso Base

As simulações no caso base foram feitas sem nenhuma modificação sobre as cargas do sistema.

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO NOME ESTADO P.U. P.U.
0 X	1259.96	P 381	0.000000	GERD UG390 Q 1.00000 1.1135E+03
1 X	385.11	Q 382	0.000756	GERD UG381 Q 1.00000 8.3776E+01
2 X	27.81	Q 387	0.000700	GERD UG381 Q 1.00000 3.9438E-01
3 X	0.34	Q 387	0.000056	GERD UG381 Q 1.00000 4.7018E-05

Tabela 3.40: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga nominal.

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO NOME ESTADO P.U. P.U.
0 X	1259.96	P 381	0.000000	GERD UG390 Q 1.00000 1.1136E+03
1 X	354.87	Q 382	0.000742	GERD UG381 Q 0.98259 7.2775E+01
2 X	18.85	Q 387	0.000733	GERD UG381 Q 1.03075 1.3885E-01
3 X	0.11	P 383	0.000030	GERD UG381 Q 1.00397 8.0484E-06

Tabela 3.41: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga nominal.

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO NOME ESTADO P.U. P.U.
0 X	1259.96	P 381	0.000000	GERD UG390 Q 1.00000 1.1135E+03
1 X	450.47	Q 399	1.889608	GERD UG392 Q 1.00000 8.5367E+01
2 X	80.19	Q 399	0.009020	GERD UG392 Q 1.00000 1.8379E+00
3 X	4.83	Q 399	0.005198	GERD UG392 Q 1.00000 6.2261E-03
4 X	0.02	Q 399	0.000066	GERD UG392 Q 1.00000 1.1580E-07

Tabela 3.42: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga nominal.

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO NOME ESTADO P.U. P.U.
0 X	1259.96	P 381	0.000000	GERD UG390 Q 1.00000 1.1135E+03
1 X	362.33	Q 399	1.502963	GERD UG392 Q 0.88783 6.1370E+01
2 X	53.82	Q 402	0.097668	GERD UG392 Q 1.10600 1.1630E+00
3	0.55	Q 399 X	0.005607	GERD UG392 Q 1.02204 2.9878E-04

Tabela 3.43: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga nominal.

Pode-se notar que o ganho com a utilização do controle de passo se deu apenas no caso retangular com passo, que convergiu em 3 iterações, quando comparado com o caso retangular sem passo que convergiu em 4 iterações.

III.4.2 Limiar da Convergência

Ao sistema estudado foi aplicada uma função rampa que age sobre as cargas ativas e reativas do sistema, aumentando o seu valor até que o calculo do fluxo de potência chegue ao limite da convergência. Os resultados são mostrados a seguir:

- **Formulação em coordenadas polares sem controle de passo.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U. TIPO NOME ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	2592.13 P 397	0.000000 GERD UG390 Q	1.00000	1.8447E+03
1 X	633.85 Q 382	0.001709 GERD UG381 Q	1.00000	1.8866E+02
2 X	57.09 Q 387	0.001261 GERD UG381 Q	1.00000	1.5438E+00
3 X	16.32 P 382	0.000348 GERD UG381 Q	1.00000	1.3507E-01
4 X	4.56 P 383	0.000141 GERD UG381 Q	1.00000	8.8480E-03
5 X	0.81 P 383	0.000056 GERD UG381 Q	1.00000	2.4682E-04

Tabela 3.44: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 20,5% (convergente).

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U. TIPO NOME ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	2642.01 P 397	0.000000 GERD UG390 Q	1.00000	1.9019E+03
1 X	641.27 Q 382	0.001805 GERD UG381 Q	1.00000	1.9259E+02
2 X	58.06 Q 387	0.001281 GERD UG381 Q	1.00000	1.6257E+00
3 X	18.63 P 382	0.000369 GERD UG381 Q	1.00000	1.7440E-01
4 X	7.16 P 379	0.000179 GERD UG381 Q	1.00000	2.1950E-02
5 X	4.76 P 379	0.000140 GERD UG381 Q	1.00000	8.7687E-03
6 X	68.25 P 379	0.000506 GERD UG381 Q	1.00000	1.7419E+00
7 X	18.72 P 383	0.000242 GERD UG381 Q	1.00000	1.2554E-01
8 X	6.56 P 383	0.000156 GERD UG381 Q	1.00000	1.5843E-02
9 X	5.75 P 379	0.000153 GERD UG381 Q	1.00000	1.2588E-02
10 X	8.86 P 379	0.000193 GERD UG381 Q	1.00000	3.0291E-02
11 X	4.75 P 379	0.000137 GERD UG381 Q	1.00000	8.5374E-03
12 X	461.57 P 383	0.001210 GERD UG381 Q	1.00000	7.6194E+01
13 X	115.18 P 383	0.000494 GERD UG381 Q	1.00000	4.7118E+00
14 X	36.76 P 383	0.000343 GERD UG381 Q	1.00000	4.6573E-01
15 X	11.52 P 383	0.000198 GERD UG381 Q	1.00000	4.6955E-02
16 X	4.97 P 379	0.000138 GERD UG381 Q	1.00000	9.1530E-03
17 X	27.74 P 379	0.000354 GERD UG381 Q	1.00000	3.0289E-01
18 X	8.27 P 382	0.000207 GERD UG381 Q	1.00000	2.7249E-02
19 X	5.14 P 379	0.000150 GERD UG381 Q	1.00000	1.0182E-02
20 X	23.98 P 379	0.000328 GERD UG381 Q	1.00000	2.2585E-01

Tabela 3.45: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 21,0% (divergente).

- **Formulação em coordenadas polares com controle de passo.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO NOME ESTADO P.U. P.U.
0 X	2592.29	P 397	0.000000	GERD UG390 Q 1.00000 1.8450E+03
1 X	606.75	Q 382	0.001690	GERD UG381 Q 0.98801 1.7284E+02
2 X	44.94	P 382	0.001432	GERD UG381 Q 1.06579 1.1061E+00
3 X	14.35	P 382	0.000236	GERD UG381 Q 1.04146 1.0966E-01
4 X	3.76	P 383	0.000124	GERD UG381 Q 1.00658 5.7285E-03
5 X	0.58	P 379	0.000047	GERD UG381 Q 1.00340 1.2519E-04

Tabela 3.46: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 20,5% (convergente).

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO NOME ESTADO P.U. P.U.
0 X	2642.70	P 397	0.000000	GERD UG390 Q 1.00000 1.9033E+03
1 X	614.70	Q 382	0.001787	GERD UG381 Q 0.98833 1.7684E+02
2 X	47.42	P 382	0.001461	GERD UG381 Q 1.06692 1.2058E+00
3 X	16.73	P 382	0.000255	GERD UG381 Q 1.04301 1.4702E-01
4 X	6.48	P 379	0.000166	GERD UG381 Q 1.00598 1.7314E-02
5 X	5.05	P 379	0.000148	GERD UG381 Q 0.95359 9.8392E-03
6 X	8.13	P 379	0.000093	GERD UG381 Q 0.56509 2.5396E-02
7 X	4.82	P 379	0.000134	GERD UG381 Q 0.97789 8.8246E-03
8 X	9.39	P 379	0.000059	GERD UG381 Q 0.27983 3.3595E-02
9 X	4.73	P 379	0.000134	GERD UG381 Q 0.98904 8.4579E-03
10 X	4.73	P 379	0.000137	GERD UG381 Q 0.00059 8.4531E-03
11 X	4.73	P 379	0.000136	GERD UG381 Q 0.00000 8.4531E-03
12 X	4.86	P 379	0.000113	GERD UG381 Q 0.00001 8.9190E-03
13 X	6.74	P 379	0.000200	GERD UG381 Q 0.26118 1.7329E-02
14 X	5.41	P 379	0.000121	GERD UG381 Q 0.89122 1.1402E-02
15 X	7.45	P 379	0.000123	GERD UG381 Q 0.71571 2.1458E-02
16 X	5.08	P 379	0.000131	GERD UG381 Q 0.91956 1.0090E-02
17 X	7.81	P 379	0.000078	GERD UG381 Q 0.46708 2.3651E-02
18 X	4.98	P 379	0.000135	GERD UG381 Q 0.92840 9.7289E-03
19 X	7.37	P 379	0.000042	GERD UG381 Q 0.33257 2.1154E-02
20 X	5.13	P 379	0.000138	GERD UG381 Q 0.91669 1.0270E-02

Tabela 3.47: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 21,0% (divergente).

- **Formulação em coordenadas retangulares sem controle de passo.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	2592.41	P	397	0.000000	GERD	UG390	Q	1.00000	1.8452E+03
1 X	822.40	Q	399	5.715308	GERD	UG392	Q	1.00000	3.8508E+02
2 X	246.49	Q	399	0.270132	GERD	UG392	Q	1.00000	1.9827E+01
3 X	60.41	Q	399	0.202910	GERD	UG392	Q	1.00000	1.4246E+00
4	10.56	Q	399 X	0.128113	GERD	UG392	Q	1.00000	1.1671E-01
5	1.85	Q	378 X	0.030413	GERD	UG392	Q	1.00000	4.7814E-03
6	0.23	Q	378 X	0.003260	GERD	UG392	Q	1.00000	5.4142E-05

Tabela 3.48: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 20,5% (convergente).

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	2643.46	P	397	0.000000	GERD	UG390	Q	1.00000	1.9049E+03
1 X	832.64	Q	399	5.827265	GERD	UG392	Q	1.00000	3.9727E+02
2 X	252.22	Q	399	0.285639	GERD	UG392	Q	1.00000	2.0838E+01
3 X	63.74	Q	399	0.218956	GERD	UG392	Q	1.00000	1.6059E+00
4	12.58	Q	399 X	0.157487	GERD	UG392	Q	1.00000	1.7327E-01
5	3.97	Q	378 X	0.064308	GERD	UG392	Q	1.00000	2.1257E-02
6	5.91	Q	378 X	0.082305	GERD	UG392	Q	1.00000	3.4510E-02
7	3.79	Q	378 X	0.051149	GERD	UG392	Q	1.00000	1.3417E-02
8	21.94	Q	378 X	0.297237	GERD	UG392	Q	1.00000	4.5388E-01
9	6.59	Q	378 X	0.087649	GERD	UG392	Q	1.00000	4.0128E-02
10	3.65	Q	378 X	0.049574	GERD	UG392	Q	1.00000	1.2603E-02
11	86.12	Q	378 X	1.143818	GERD	UG392	Q	1.00000	6.8451E+00
12	22.65	Q	378 X	0.278608	GERD	UG392	Q	1.00000	4.3826E-01
13	6.68	Q	378 X	0.087147	GERD	UG392	Q	1.00000	4.0163E-02
14	3.64	Q	378 X	0.049640	GERD	UG392	Q	1.00000	1.2587E-02
15	118.13	Q	378 X	1.554123	GERD	UG392	Q	1.00000	1.2749E+01
16	30.75	Q	378 X	0.365787	GERD	UG392	Q	1.00000	7.8373E-01
17	8.62	Q	378 X	0.109331	GERD	UG392	Q	1.00000	6.4587E-02
18	3.70	Q	378 X	0.050603	GERD	UG392	Q	1.00000	1.3056E-02
19	38.52	Q	378 X	0.519333	GERD	UG392	Q	1.00000	1.3920E+00
20	10.64	Q	378 X	0.138149	GERD	UG392	Q	1.00000	1.0188E-01

Tabela 3.49: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 21,0% (divergente).

- **Formulação em coordenadas retangulares com controle de passo.**

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]	
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.		
0	X	2592.22	P	397	0.000000	GERD	UG390	Q	1.00000	1.8448E+03	
1	X	590.60	Q	399	4.144492	GERD	UG392	Q	0.83718	2.5461E+02	
2	X	234.65	Q	399	0.596081	GERD	UG392	Q	1.01502	2.0608E+01	
3	X	27.49	Q	399	0.202424	GERD	UG395	Q	1.23538	7.2841E-01	
4		3.45	Q	378	X	0.102302	GERD	UG392	Q	1.13170	3.8349E-02
5		0.52	Q	378	X	0.005914	GERD	UG392	Q	1.01558	1.9942E-04

Tabela 3.50: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 20,5% (convergente).

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]				[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]				[ALPHA]	[FOBJ]	
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.		
0	X	2642.37	P	397	0.000000	GERD	UG390	Q	1.00000	1.9026E+03	
1	X	599.47	Q	399	4.239340	GERD	UG392	Q	0.83841	2.6421E+02	
2	X	240.45	Q	399	0.620251	GERD	UG392	Q	1.01435	2.1695E+01	
3	X	31.19	Q	399	0.223023	GERD	UG395	Q	1.23505	8.8413E-01	
4		5.62	Q	378	X	0.151846	GERD	UG392	Q	1.16040	8.7441E-02
5		3.65	Q	378	X	0.051811	GERD	UG392	Q	0.98041	1.3217E-02
6		3.71	Q	378	X	0.052367	GERD	UG392	Q	0.11425	1.3563E-02
7		3.77	Q	378	X	0.052847	GERD	UG392	Q	0.16893	1.3896E-02
8		3.81	Q	378	X	0.053130	GERD	UG392	Q	0.21756	1.4127E-02
9		3.84	Q	378	X	0.053179	GERD	UG392	Q	0.24971	1.4233E-02

Tabela 3.51: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 21,0% (divergente).

Novamente pode-se notar que o ganho com a utilização do controle de passo nos casos convergentes se deu apenas no caso retangular, que convergiu em 5 iterações, quando comparado com o caso sem passo, que convergiu em 6 iterações

III.4.3 Sobrecarga de 50% além do limiar de convergência

Nesta simulação o valor do carregamento do sistema de 45 barras foi aumentado em aproximadamente 50% sobre o valor limite de convergência (seção III.4.3). Os resultados são apresentados a seguir.

O estudo sobre tal sobrecarga tem o objetivo de analisar o comportamento dos valores de alpha, no sentido de indicar a divergência do sistema. Um sistema muito sobrecarregado deve apresentar valores de alpha muito próximos de zero ou zero.

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO NOME ESTADO P.U. P.U.
0 X	1475.45	P 399	0.000000	GERD UG390 Q 1.00000 1.7616E+03
1 X	2276.42	Q 398	0.005130	GERD UG397 P 1.00000 1.8680E+03
2 X	20904.56	P 383	0.016845	GERD UG381 Q 1.00000 4.3352E+05
3 X	113349.97	Q 367	0.008684	GERD UG397 P 1.00000 3.7990E+06
4 X	131064.64	Q 391	0.026793	GERD UG390 Q 1.00000 3.3439E+06

Tabela 3.52: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e sem controle de passo. Carga = 81,5%.

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO NOME ESTADO P.U. P.U.
0 X	1475.45	P 399	0.000000	GERD UG390 Q 1.00000 1.7616E+03
1 X	2178.25	Q 398	0.005030	GERD UG397 P 0.98047 1.6984E+03
2 X	2063.96	Q 398	0.004922	GERD UG397 P 0.05691 1.4875E+03
3 X	1953.92	Q 398	0.004553	GERD UG397 P 0.05383 1.3127E+03
4 X	1895.60	Q 398	0.004517	GERD UG397 P 0.03183 1.2256E+03
5 X	1887.73	Q 398	0.004475	GERD UG397 P 0.00420 1.2150E+03
6 X	1887.47	Q 398	0.004472	GERD UG397 P 0.00074 1.2146E+03
7 X	1887.34	Q 398	0.004469	GERD UG397 P 0.00007 1.2144E+03
8 X	1887.32	Q 398	0.004468	GERD UG397 P 0.00001 1.2144E+03
9 X	1887.31	Q 398	0.004467	GERD UG397 P 0.00001 1.2144E+03
10 X	1887.31	Q 398	0.004467	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
11 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
12 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
13 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
14 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
15 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
16 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
17 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
18 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
19 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03
20 X	1887.31	Q 398	0.004466	GERD UG397 P 0.00000 1.2144E+03

Tabela 3.53: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas polares e com controle de passo. Carga = 81,5%.

NO.	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]	[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]	[ALPHA]	[FOBJ]
ITR	ERRO MW/MVAR	T BARRA	ERRO P.U.	TIPO NOME ESTADO P.U. P.U.
0 X	1475.45	P 399	0.000000	GERD UG390 Q 1.00000 1.7616E+03
1 X	2478.65	Q 399	22.838680	GERD UG392 Q 1.00000 4.8922E+03
2 X	1853.48	Q 399	10.320616	GERD UG392 Q 1.00000 1.7967E+03
3 X	98158.42	Q 402	214.639633	GERD UG392 Q 1.00000 6.8259E+06
4 X	31151.84	Q 402	23.039604	GERD UG392 Q 1.00000 7.3104E+05
5 X	28918776.23	Q 369	359.933938	GERD UG373 Q 1.00000 8.4798E+10
6 X	11047917275.93	Q 369	3435.627948	GERD UG392 Q 1.00000 1.2367E+16
7 X	7948391412.32	Q 369	2399.166359	GERD UG392 Q 1.00000 6.4113E+15
8 X	8933522228.31	Q 369	0.547805	GERD UG397 P 1.00000 8.0992E+15
9 X	2237906653.56	Q 369	0.307382	GERD UG397 Q 1.00000 5.0825E+14
10 X	561139521.34	Q 369	0.150564	GERD UG397 Q 1.00000 3.1955E+13
11 X	140550565.36	Q 369	0.083570	GERD UG397 Q 1.00000 2.0048E+12
12 X	35466791.92	Q 369	0.041792	GERD UG397 Q 1.00000 1.2766E+11
13 X	9758657.01	Q 369	0.021818	GERD UG397 Q 1.00000 9.6693E+09
14 X	15390336.55	Q 369	0.014956	GERD UG397 Q 1.00000 2.3960E+10
15 X	75673551.65	Q 369	0.032065	GERD UG397 Q 1.00000 5.8040E+11
16 X	19106762.56	Q 369	0.018570	GERD UG397 Q 1.00000 3.6998E+10
17 X	4783663.75	Q 369	0.009262	GERD UG397 Q 1.00000 2.3191E+09
18 X	17146002.07	Q 369	0.012410	GERD UG397 P 1.00000 2.9782E+10
19 X	39137153.94	Q 369	0.018060	GERD UG397 Q 1.00000 1.5532E+11
20 X	9833853.27	Q 369	0.010101	GERD UG397 Q 1.00000 9.8057E+09

Tabela 3.54: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e sem controle de passo. Carga = 81,5%.

NO. ITR	[MISMATCHS: REDE ELETRICA]			[MISMATCHS: MODELOS DE EQUIPAMENTOS]			[ALPHA]	[FOBJ]	
	ERRO MW/MVAR	T	BARRA	ERRO P.U.	TIPO	NOME	ESTADO	P.U.	P.U.
0 X	1475.45	P	399	0.000000	GERD	UG390	Q	1.00000	1.7616E+03
1 X	867.52	P	402	8.419096	GERD	UG392	Q	0.53444	9.1820E+02
2 X	840.65	Q	399	8.384727	GERD	UG392	Q	0.49667	5.8992E+02
3	821.78	Q	399 X	8.407828	GERD	UG392	Q	0.24639	5.4802E+02
4	820.91	Q	399 X	8.478593	GERD	UG392	Q	0.01384	5.5189E+02
5	820.70	Q	399 X	8.492018	GERD	UG392	Q	0.00177	5.5265E+02
6	820.66	Q	399 X	8.494994	GERD	UG392	Q	0.00046	5.5282E+02

Tabela 3.55: Relatório dos mismatches de cada iteração do fluxo de potência para coordenadas retangulares e com controle de passo. Carga = 81,5%.

III.5 Comparação dos Resultados

A seguir serão apresentadas as tabelas que resumem os resultados obtidos neste trabalho no que se refere ao número de iterações das simulações realizadas para cada caso em cada um dos três sistemas estudados.

SISTEMA DE 11 BARRAS				
Q_8 (MVar)	Polar sem passo	Polar com passo	Retangular sem passo	Retangular com passo
123	9	3	4	4
122	div.	3	4	4
120	8	3	4	4
101	div.	3	4	4

Tabela 3.56: Número de iterações para os diferentes valores de Q_8 e cada uma das formulações utilizadas no sistema de 11 barras.

A tabela acima indica que houve um ganho considerável com a utilização do controle de passo nos casos de $Q_8=122\text{Mvar}$ e $Q_8=101\text{Mvar}$. O problema formulado em coordenadas polares com controle de passo conseguiu convergir em um número menor de iterações se comparado com o método retangular com passo.

O fato de não haver uma diferença considerável entre as formulações retangular com passo e retangular sem passo se deve provavelmente ao fato de o passo calculado não ser ótimo, e sim uma aproximação.

SISTEMA DE 14 BARRAS				
Carga	Polar sem passo	Polar com passo	Retangular sem passo	Retangular com passo
Nominal	2	2	2	2
Limite convergente	5	5	11	7
Divergente	9	9	20	20
50% de sobrecarga	6	20	20	4

Tabela 3.57: Número de iterações para os diferentes carregamentos e para cada uma das formulações utilizadas no sistema de 14 barras.

A tabela mostra que não houve ganhos consideráveis na utilização do controle de passo para a carga nominal. Entretanto o número de iterações diminuiu para o caso limite da convergência em coordenadas retangulares.

SISTEMA DE 45 BARRAS				
Carga	Polar sem passo	Polar com passo	Retangular sem passo	Retangular com passo
Nominal	3	3	4	3
Limite convergente	5	5	6	5
Divergente	20	20	20	9
50% de sobrecarga	4	20	20	6

Tabela 3.58: Número de iterações para os diferentes carregamentos e para cada uma das formulações utilizadas no sistema de 45 barras.

Os resultados indicam um ganho na utilização do controle de passo no cálculo em carga nominal e limiar de convergência, para coordenadas retangulares, quando comparado com o caso sem passo. No caso da formulação polar não houve ganhos consideráveis no que se refere ao número de iterações.

Capítulo IV

Conclusões

IV.1 Considerações Gerais

Primeiramente, a observação dos resultados torna claro que houve um ganho na utilização do método de Iwamoto, aplicado da forma como foi descrita neste trabalho, sobre o processo de cálculo do fluxo de potência, para todos os três sistemas utilizados.

Com base nos resultados obtidos no caso de 11 barras, e com a comparação desses resultados com os obtidos em [2] pode-se notar que não houve diferenças no tocante ao número de iterações em que o sistema converge, tanto para o caso sem passo como o caso com passo. Isto significa que as aproximações feitas no cálculo do controle de passo com a matriz jacobiana expandida, utilizado no método de fluxo de potência modificado, não influenciaram significativamente no resultado final do cálculo.

No caso da formulação convencional de Iwamoto, quando um sistema é divergente, o multiplicador ótimo vai para zero. Entretanto, tanto nos demais métodos (Castro, Scudder, Scudder por Castro e Duarte) quanto no método proposto por esse trabalho, os valores de alpha tendem a zero. Essa diferença se deve às aproximações e adaptações ao método de Iwamoto. Os relatórios apresentados neste trabalho mostram que, no caso de o sistema ser divergente, os valores de alpha indicam claramente esse comportamento. Tais valores foram destacados nos relatórios através de um círculo vermelho.

No que se refere às diferenças de aproximação no cálculo de alpha entre as formulações polares e retangulares, não fica evidente nenhum ganho real de uma formulação sobre a outra. Para os sistemas de 11 barras, a convergência no caso polar com passo se deu em menor ou igual número de iterações que no caso retangular com passo, assim como nos sistemas de 14 e 45 barras com cargas até o limiar de convergência. Após o limiar de convergência, as trajetórias do sistema com alpha formulado em coordenadas retangulares são muito mais consistentes do que o caso polar, em que os valores das tensões das barras ficam “perdidos”, explodindo para valores absurdos e sem uma trajetória definida.

IV.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Neste item, são brevemente apresentadas algumas idéias, através de observações que foram feitas no decorrer desse trabalho, para pesquisas que podem ser desenvolvidos futuramente, no sentido de dar continuidade às pesquisas iniciadas por este projeto.

- No gráfico das trajetórias do sistema sobrecarregado (figura 3.63), apesar de divergir, a formulação retangular com controle de passo apresentou um comportamento aproximado as tensões das barras do último caso convergente (figura 3.44). Essa convergência, entretanto, se deu para valores impossíveis no sistema elétrico. Seria interessante averiguar se, com a utilização de limitações nos valores de tensão nas barras, o método apontaria para os valores limites do sistema.
- Averiguar o motivo da diferença de desempenho entre a formulação em coordenadas polares e retangulares (sem passo).
- Realizar as simulações descritas neste trabalho em sistemas de grande porte e radiais
- Cálculo do M.O. para fluxo de potência formulado em injeção de correntes e com tensões em coordenadas polares e retangulares.

Referências

- [1] A. J. Monticelli, “Fluxo de carga em redes de energia elétrica”, 1 ed. São Paulo, SP, Editora Edgard Blucher Ltda., 1983.
- [2] R. M. A. dos Santos, “Utilização do controle de passo ótimo na solução do problema de fluxo de potência incorporando a modelagem de transformadores LTCs”, *Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [3] A. Manzoni, “Desenvolvimento de um sistema computacional orientado a objetos para sistemas elétricos de potência: aplicação à simulação rápida e análise da estabilidade de tensão”, *Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [4] C. A. Castro e L. M. C. Braz, “Uma nova abordagem para a solução do problema de fluxo de carga pelo método de Newton com otimização de passo”, *SBA Controle e Automação*, vol. 8, no. 3, set., out., Nov. e dezembro 1997
- [5] S. S. Hazan e C. L. T. Borges, “Análise de Sistemas de Potência”, Apostila de ASP, DEE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [6] H. Schildt, “C++ Guia para iniciantes”, 1 ed. Rio de Janeiro, RJ Editora Ciência Moderna, 2002
- [7] D. S. Ramos e E. M. Dias, “Sistemas elétricos de potência – volume II”, 1 ed. São Paulo, SP, Editora Guanabara II, 1983
- [8] C. A. Castro, L. M. C. Braz, e C. A. F. Murari, “ A critical evaluation of step size optimization based load flow methods”, *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 202-207, February 2000.
- [9] S. Iwamoto e Y. Tamura, “A load flow calculation method for ill-conditioned power systems”, *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, 1981.

[10] J. M. Scudder e F. L. Alvarado, discussão de [9].

[11] V. T. Duarte, J. L. R. Pereira, V. M. da Costa, “Uma nova proposta para o cálculo de fluxo de potência para sistemas mal condicionados”, Anais do XIII Congresso de Automática – CBA, PP. 885-889, Setembro 2000.