UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

Gustavo Mundim Caixeta

USO DO MÉTODO CCT PARA A AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAGERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

São Carlos
2015

Gustavo Mundim Caixeta

USO DO MÉTODO CCT PARA A AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Caixeta, Gustavo Mundim
C133u Uso do método CCT para a avaliação dos impactos da geração distribuída na estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica / Gustavo Mundim Caixeta; orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Geração distribuída. 2. Estabilidade de tensão. 3. Transformação em componentes de canal. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: **Gustavo Mundim Caixeta**

Título: "Uso do método CCT para a avaliação dos impactos da geração distribuída na estabilidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 27 / 11 / 2015,

com NOTA 9,2 (nove , dois), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. Daniel Petean - (IFSP - Campus Sertãozinho)

Mestre Anna Giuglia Menechelli Moraco - (Doutoranda - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

Agradecimentos

"Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de realizar meu sonho. Agradeço aos meus amados pais, José Wilson e Vânia, pelo apoio, incentivo e por toda dedicação. A meus irmãos Marina e Ricardo pelo companheirismo. A toda minha família, aqueles que estão presentes e aqueles que estão junto de Deus. A todos os meus professores que me influenciaram a ser engenheiro. Aos meus amigos, que fiz ao longo de toda essa trajetória, pelo apoio. Aos meus companheiros de infância, do COLUNI e do CAASO. E às demais pessoas, que torceram por mim, e pelo meu sucesso e que, de alguma forma, me ajudaram a chegar até aqui!".

Resumo

CAIXETA, G.M. *Uso do Método CCT para a Avaliação Dos Impactosda Geração Distribuídana Estabilidadede Tensãoem Sistemasde Distribuiçãode EnergiaElétrica.* Trabalho de conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

O aumento do número de geradores distribuídos conectados nos sistemas de distribuição de energia elétrica faz aumentar a necessidade de estudos dos impactos que este tipo de geração traz ao sistema elétrico. Um destes impactos que ainda necessitam de um estudo mais amplo é como a geração distribuída afeta a estabilidade de tensão dos sistemas de distribuição. Neste contexto durante este projeto de formatura foi desenvolvido um estudo para avaliar o impacto da geração distribuída na estabilidade de tensão do sistema. Mais especificamente foi utilizado um sistema de distribuição como modelo, a estabilidade deste sistema foi primeiramente estudada sem a presença de geração distribuída, e posteriormente foi inserido um gerador distribuído para que assim fosse possível comparar os dois cenários. Para avaliar a estabilidade do sistema foi utilizado o método de transformação em componentes de canal(*CCT*, do Inglês *ChannelComponentsTransform*). Este método tem a capacidade de transformar um sistema complexo constituído de várias cargas e vários geradores em sistemas mais simples constituídos de apenas um gerador e uma carga, desta forma a análise dos sistemas equivalentes mais simples mostra o comportamento do sistema complexo original. Foi observado que a inserção do gerador distribuído no sistema de distribuição estudado contribui para melhorar as condições de estabilidade deste sistema.

Palavras-chave:geração distribuída, estabilidade de tensão, transformação em componentes de canal.

Abstract

CAIXETA, G.M. *Using CCT Method for Assessment of Embedded Generation on Voltage Stability of Power DistribuitionSistems.* Trabalho de conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

The increasing number of embedded generators connected to the electrical power distribution system entails the need for studies exploring their impact on this system more broadly. One such example—and this is the focus of this final course assignment—is the effect of the distributed generation on voltage stability in distribution systems. More specifically, a distribution system was used as a model, and the stability of this system was studied at first without an embedded generator, and then, in its presence, thus allowing their comparison. In order to evaluate the system's stability, the Channel Components Transform (CCT) was used. This method has the capacity to turn a complex system, consisting of various loads and various generators, into simple systems containing only one generator and one load. As such, the analysis of the equivalent simpler systems shows the original complex system behavior. It was observed that the insertion of the embedded generator in the studied distribution system helps improve the stability of the system.

Keywords: embedded generation, voltage stability, channel components transform.

Lista de Figuras

Figura 1: Rede de dois terminais contendo uma fonte e uma carga. 6
Figura 2: Comportamento da potência em função da relação$\boldsymbol{ZL/ZC}$. 7
Figura 3: Relação entre $\boldsymbol{P}$ e $\boldsymbol{VC}$ (curva *PV*)..... 8
Figura 4: Curvas *PV* para diferentes valores de fator de potência..... 9
Figura 5: Sistema elétrico de potência genérico contendo m geradores e n cargas..... 13
Figura 6: Representação da decomposição de um sistema elétrico em varias redes..... 15
Figura 7: Acoplamento das cargas dos canais devido à transformação. 17
Figura 8: Circuito de canal modificado com uma fonte de corrente representando o acoplamento das cargas. 18
Figura 9: Circuito de canal equivalente..... 18
Figura 10: Sistema de distribuição com geração distribuída..... 23
Figura 11: Sistema sem geração distribuída..... 23
Figura 12: Curvas *PV* para o Canal 1 para o sistema sem geração distribuída. 32
Figura 13: Curvas *PV* para o Canal 2 para o sistema sem geração distribuída. 33
Figura 14: Curvas *PV* para o Canal 3 para o sistema sem geração distribuída. 34
Figura 15: Curvas *PV* para o Canal 4 para o sistema sem geração distribuída. 35
Figura 16: Curvas *PV* para o Canal 5 para o sistema sem geração distribuída. 36
Figura 17: Margem de canal em função do carregamento (c) para os cinco canais..... 37
Figura 18: Queda de tensão normalizada em função do carregamento (c) para os cinco canais. 38
Figura 19: Curvas *PV* para o Canal 1 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*. 39
Figura 20: Curvas *PV* para o Canal 2 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*. 40
Figura 21: Curvas *PV* para o Canal 3 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*. 41
Figura 22: Curvas *PV* para o Canal 4 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*. 42
Figura 23: Curvas *PV* para o Canal 5 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*. 43
Figura 24: Margem de canal em função do carregamento (c) para os cinco canais para o caso com GD com controle de potência reativa. 44
Figura 25: Queda de tensão normalizada em função do carregamento (c) para os cinco canais para o caso com GD com controle de potência reativa. 45
Figura 26: Curvas *PV* para o Canal 1 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*. 46
Figura 27: Curvas *PV* para o Canal 2 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*. 47
Figura 28: Curvas *PV* para o Canal 3 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*. 48
Figura 29: Curvas *PV* para o Canal 4 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*. 49
Figura 30: Curvas *PV* para o Canal 5 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*. 50

Figura 31: Margem de canal em função do carregamento (c) para os cinco canais para o caso com GD com controle de tensão. 51
Figura 32: Queda de tensão normalizada em função do carregamento (c) para os cinco canais para o caso com GD com controle de tensão..... 52

Sumário

1 Introdução 1
1.1 Objetivos 2
1.2 Organização do Documento 2
2 Geração Distribuída 3
3 Estabilidade de Tensão 5
4 Método *CCT* 13
4.1 Características das cargas dos canais 16
4.2 Modificação dos circuitos de canal 17
4.3 Obtenção das Curvas *PV* no Domínio dos Canais 18
4.4 Análise dos canais críticos 19
4.4.1 Identificação Baseada Nas Margens de Canal 19
4.4.2 Identificação Baseada na Queda de Tensão Normalizada 20
5 Aplicação do método *CCT* 23
5.1 Modelagem do sistema 24
5.1.1 Modelagem do sistema sem geração distribuída 24
5.1.2 Modelagem com o gerador distribuído 29
6 Resultados 31
6.1 Sistema sem geração distribuída 31
6.2 Sistema com geração distribuída 38
6.2.1 Geração com controle de potência reativa 39
6.2.2 Geração com controle de tensão 45
7 Conclusões 53
8 Referências Bibliográficas 55

1 Introdução

Nos últimos anos com o aumento do interesse por fontes de médio e pequeno porte, a redução do custo de geração de energia a partir de pequenos centros, a desregulamentação do setor elétrico, a busca por uma maior confiabilidade no abastecimento de energia entre outros fatores, fizeram emergir a chamada geração distribuída. Este tipo de geração caracteriza-se por pequenos centros de geração conectados diretamente na rede de distribuição de energia e não são despachados de forma centralizada.

Este tipo de geração pode trazer grandes impactos no sistema elétrico. Estes impactos podem ser positivos, como a diminuição das perdas nas redes de transmissão e de distribuição, ou negativos, como o aumento de harmônicos causados por geradores conectados na rede elétrica via dispositivos de eletrônica de potência. Alguns impactos, porém, não são muito explorados, este é o caso da estabilidade de tensão, que em geral não é algo estudado para sistemas de distribuição, mas o aumento da geração distribuída pode despertar o interesse em relação a este tema.

Estabilidade de tensão basicamente é a capacidade de um sistema elétrico de potência manter as tensões de regime em todas as barras de um sistema sob condições normais de operação e depois de ser submetido a algum tipo de distúrbio [1]. Está intimamente relacionada com o limite da capacidade de potência que este sistema pode suprir para as cargas e o quão próximoa operação está deste limite. A análise de estabilidade para sistemas simples, compostos de uma fonte geradora e uma carga conectados através de uma linha é relativamente simples, mas para sistemas mais complexos esta análise se torna muito mais complicada.

Os métodos tradicionais para a avaliação da estabilidade utilizam análise de fluxo de carga. Quando o fluxo de carga não converge mais, é encontrado o limite de máxima transferência de potência. Para um estudo completo, no entanto, utilizam-se técnicas que modificam o equacionamento do fluxo de carga para fazer o chamado fluxo de carga continuado. Estas técnicas, no entanto, exigem, em geral, um grande esforço computacional [2]. Diante disso, o método de componentes de canal (*CCT*) é sugerido em [2] para estudos de estabilidade de tensão. Este método tem a capacidade de transformar um sistema complexo em vários sistemas simples e independentes entre si, desta forma é possível analisar a estabilidade em cada um destes sistemas separadamente e então obter informações da estabilidade no sistema como um todo [2].

1.1 Objetivos

Diante do contexto apresentado, o objetivo deste projeto de formatura é avaliar o impacto da geração distribuída na estabilidade de tensão de sistemas de distribuição de energia elétrica através do uso do método de transformação em componentes de canal *CCT*. Mais especificamente será utilizado um sistema de distribuição como exemplo, e o método *CCT* será utilizado para avaliar a estabilidade do sistema sem geração distribuída, análise das curvas *PV*, e posteriormente será inserido um gerador no sistema para avaliar as mudanças observadas nas curvas *PV*.

1.2 Organização do Documento

Este documento está organizado como descrito a seguir:

- No capítulo 2 é feita uma breve explicação sobre a geração distribuída, serão apresentadas algumas características de sistemas com GD e as diferenças em relação a sistemas de distribuição comuns e sistemas de transmissão de energia.Além disso, serão mostradas vantagens e desvantagens deste tipo de sistema e aspectos que merecem ser analisados quando existem sistemas com GD;
- No capítulo 3 é apresentado é apresentado o problema de estabilidade de tensão e a principal ferramenta utilizada na análise de estabilidade de tensão, que é a curva *PV* do sistema;
- No capítulo 4 é feita uma explicação a respeito do método da transformação em componentes de canal (*CCT*). Será apresentado todo o equacionamento necessário para a aplicação de método bem como as dificuldades que se encontra na aplicação deste método, será apresentada ainda a metodologia necessária para analisar a estabilidade de tensão através da *CCT*, como por exemplo, a construção das curvas *PV* no domínio dos canais;
- No capítulo 5 será apresentado o sistema utilizado para o estudo da questão abordada neste projeto de formatura, neste capítulo ainda será feito todo o equacionamento necessário para adequar o sistema ao método de transformação em componentes de canal;
- No capítulo 6 serão apresentados os resultados obtidos da aplicação do método ao sistema elétrico, mais especificamente serão apresentadas as curvas *PV* para o sistema sem GD e para o sistema com GD. Neste caso ainda serão apresentadas as curvas para os casos de geração com controle de tensão e com controle de potência reativa;
- Por fim no capítulo 7 são apresentadas as conclusões obtidas deste estudo.

2 Geração Distribuída

Os sistemas elétricos de potência presentes no mundo foram em sua maioria desenvolvidos no século XX e foram concebidos de maneira a se diferenciar os segmentos de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia.

A geração é o segmento responsável pela conversão de grandes blocos de energia de diferentes fontes, como hidráulica ou combustíveis fósseis, por exemplo, em energia elétrica. Uma vez que as fontes de energia estão longe dos grandes centros de consumo é necessário transmitir esta energia convertida. Isto fica a cargo dos sistemas de transmissão.

Uma vez que esta energia chega a grandes centros consumidores como cidades, ela precisa ser distribuída para os consumidores finais. Isto é chamado de distribuição. Enquanto a transmissão conecta vários geradores a vários consumidores através de uma rede malhada, o sistema de distribuição conecta uma subestação de energia, que liga o sistema de distribuição ao sistema de transmissão, aos consumidores finais.

Este arranjo de sistemas de potência é bastante eficiente e tem a virtude de poder ser controlado e despachado de maneira centralizada, garantindo o transporte de energia a grandes distâncias.

No entanto existe um crescente interesse na conexão de geradores na rede de distribuição de energia elétrica. Este tipo de conexão é a chamada geração distribuída.

Embora não haja um consenso geral sobre o que define exatamente a geração distribuída, os principais institutos de pesquisa na área concordam sobre alguns aspectos da geração distribuída como [3]:

- Não planejada de forma centralizada;
- Não despachada de forma centralizada;
- Normalmente menor que 50-100MW;
- Normalmente conectada aos sistemas de distribuição.

Alguns países definem legislações específicas sobre a geração distribuída. No Brasil a ANEEL através dos módulos 3, 4 e 8 do PRODIST [4] regulamenta o uso da geração distribuída, além disso, cada concessionária de energia possui suas próprias regras.

As principais motivações para o uso de geração distribuída são o aumento da possibilidade de utilização de fontes renováveis de energia, a possibilidade de pequenos produtores de energia venderem a energia que produzem para a rede de distribuição, e o

aumento da confiabilidade de plantas industriais garantindo o suprimento de energia elétrica a cargas essenciais no caso de perda da conexão com a rede de distribuição.

A grande utilização de geradores de energia conectados diretamente na rede de distribuição acarreta em diversos impactos para o sistema. Estes impactos, que podem ser tanto positivos como negativos, devem ser estudados para entender a viabilidade da geração distribuída.

Entre os impactos negativos das fontes de geração distribuída pode-se citar [3]:

- A injeção de harmônicos, no caso de geração com necessidade de eletrônica de potência, como a geração fotovoltaica;
- Aumento das incertezas quanto à necessidade de produção de energia pelo sistema centralizado;
- Possibilidade de ilhamento, que deve ser evitada.

Entre os impactos positivos podem ser citados:

- A diminuição da energia a ser gerada a partir a partir dos grandes geradores, postergando a necessidade de novos empreendimentos de grande porte;
- O aumento da geração através de fontes renováveis como a fotovoltaica;
- Diminuição da perda devido à transmissão de energia a longas distâncias;
- Aproveitamento de fontes que antes eram ignoradas como o bagaço de cana, utilizado para cogeração;
- Diminuição da fatura de energia para os produtores de energia que vendem para a rede de energia elétrica.

Um aspecto, porém, ainda não muito explorado da geração de energia na rede é o impacto na estabilidade de tensão da rede de distribuição. A estabilidade de tensão, que será detalhada melhor no capítulo 3, refere-se à possibilidade de o sistema entrar em colapso devido ao grande aumento da potência demandada pelas cargas, que pode causar um grande e irreversível afundamento na tensão da rede.

Alguns trabalhos como [5], [6] e [7] apresentam estudos em que se analisa este tipo de impacto em sistemas de distribuição com geração distribuída. Neste projeto de formatura propõe-se a utilização do método da Transformação em Componentes de Canal *(CCT)*,apresentado no capítulo 4, para este tipo de análise.

3Estabilidade de Tensão

De acordo com [1] estabilidade de tensão é a capacidade de um sistema elétrico de potência manter as tensões de regime em todas as barras sobre condições normais de operação e depois de ser submetido a algum tipo de distúrbio. Um sistema entra em instabilidade de tensão quando acontece um distúrbio, um aumento de demanda de carga ou mudança nas condições do sistema que causa uma progressiva e incontrolável queda na tensão. O principal fator causador de instabilidade é a inabilidade do sistema de potência atender a demanda de potência reativa.

Um critério para a estabilidade de tensão é que, para uma dada condição de operação para todas as barras do sistema, a magnitude da tensão aumenta como aumento da injeção de potência reativa na mesma barra. Um sistema é instável se, para pelo menos uma barra no sistema, a magnitude da tensão decresce com o aumento da injeção de potência reativa na mesma barra.

Uma progressiva queda de tensão em uma barra pode estar associada também com a estabilidade de ângulo do sistema. Por exemplo, se o ângulo de rotor entre dois grupos de máquinas se aproximar ou exceder 180°, isto resultaria em tensões muito baixas em pontos intermediários do sistema. Por outro lado, o tipo de queda sustentada de tensão relatada em instabilidade de tensão ocorre quando a estabilidade de ângulo do rotor não é o problema [1].

Instabilidade de tensão é essencialmente um fenômeno local, entretanto, suas consequências podem tem um impacto generalizado. Já o colapso de tensão é mais complexo do que uma simplesmente uma instabilidade de tensão e é usualmente o resultado de uma sequência de eventos combinados de instabilidade de tensão levando a um perfil de baixa tensão em uma parte significativa do sistema de potência.

Instabilidade de tensão pode acontecer de diferentes maneiras. De forma simplificada pode ser ilustrada considerando a rede de dois terminais da figura 1. Esta rede consiste de uma fonte de tensão suprindo uma carga (Z_C)através de uma impedância série (Z_L).

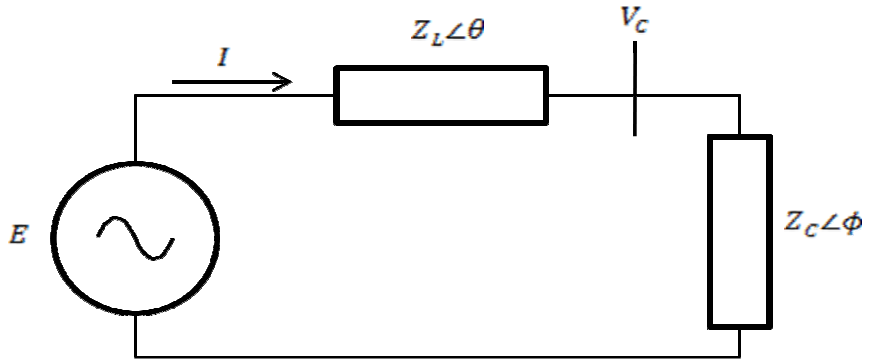

Figura 1: Rede de dois terminais contendo uma fonte e uma carga.

A expressão para a corrente é

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{Z_L\angle\theta + Z_C\angle\phi} \tag{1}$$

O módulo da corrente é dado por:

$$I = \frac{E}{\sqrt{\left(Z_L cos(\theta) + Z_C cos(\phi)\right)^2 + \left(Z_L sen(\theta) + Z_C sen(\phi)\right)^2}} \tag{2}$$

Ou

$$I = \frac{E}{\sqrt{F} \cdot Z_L} \tag{3}$$

Sendo,

$$F = 1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos\left(\theta - \phi\right) \tag{4}$$

A tensão na carga V_C é dada por

$$V_C = Z_C \cdot I = \frac{E \cdot Z_C}{\sqrt{F} \cdot Z_L} \tag{5}$$

Por sua vez a potência entregue a carga será

$$P = V_C \cdot I = \frac{Z_C}{F}\left(\frac{E}{Z_L}\right)^2 \cos\left(\phi\right) \tag{6}$$

Construindo o gráfico da potência normalizada em função da impedância da carga normalizada (Z_C/Z_L) tem-se o seguinte comportamento.

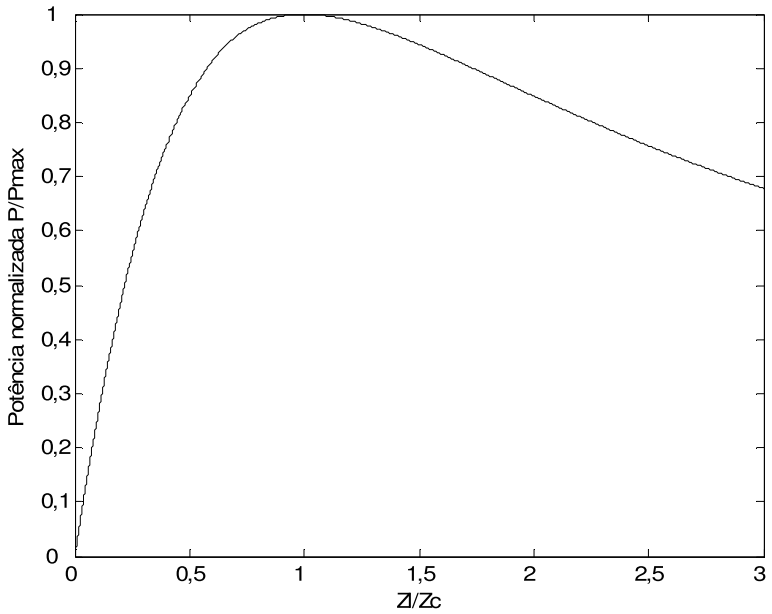

Figura 2: Comportamento da potência em função da relaçãoZ_L/Z_C.

Como pode serobservado na figura 2, a demanda de carga aumenta pelo decréscimo de Z_C,Pcresce rapidamente no início, depois mais devagar até atingir um máximo, depois começa a cair.

A potência é máxima quando a queda de tensão na linha é igual em magnitude a V_C, isto é, quando $Z_L/Z_C = 1$. Como Z_C decresce gradualmente,I cresce e V_C cresce, e consequentemente P cresce rapidamente com o decréscimo de Z_C. Quando Z_C se aproxima de Z_L, o efeito de crescimento de I é significaivamente maior que o efeito de decrescimento de V_C. Quando Z_C é menor que Z_L, o decrescimento de V_C domina sobre o crescimento de I, e o efeito é uma queda de P.

A condição crítica de operação correspondente à potência máxima representa o limite de operação satisfatória. Para uma maior demanda de carga, o controle de potência pela variação de carga seria instável; isto é, um decréscimo na impedância de carga reduziria a potência. Se a tensão cair progressivamente,dependendo das características da carga, o sistema se tornará instável. Com uma característica de impedância constante para a carga, a tensão e a potência do sistema se estabilizam em valores menores que os desejados. Por outro lado, com uma característica de potência constante o sistema se torna instável através do colapso na tensão da barra de carga. Com outras características, a estabilidade de tensão é determinada pela composição das características das linhas de transmissão e da carga. Se a carga é suprida por

transformadores de tap automático, este dispositivo vai tentar aumentar a tensão. Isto tem o efeito de diminuir o efeito de Z_C. Isto reduz o valor de V_C ainda mais e conduz a uma progressiva redução na tensão.

Uma forma interessante de analisar a estabilidade de tensão é através da relação entre P e V_C. Isto é mostrado na figura 3 para o sistema em análise quando o fator de potência é 0,95 atrasado. O ponto em que a potência é máxima é chamado de ponto crítico. Neste ponto um a tentativa de aumentar a potência pode causar uma queda de tensão progressiva e levar a um colapso de tensão.A queda de tensão em uma linha de transmissão é uma função tanto da potência ativa quanto da potência reativa do sistema, portanto o fator de potência tem um impacto significativo na relação entre tensão e potência do sistema. Isto também pode ser observado através das equações (4), (5) e (6).

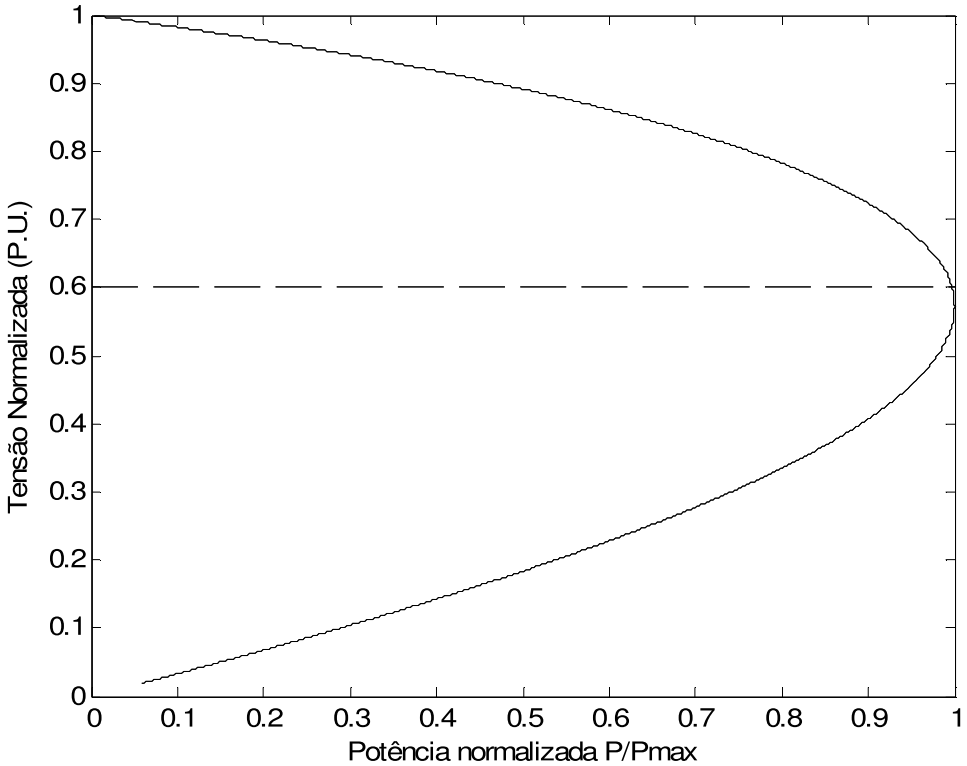

Figura 3: Relação entre P e V_C (curva PV).

A figura 4 mostra, para o sistema da figura1, curvas de V_C por P, para diferentes valores de fator de potência. A menor curva representa fator 0,9 atrasado e a maior representa 0,9 adiantado. Normalmente, apenas os pontos de operação acima do ponto crítico representam condições satisfatórias de operação. Uma repentina redução no fator de potência (aumento de Q) pode causar uma mudança do sistema de uma condição estável de operação para uma condição não satisfatória, e possivelmente instável representada pela parte de baixo da curva PV.

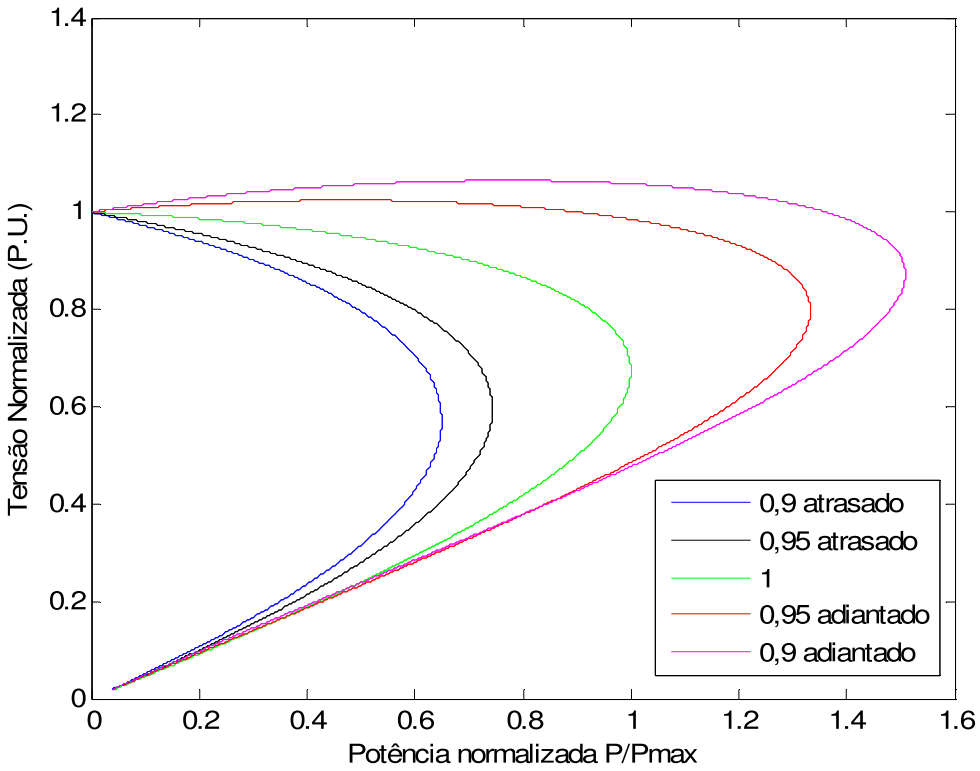

Figura 4: Curvas *PV* para diferentes valores de fator de potência.

Em outras palavras o sistema tem um limite inerente acerca da potência que pode ser transmitida. Operar o sistema próximo a este limite pode ser arriscado já que um pequeno distúrbio pode resultar em um colapso de tensão no sistema. A margem de estabilidade do sistema pode ser investigada usando as curvas *PV*. A distância entre o ponto de operação e o nariz da curva *PV* determina o quão perto o sistema está de um colapso. Se a margem de estabilidade está abaixo de um valor especificado (tipicamente 5%), o sistema é considerado em perigo e ações deveriam ser levadas em conta para melhorar a estabilidade[1].

A descrição do fenômeno de instabilidade de tensão feita até agora é básica e procura ajudar na classificação e entendimento de diferentes aspectos da estabilidade de sistemas de potência. Esta análise foi limitada a um sistema radial porque apresenta um simples porém claro retrato do problema de estabilidade de tensão. Em sistemas práticos complexos muitos fatores contribuem para o processo de colapso do sistema causado pela instabilidade de tensão como robustez do sistema de transmissão; nível de transferência de potência; características das cargas; limites de capabilidade dos geradores; e características dos compensadores de potência reativa. Em alguns casos, o problema é agravado pela ação descoordenada de controladores e sistemas de proteção [1].

Para efeito de análise, é útil classificar estabilidade de tensão nas duas seguintes subclasses:

a) A estabilidade de tensão para grandes distúrbios está preocupada com a habilidade do sistema em controlar as tensões depois de um grande distúrbio tal como faltas, perdas de geração, ou contingências do sistema. Esta habilidade é determinada pelas características do sistema e das cargas e das interações controles e proteções continuas e discretas. A determinação de deste tipo de estabilidade requer a analise da dinâmica não linear de um sistema em um período de tempo suficiente para capturar as interações tanto dos dispositivos quanto dos transformadores de tap automáticos e limitadores da corrente de campo dos geradores. O período de estudo de interesse pode variar de alguns segundos a dezenas de minutos. Desta forma, simulações dinâmicas de longa duração são necessárias.Um critério para estabilidade de grandes distúrbios é: dado um distúrbio e dadas as ações de controle deste sistema, as tensões em todas as barras do sistema atingem níveis aceitáveis em regime permanente.

b) A estabilidade de tensão para pequenos distúrbios está preocupada com a habilidade de controle das tensões dado pequenas perturbações no sistema tais como mudanças incrementais nas cargas do sistema. Esta forma de estabilidade é determinada pela pala característica das cargas, controles contínuos e controles discretos a um dado instante de tempo. Este conceito é útil para determinar, para qualquer instante, como as tensões do sistema irão se comportar devido a pequenas mudanças do sistema.
Os processos que contribuem para instabilidades para pequenos distúrbios são essencialmente de natureza de regime permanente. Portanto, análises estáticas podem ser usadas de forma eficaz para determinar margens de estabilidade, identificar fatores que influenciam a estabilidade, e examinar a ampla variedade de condições do sistema e o grande número de cenário após a contingência.Um critério para estabilidade de tensão para pequenos distúrbios é: dada uma condição de operação para todas as barras do sistema, a magnitude de tensão aumenta enquanto a injeção de potência reativa na mesma barra aumenta. Um sistema é instável se, para pelo menos uma barra do sistema, a magnitude da tensão cai com o aumento da injeção de potência reativa na mesma barra.

Instabilidade de tensão nem sempre ocorre de maneira isolada. Frequentemente instabilidades de ângulo e tensão andam juntas. Uma pode levar a outra e a distinção entre elas pode ser difícil. Entretanto esta distinção é importante para o entendimento das causas fundamentais dos problemas para desenvolver procedimentos de operações adequadas.

O método apresentado neste trabalho tem por objetivo tratar da análise de estabilidade de tensão para pequenos distúrbios, uma vez que se trata de método para sistemas em regime permanente [2].

Embora a estabilidade de tensão como mostrado anteriormente seja um problema típico de sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, o estudo para sistemas de distribuição com geração distribuída pode ser interessante, principalmente na análise da potência máxima que o sistema pode transmitir às cargas. Dessa forma,o possível aumento da capacidade de transferência de potênciacausado pela presença da geração distribuída, pode contribuir no sentido de adiar, em condições emergenciais, investimentos na expansão da rede de distribuição.

4 Método Transformação em Componentes de Canal

O método de transformação em componentes de canal baseia-se no teorema de que uma matriz qualquer $[Z]$ pode ser decomposta como $[Z] = [T]^{-1} \cdot [\Lambda] \cdot [T]$, sendo $[\Lambda]$ uma matriz diagonal em que os componentes da diagonal principal são os autovalores da matriz $[Z]$,e $[T]$ são os autovetores à direita de $[\Lambda]$.

Em [2], o método *CCT* foi empregado para avaliar a estabilidade de tensão em sistemas transmissão de energia elétrica. De acordo com sua formulação, um sistema elétrico qualquer contendo *n* cargas e *m* geradores, como na figura 5, pode ser descrito como um circuito equivalente de Thèvenin generalizado, representado por (7).

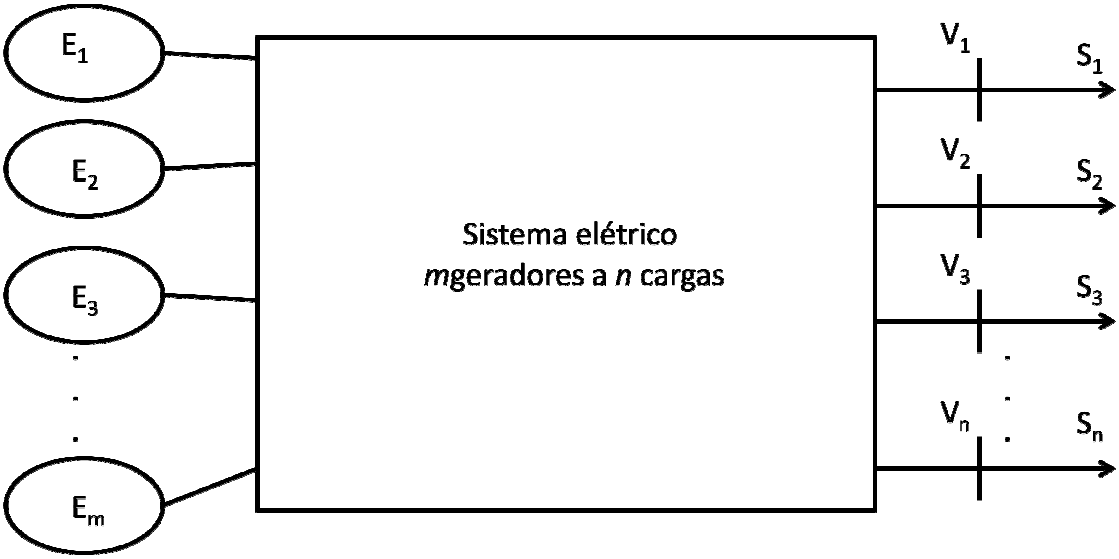

Figura 5: Sistema elétrico de potência genérico contendo m geradores e n cargas.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & . & K_{1m} \\ K_{21} & . & . & . \\ . & . & . & . \\ K_{n1} & . & . & K_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & . & Z_{1m} \\ Z_{21} & . & . & . \\ . & . & . & . \\ Z_{n1} & . & . & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

De forma compacta, a equação (7) pode ser reescrita como (8).

$$[V] = [K] \cdot [E] - [Z] \cdot [I] \tag{8}$$

sendo $[V]$ o vetor das tensões nodais nas cargas, $[E]$ o vetor das tensões terminais dos geradores presentes no sistema elétrico, $[Z]$ a matriz de impedâncias do sistema, $[I]$ o vetor das injeções de

corrente nas barras de carga, obtido através da relação entre a potência aparente (S) e a tensão de cada carga e $[K]$ representa uma matriz de incidência dos geradores, ou seja, a influência de cada gerador na tensão de cada carga.

Aplicando na matriz $[Z]$, a decomposição apresentada anteriormente, resulta em (9).

$$[V] = [K] \cdot [E] - [T]^{-1} \cdot [\Lambda] \cdot [T] \cdot [I] \tag{9}$$

Pré-multiplicando ambos os membros de (9) por $[T]$ tem-se:

$$[T] \cdot [V] = [T] \cdot [K] \cdot [E] - [T] \cdot [T]^{-1} \cdot [\Lambda] \cdot [T] \cdot [I] \tag{10}$$

A equação (10) pode ser simplificada fazendo $[T] \cdot [V] = [U]$; $[T] \cdot [K] \cdot [E] = [F]$ e $[T] \cdot [I] = [J]$, resultando em (11).

$$[U] = [F] - [\Lambda] \cdot [J] \tag{11}$$

A representação matricial de (11) é dada por (12).

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \dots \\ J_n \end{bmatrix} \tag{12}$$

A equação (12) mostra que uma rede complexa, completamente acoplada (ver equação (7)) pode ser matematicamente decomposta em várias redes compostas por uma única fonte de tensão (gerador) e carga, como representadas na figura 6. Em (11) e (12), a matriz $[U] = [T] \cdot [V]$ é denominada de tensão modal, $[J] = [T] \cdot [I]$ de corrente modal e $[F] = [T] \cdot [K] \cdot [E]$ de fonte de tensão modal.

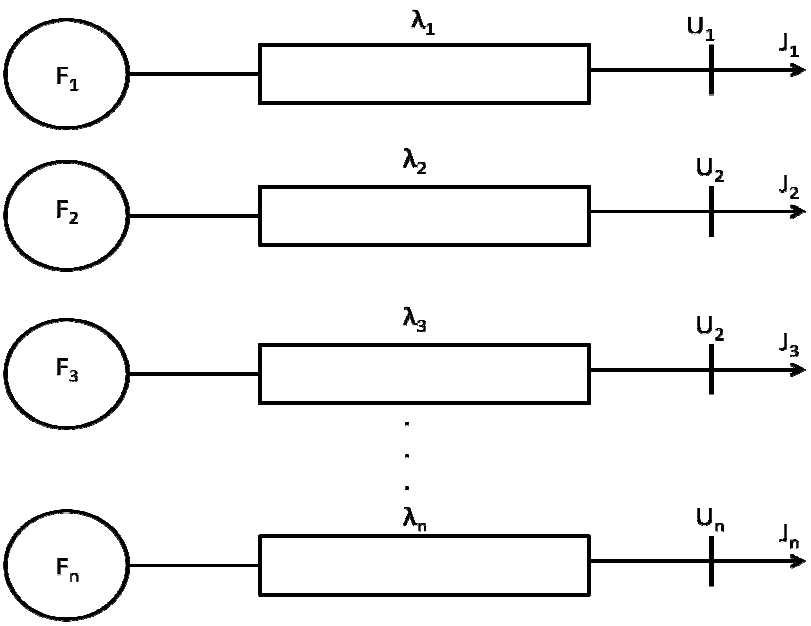

Figura 6: Representação da decomposição de um sistema elétrico em varias redes.

Cada uma das linhas do sistema (12) está associada a um canal U_i ($i = 1, 2, \ldots n$) e percebe-se que os canais são desacoplados, facilitando o processo de solução. Cada linha da equação matricial (12) pode ser interpretada como uma carga com corrente J_i, com tensão terminal U_i sendo alimentada por uma fonte F_i por meio de uma linha de impedância λ_i. Além disso, cada canal contém informações diferentes e importantes acerca do problema em estudo [2].

O sistema que antes era visto como complexo pode, agora, ser interpretado como vários sistemas radiais simples e como visto na seção 3 a análise de estabilidade para este tipo de sistema é mais simples que para um sistema mais complexo.

Uma grande dificuldade deste método, no entanto, é que ele não fornece um resultado previsível, isto é, para cada sistema os canais terão significados diferentes, isto acontece porque na decomposição $[Z] = [T]^{-1} \cdot [\Lambda] \cdot [T]$ a matriz $[T]$ tem valores que dependem de $[Z]$, diferentemente do método de componentes simétricos, por exemplo, em que se sabe de antemão o significado de cada componente. Como a decomposição em canais trará resultados diferentes para cada sistema especificado, a formulação de uma análise literal torna-se muito complicada. Por isso neste projeto foi utilizado um exemplo numérico para avaliar a estabilidade de tensão utilizando a transformação em componentes de canal.

4.1 Características das cargas dos canais

A vantagem da transformação em componentes de canal é que ela é capaz de desacoplar sistemas que anteriormente eram acoplados. No entanto ao se aplicar esta transformação para cargas, que são desacopladas umas das outras, o resultado é um equivalente de cargas acopladas [2]. Por exemplo, seja um conjunto de cargas do tipo impedância constante de um determinado sistema. A relação entre tensão e corrente para estas cargas pode ser dada pela seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{L1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{L2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{Ln} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \tag{13}$$

Ou de forma compacta:

$$[V] = [Z_L][I] \tag{14}$$

Aplicando-se a transformação em componentes de canal para a expressão (14), utilizando a matriz de transformação $[T]$ do sistema em que as cargas estão conectadas tem-se que:

$$[T][V] = [T][Z_L][T]^{-1}[T][I] \tag{15}$$

$$[U] = [Z_C][J] \tag{16}$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{C11} & Z_{C12} & \dots & Z_{C1n} \\ Z_{C21} & Z_{C22} & \dots & Z_{C2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{Cn1} & Z_{Cn2} & \dots & Z_{Cnn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} \tag{17}$$

Ou

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{C11} & Y_{C12} & \dots & Y_{C1n} \\ Y_{C21} & Y_{C22} & \dots & Y_{C2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{Cn1} & Y_{Cn2} & \dots & Y_{Cnn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \tag{18}$$

Isto mostra que o método *CCT* promove o acoplamento das cargas do sistema no domínio dos canais. No entanto, é mostrado em[2] que este os termos fora da diagonal principal têm uma magnitude significativamente menor que os elementos da diagonal principal, desta maneira o acoplamento pode ser simplificado como sendo:

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} Y_{C11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{C22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{Cnn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \tag{19}$$

É importante salientar que embora o número de canais encontrados seja o mesmo que o número de cargas isto não significa que cada canal representa um nó de carga. Cada canal possui informações sobre o sistema como um todo, e esta informação deve ser analisada para cada sistema em que o método for aplicado.

4.2 Modificação dos circuitos de canal

Como visto através da expressão (17) na seção anterior ao se aplicar a *CCT* tem-se um acoplamento das cargas no domínio dos canais. Isto pode ser representado como na figura 7 a seguir.

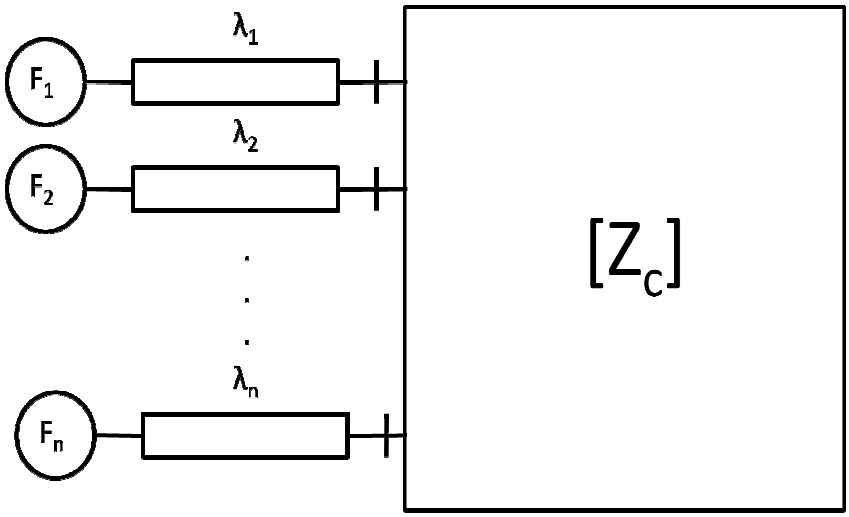

Figura 7: Acoplamento das cargas dos canais devido à transformação.

Isto pode ser simplificado fazendo-se a carga de cada canal como um equivalente composto da corrente modal $[J_i]$ mais uma corrente modal J_{Ei} devido ao acoplamento com os outros canais. Esta corrente pode ser expressa por:

$$\begin{bmatrix} J_{E1} \\ J_{E2} \\ \vdots \\ J_{En} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{C11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{Cnn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{E1} \\ U_{E2} \\ \vdots \\ U_{En} \end{bmatrix} \tag{20}$$

Isto pode ser interpretado como a soma da corrente modal e de uma fonte de corrente que depende do acoplamento das cargas do domínio de canal como na figura 8 a seguir.

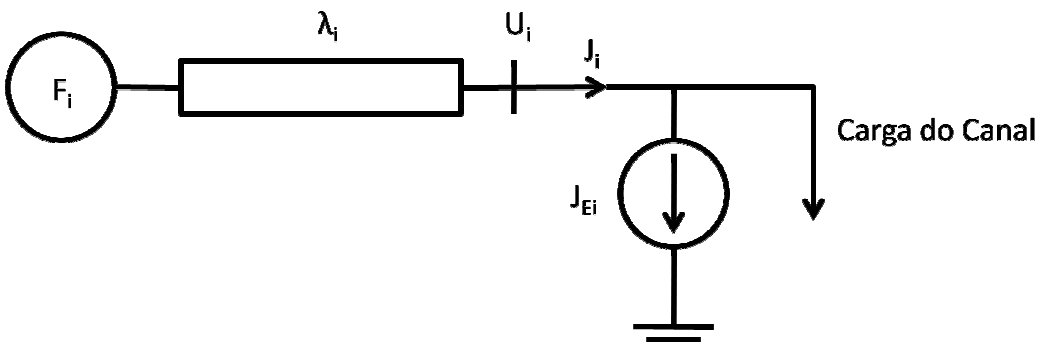

Figura 8: Circuito de canal modificado com uma fonte de corrente representando o acoplamento das cargas.

Esta corrente modal J_{Ei} provoca um efeito de queda na tensão modal U_i que pode ser transferida para a fonte de tensão modal F_i através de um equivalente dado por:

$$F_{eqi} = F_i - \lambda_i \cdot J_{Ei} \tag{21}$$

O circuito equivalente pode ser visto na figura 9 a seguir.

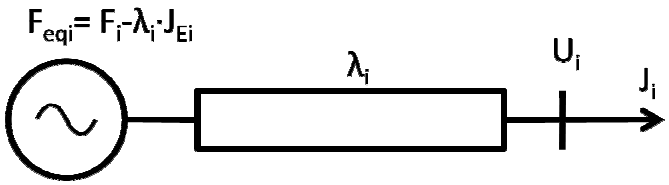

Figura 9: Circuito de canal equivalente.

Para o uso da transformação em componentes de canal no estudo da estabilidade de tensão, portanto é necessário proceder da seguinte maneira [2]:

1. Calculam-se os estados do sistema para um determinado ponto de operação.
2. Calcula-se a impedância de cada carga neste ponto de operação$Z_{Li} = V_i/I_i$.
3. Obtêm-se o valor de Y_C.
4. Calcula-se J_{Ei}.
5. Obtém o circuito equivalente pelo calculo de $[F_{eqi}]$.
6. Obtém as curva *PV* como será mostrado na seção 4.3.

4.3 Obtenção das Curvas *PV* no Domínio dos Canais

Não é fácil obter as curvas *PV* para sistemas de potência reais. Em sistemas de transmissão existem muitas cargas conectadas a muitos geradores interconectados por um complexo sistema de transmissão. Já sistemas de distribuição embora radiais e, portanto, teoricamente mais simples, acabam se tornando mais complexos com a inserção de geração distribuída. Estas características dificultam a obtenção das curvas *PV*. Por outro lado usando-se

a transformação em componentes de canal pode-se transformar um sistema complexo em redes simples desconectadas. As curvas destas redes podem, então, ser facilmente obtidas.

Já que o circuito de cada canal é um circuito de apenas um ramo, pode-se encontrar as curvas *PV* no domínio de canal através da equação (22) a seguir.

$$U_i^4 + U_i^2\left[2(P_iR_i + Q_iX_i) - F_{eqi}^2\right] + |\lambda_i|^2\left(P_i^2 + Q_i^2\right) = 0 \qquad (22)$$

Em que U_i é a tensão modal do i-ésimo canal, P_i e Q_i são respectivamente as potências ativa e reativa do canal, R_i e X_i são a parte real e imaginária de λ_i e F_{eq} é a fonte de tensão modal equivalente do i-ésimo canal. F_{eq}é diferente da fonte de tensão modal original porque como visto na seção 4.2 é necessário uma correção de F_i devido ao acoplamento das cargas promovido pela transformação.

O procedimento, portanto, para encontrar as curvas *PV* no domínio dos canais é feito a partir do fluxo de carga aplicado ao estudo do sistema, então se aplica o método *CCT* para se encontrar as variáveis de canal para este ponto de operação e depois usa-se a equação (22) para a obtenção das curvas *PV* para cada canal e repete-se o estudo para diferentes pontos de operação.

O resultado será, portanto, *n* famílias de curvas, sendo *n* o número de cargas do sistema. A análise de estabilidade, porém, não será feita para todos os canais obtidos pela transformação. De fato conforme será mostrado na seção 4.4 a seguir existem critérios para a determinação daqueles canais que melhor representam a estabilidade do sistema. Estes canais são chamados canais críticos.

4.4 Análise dos canais críticos

Como dito na seção anterior, entre os *n* canais obtidos através do método *CCT* alguns representam melhor as condições de estabilidade de tensão. Estes canais são chamados de canais críticos e podem ser considerados os responsáveis pelo colapso de tensão. Desta forma antes de qualquer análise de estabilidade através do método *CCT* deve ser feita a identificação destes canais críticos [2]. Os métodos descritos a seguir podem ser bons indicativos destes canais críticos [2].

4.4.1 Identificação Baseada Nas Margens de Canal

O canal crítico pode ser identificado através da margem de canal, isto é, o canal crítico é aquele com menor margem de canal (semelhante à margem de estabilidade de um sistema

simples). Como o canal se assemelha a um sistema simples, a potência máxima do canal pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$S_{max} = \frac{\left|F_{eqi}\right|^2 \left[|\lambda_i| - \left(X_i sen(\theta_i) + R_i \cos\left(\theta_i\right)\right)\right]}{2[X_i cos(\theta_i) - R_i sen(\theta_i)]^2} \tag{23}$$

Em queθ_i é o ângulo do fator de potência para a carga do i-ésimo canal. Assim a margem de canalMC pode ser obtida através da expressão:

$$MC = \frac{S_{max} - S_{operação}}{S_{operação}} \cdot 100 \tag{24}$$

Em que$S_{operação}$ é potência do canal para o ponto de operação considerado.

4.4.2 Identificação Baseada na Queda de Tensão Normalizada

Outra maneira de identificar o canal crítico é através da queda normalizada da tensão. O ponto crítico de operação pode ser derivado a partir da condição singularidade da matriz Jacobiana da equação (22). Por outro lado, se a fonte de tensão F_{eqi} for considerada a barra referência do sistema de duas barras, a singularidade da matriz Jacobiana pode ser derivada do determinante da matriz Jacobiana.

$$Det(Jacobiana) = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} - \frac{\partial P_i}{\partial U_i} \cdot \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = 0 \tag{25}$$

Sendoδ_ia diferença de fase entre F_{eq} e U_i.

A singularidade acima pode ser escrita para um sistema de duas barras como:

$$U_i cos(\delta_i) = \frac{F_{eq}}{2} \Rightarrow \Delta U_{di} = \frac{F_{eqi}}{2} \tag{26}$$

Em queΔU_d é a componente de eixo direto da queda de tensão projetada na fonte de tensão modal F_{eq}. Esta componente pode ser utilizada como parâmetro para determinar as condições de estabilidade do canal. Quanto maior o valor de ΔU_d mais próximo o ponto de operação do canal está do nariz da curva. Quando este ponto de operação atinge o nariz da curva $\Delta U_{di} = \frac{F_{eqi}}{2}$.

Como as magnitudes dos canais são diferentes é preciso normalizar a tensão destes canais para que assim se possa compará-las. Esta normalização se da como se segue:

$$QTN = \frac{\left|F_{eqi}\right| - |U_i|cos(\delta_i)}{\left|F_{eqi}\right|} \cdot 100 \tag{27}$$

Em resumo a queda de tensão normalizada QTN é calculada para todos os canais. Aquele que apresentar maior QTN é o canal crítico.

5 Aplicação do métodoTransformação em Componentes de Canal

A transformação em componentes de canal (*CCT*) não fornece um resultado previsível, isto é, para cada sistema os canais terão significados diferentes, isto acontece porque na decomposição $[Z] = [T]^{-1} \cdot [\Lambda] \cdot [T]$ a matriz [T] tem valores que dependem de [Z]. Esta característica difere, por exemplo, do método de componentes simétricos em que a matriz de transformação em componentes simétricos independe da matriz de impedâncias.

Como a decomposição trará resultados diferentes para cada sistema especificado, a formulação analítica torna-se complexa. Por isso neste projeto será apresentado um exemplo numérico de um sistema de distribuição.O sistema escolhido é o sistema apresentado em [8] que é composto por uma subestação de energia, seis cargas conectadas de forma radial e um gerador distribuído conectado através de um transformador junto à carga 6. Embora o gerador distribuído conectado seja um gerador síncrono, a utilização do método se aplica para outros tipos de geração. Este sistema é representado na figura 10 a seguir. As informações sobre o sistema estão contidas no anexo A.

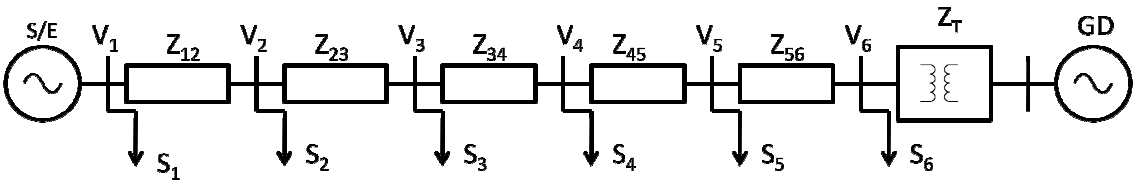

Figura 10: Sistema de distribuição com geração distribuída.

Para avaliar o impacto da geração distribuída na estabilidade de tensão deste sistema o mesmo será considerado primeiramente sem o gerador distribuído como na figura 11 a seguir e posteriormente este gerador será considerado.

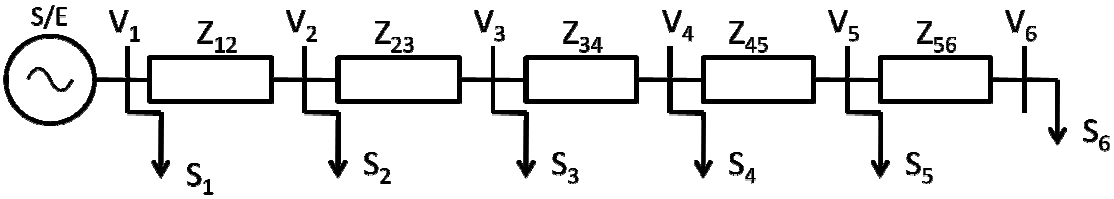

Figura 11: Sistema sem geração distribuída.

Os valores das impedâncias deste sistema são:

$$Z_{12} = (0{,}2812 + j1{,}2659)\Omega$$

$$Z_{23} = (0{,}2499 + j1{,}1252)\Omega$$

$$Z_{34} = (0{,}1562 + j0{,}7033)\Omega$$

$$Z_{45} = (0{,}1249 + j0{,}5626)\Omega$$

$$Z_{56} = (0{,}09375 + j0{,}4219)\Omega$$

5.1 Modelagem do sistema

O primeiro passo para a modelagem do sistema é encontrar uma equação equivalente à equação (7) que descreva o sistema mostrado nas figuras 10 e 11. Para isso é preciso analisar o circuito através das leis de Kirchhoff e Ohm. Outra alternativa é analisar diretamente através da matriz Y_{BUS} do sistema, a qual relaciona as tensões em cada barra com as correntes injetadas na mesma.

5.1.1 Modelagem do sistema sem geração distribuída

As equações que regem o sistema da figura 11 sem geração distribuídasão dadas por:

$$V_1 = E_{S/E} \tag{28}$$

$$V_2 = V_1 - Z_{12} \cdot I_{12} \tag{29}$$

$$V_3 = V_2 - Z_{23} \cdot I_{23} \tag{30}$$

$$V_4 = V_3 - Z_{34} \cdot I_{34} \tag{31}$$

$$V_5 = V_4 - Z_{45} \cdot I_{56} \tag{32}$$

$$V_6 = V_5 - Z_{56} \cdot I_{56} \tag{33}$$

Em que I_{12}é a corrente que circula no ramo entre os nós 1 e 2, I_{23} é a corrente que circula no ramo entre os nós 2 e 3 e assim por diante e $E_{S/E}$ é a tensão na subestação.

Reescrevendo as equações (28) a (33) tem-se:

$$V_2 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot I_{12} \tag{34}$$

$$V_3 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot I_{12} - Z_{23} \cdot I_{23} \tag{35}$$

$$V_4 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot I_{12} - Z_{23} \cdot I_{23} - Z_{34} \cdot I_{34} \tag{36}$$

$$V_5 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot I_{12} - Z_{23} \cdot I_{23} - Z_{34} \cdot I_{34} - Z_{45} \cdot I_{56} \tag{37}$$

$$V_6 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot I_{12} - Z_{23} \cdot I_{23} - Z_{34} \cdot I_{34} - Z_{45} \cdot I_{56} - Z_{56} \cdot I_{56} \tag{38}$$

Por outro lado as relações entre as correntes nas linhas e nas cargas são:

$$I_{12} = I_{23} + I_2 \tag{39}$$

$$I_{23} = I_{34} + I_3 \tag{40}$$

$$I_{34} = I_{45} + I_4 \tag{41}$$

$$I_{45} = I_{56} + I_5 \tag{42}$$

$$I_{56} = I_6 \tag{43}$$

Em que I_2é a corrente da carga do nó 2, I_3 é a corrente da carga do nó 3, e assim por diante.

Substituindo as equações (39) a (43) em (34) a (38) tem-se:

$$V_2 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot (I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6) \tag{44}$$

$$V_3 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot (I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6) - Z_{23} \cdot (I_3 + I_4 + I_5 + I_6) \tag{45}$$

$$V_4 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot (I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6) - Z_{23} \cdot (I_3 + I_4 + I_5 + I_6) - Z_{34} \cdot (I_4 + I_5 + I_6) \tag{46}$$

$$V_5 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot (I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6) - Z_{23} \cdot (I_3 + I_4 + I_5 + I_6) - Z_{34} \cdot (I_4 + I_5 + I_6) - Z_{45} \cdot (I_5 + I_6) \tag{47}$$

$$V_6 = E_{S/E} - Z_{12} \cdot (I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6) - Z_{23} \cdot (I_3 + I_4 + I_5 + I_6) - Z_{34} \cdot (I_4 + I_5 + I_6) - Z_{45} \cdot (I_5 + I_6) - Z_{56} \cdot I_6 \tag{48}$$

Fazendo

$$Z_{13} = Z_{12} + Z_{23} \tag{49}$$

$$Z_{14} = Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} \tag{50}$$

$$Z_{15} = Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} + Z_{45} \tag{51}$$

$$Z_{16} = Z_{12} + Z_{23} + Z_{34} + Z_{45} + Z_{56} \tag{52}$$

E reorganizando as equações (44) a (48) em forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot E_{S/E} - \begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{13} & Z_{13} & Z_{13} & Z_{13} \\ Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{14} & Z_{14} \\ Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{15} \\ Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \tag{53}$$

Como a tensão V_1representa a tensão da subestação,ela não foi considerada como tensão na carga. Desta forma a equação (53) é um equivalente de Thèvenin como o mostrado na equação (7).

O valor de Z , em Ohm, é:

$$[Z] = \begin{bmatrix} 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}3873 + 1{,}7437j \\ 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}7316 + 3{,}2936j \\ 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}9468 + 4{,}2623j & 0{,}9468 + 4{,}2623j & 0{,}9468 + 4{,}2623j \\ 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}9468 + 4{,}2623j & 1{,}1189 + 5{,}0373j & 1{,}1189 + 5{,}0373j \\ 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}9468 + 4{,}2623j & 1{,}1189 + 5{,}0373j & 1{,}2480 + 5{,}6185j \end{bmatrix} \tag{54}$$

Uma forma alternativa de se obter esta expressão é através da matriz Y_{BUS}que relaciona as tensões e correntes injetadas nas barras da seguinte maneira:

$$[I] = [Y_{BUS}][V] \tag{55}$$

Ou

$$\begin{bmatrix} I_G \\ -I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \tag{56}$$

Em que I_G é o vetor de correntes nos geradores, I_C o vetor de correntes nas cargas, V_G o vetor de tensões nos geradores e V_L o vetor de tensões nas cargas.

Rearranjando a equação (56)

$$[V_L] = -[Y_4]^{-1} \cdot [Y_3] \cdot [V_G] - [Y_4]^{-1} \cdot [I_C] \tag{57}$$

Desta forma $[K] = -[Y_4]^{-1} \cdot [Y_3]$ e $[Z] = [Y_4]^{-1}$.

A matriz $[Y_{BUS}]$ por sua vez é construída a partir das admitâncias de cada linha. Assim os elementos da diagonal principal desta matriz são a soma das admitâncias dos elementos conectados em cada nó, e os elementos fora da diagonal são os elementos de ligação entre cada nó, com o sinal negativo.

Desta forma a matriz $[Y_{BUS}]$ do sistema sem geração distribuída é dada pela equação (58) a seguir.

$$[Y_{BUS}] = \begin{bmatrix} Y_{12} & -Y_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_{12} & Y_{12}+Y_{23} & -Y_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{23} & Y_{23}+Y_{34} & -Y_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{34} & Y_{34}+Y_{45} & -Y_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{45} & Y_{45}+Y_{56} & -Y_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{56} & Y_{56} \end{bmatrix} \tag{58}$$

Em que Y_{12} é o inverso de Z_{12}, Y_{23} é o inverso de Z_{23}, e assim por diante.

Desta forma

$$[Z] = \begin{bmatrix} Y_{12}+Y_{23} & -Y_{23} & 0 & 0 & 0 \\ -Y_{23} & Y_{23}+Y_{34} & -Y_{34} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{34} & Y_{34}+Y_{45} & -Y_{45} & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{45} & Y_{45}+Y_{56} & -Y_{56} \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{56} & Y_{56} \end{bmatrix}^{-1} \tag{59}$$

E

$$[K] = -\begin{bmatrix} Y_{12}+Y_{23} & -Y_{23} & 0 & 0 & 0 \\ -Y_{23} & Y_{23}+Y_{34} & -Y_{34} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{34} & Y_{34}+Y_{45} & -Y_{45} & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{45} & Y_{45}+Y_{56} & -Y_{56} \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{56} & Y_{56} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -Y_{12} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{60}$$

Para este sistema, portanto tem-se que:

$$[Z] = \begin{bmatrix} 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}3873 + 1{,}7437j \\ 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}7316 + 3{,}2936j \\ 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}9468 + 4{,}2623j & 0{,}9468 + 4{,}2623j & 0{,}9468 + 4{,}2623j \\ 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}9468 + 4{,}2623j & 1{,}1189 + 5{,}0373j & 1{,}1189 + 5{,}0373j \\ 0{,}3873 + 1{,}7437j & 0{,}7316 + 3{,}2936j & 0{,}9468 + 4{,}2623j & 1{,}1189 + 5{,}0373j & 1{,}2480 + 5{,}6185j \end{bmatrix} \tag{61}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{62}$$

Portanto, comparando as equações (53), (54), (61) e (62) percebe-se que ambos os meios para encontrar o equivalente de Thèvenin apresentam o mesmo resultado.

Aplicando a transformação em componentes de canal resulta em:

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 3{,}8416 + 17{,}2946j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}3258 + 1{,}4666j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}1411 + 0{,}6352j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}0776 + 0{,}3495j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}0465 + 0{,}209j \end{bmatrix} \tag{63}$$

5.1.2 Modelagem com o gerador distribuído

Considerando o gerador distribuído conectado através de um transformador de impedância $Z_T = 0{,}2j\ \Omega$ isto é, uma admitância $Y_T = -5{,}0j\ S$, a equação (55) do sistema se torna:

$$\begin{bmatrix} I_{S/E} \\ I_{GD} \\ -I_2 \\ -I_3 \\ -I_4 \\ -I_5 \\ -I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{12} & 0 & -Y_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_T & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_T \\ -Y_{12} & 0 & Y_{12}+Y_{23} & -Y_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{23} & Y_{23}+Y_{34} & -Y_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{34} & Y_{34}+Y_{45} & -Y_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{45} & Y_{45}+Y_{56} & -Y_{56} \\ 0 & -Y_T & 0 & 0 & 0 & -Y_{56} & Y_{56}+Y_T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{S/E} \\ E_{GD} \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (64)$$

Desta forma temos a matriz $[Z]$para o sistema com o gerador distribuído é:

$$[Z] = \begin{bmatrix} 0{,}2673 + 1{,}2212j & 0{,}1605 + 0{,}7567j & 0{,}0938 + 0{,}4664j & 0{,}0405 + 0{,}2342j & 0{,}0004 + 0{,}0600j \\ 0{,}1605 + 0{,}7567j & 0{,}3032 + 1{,}4293j & 0{,}1772 + 0{,}8810j & 0{,}0764 + 0{,}4424j & 0{,}0008 + 0{,}1134j \\ 0{,}0938 + 0{,}4664j & 0{,}1772 + 0{,}8810j & 0{,}2293 + 1{,}1401j & 0{,}0989 + 0{,}5725j & 0{,}0011 + 0{,}1467j \\ 0{,}0405 + 0{,}2342j & 0{,}0764 + 0{,}4424j & 0{,}0989 + 0{,}5725j & 0{,}1169 + 0{,}6766j & 0{,}0013 + 0{,}1734j \\ 0{,}0004 + 0{,}0600j & 0{,}0008 + 0{,}1134j & 0{,}0011 + 0{,}1467j & 0{,}0013 + 0{,}1734j & 0{,}0014 + 0{,}1934j \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 0{,}6999\angle 0{,}18^\circ & 0{,}3001\angle -0{,}49^\circ \\ 0{,}4331\angle 0{,}54^\circ & 0{,}5669\angle -0{,}41^\circ \\ 0{,}2664\angle 0{,}14^\circ & 0{,}7337\angle -0{,}41^\circ \\ 0{,}1330\angle 2{,}71^\circ & 0{,}8672\angle -0{,}42^\circ \\ 0{,}0336\angle\ 12{,}01^\circ & 0{,}9671\angle -0{,}41^\circ \end{bmatrix} \quad (66)$$

Em que $[K]$ mostra a influência da subestação e do gerador distribuído em cada barra.

Aplicando a transformação em componentes de canal (*CCT*)

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 0{,}5887 + 2{,}9538i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}1742 + 0{,}8527i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}0910 + 0{,}4541i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}0516 + 0{,}2634i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}0126 + 0{,}1366i \end{bmatrix} \quad (67)$$

6 Resultados

Uma vez modelado o sistema na forma do equivalente de Thèvenin como na equação (7) e como descrito na seção 5, e depois obtido o resultado da transformação em componentes de canal mostrado nas equações (63) e (67) pode-se proceder ao estudo de estabilidade de tensão utilizando o método *CCT* como descrito na seção 4.2. O procedimento para esse estudo é: cálculo dos estados do sistema para um determinado ponto de operação; cálculo das impedâncias de carga para estes pontos; obtenção dos circuitos equivalentes através do cálculo de F_{eq}e obtenção das curvas *PV* para este ponto de operação.

6.1 Sistema sem geração distribuída

O sistema sem geração distribuída é um simples sistema de distribuição radial. O fluxo de potência para este sistema pode ser facilmente resolvido através do método da varredura [9][10]. Portanto foi desenvolvido um programa no *software*Matlab [11] que realiza este tipo de análise para o sistema estudado. Este método fornece as tensões e as correntes obtidas em cada barra para um dado carregamento do sistema.

Foram utilizados os seguintes valores de potência nas cargas.

$$S_1 = c \cdot (5{,}3 + j2{,}2555)MVA$$

$$S_2 = c \cdot (3{,}9 + j1{,}6636)MVA$$

$$S_3 = c \cdot (3{,}3 + j1{,}406)MVA$$

$$S_4 = c \cdot (2{,}8 + j1{,}1956)MVA$$

$$S_5 = c \cdot (2{,}3 + j0{,}98)MVA$$

$$S_6 = c \cdot (2{,}4 + j1{,}0231)MVA$$

Em que c é um fator de carregamento que foi variado de 1 em 1, de maneira a se observar o resultado de um aumento progressivo da carga, até que o método da varredura não convergisse para um número máximo de iterações definido como 50. O máximo valor de c para que o método convergiu foi 8.

Com as tensões e correntes para cada ponto de operação (para cada c) foi encontrado o valor de F_{eq} e foi encontrada a curva *PV* para cada canal, bem como foi feita a análise para

encontrar os canais críticos como explicado na seção 4.3. As curvas *PV* para os cinco canais do sistema são mostrados nas figuras 12 a 16 a seguir.

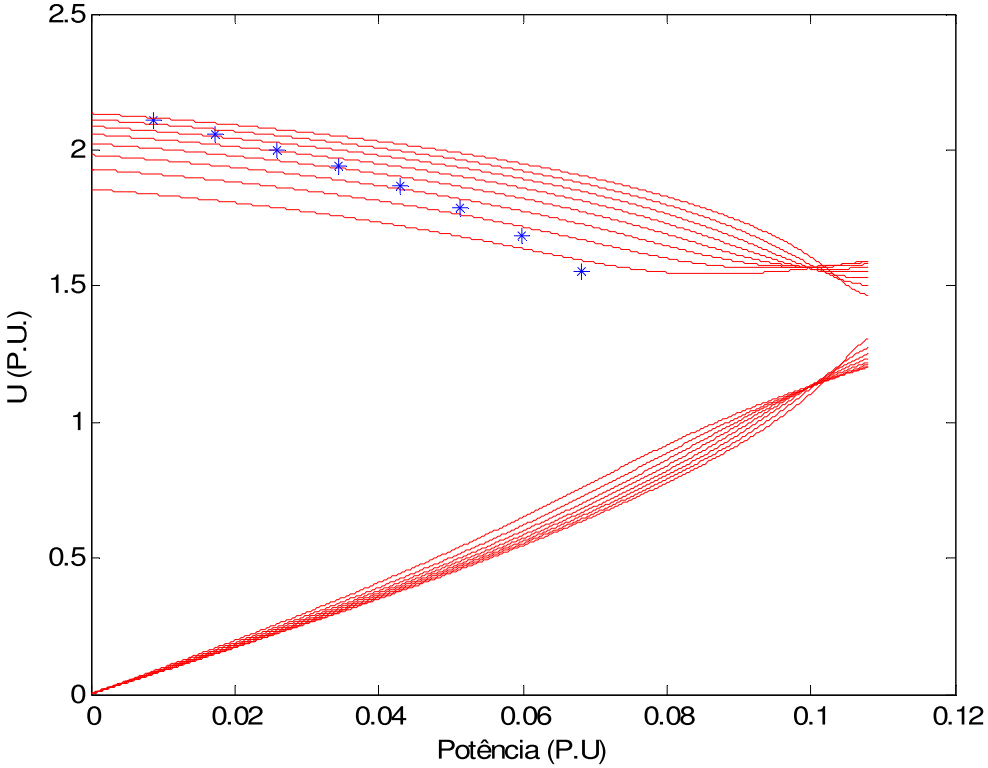

Figura 12: Curvas *PV* para o Canal 1 para o sistema sem geração distribuída.

As curvas em vermelho representam as curvas *PV* do canal 1. O grande número de curvas se deve à necessidade de correção dos canais a cada ponto de operação devido ao acoplamento das cargas, a curva mais externa mostra o menor carregamento enquanto a curva mais interna mostra o maior carregamento; as marcações em "*" representam os pontos de operação dos canais, ou seja,U e P do canal, sendo P a parte real de$S_{operação} = U \cdot J^*$, em que é possível observar que para este canal o ponto de operação se aproxima do nariz da curva à medida que o carregamento aumenta. É possível observar que as curvas não fecham perto do nariz como esperado, isto se deve a imprecisões numéricas que o programa utilizado para a resolução da equação (22). Porém, uma extrapolação das curvas permite encontrar um ponto de operação muito próximo do nariz da curva *PV*.

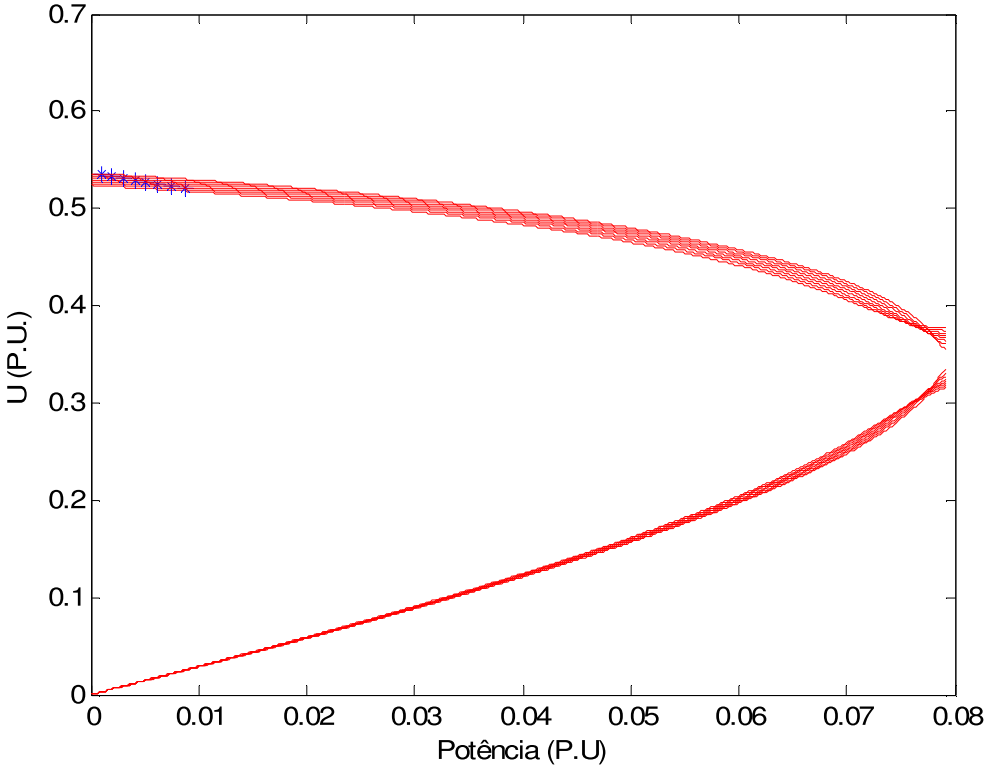

Figura 13: Curvas *PV* para o Canal 2 para o sistema sem geração distribuída.

Para o segundo canal (figura 13), podem ser feitas as mesmas observações que as feitas para o canal 1, no entanto, nota-se que os pontos de operação se mantiveram bastante distantes do nariz da curva, isto pode ser um indicativo de que a margem de canal, que é um dos critérios para a determinação dos canais críticos, é maior em comparação com o canal 1. Análises semelhantes podem ser feitas para os demais canais, cujas curvas *PV* são mostradas nas figuras a seguir.

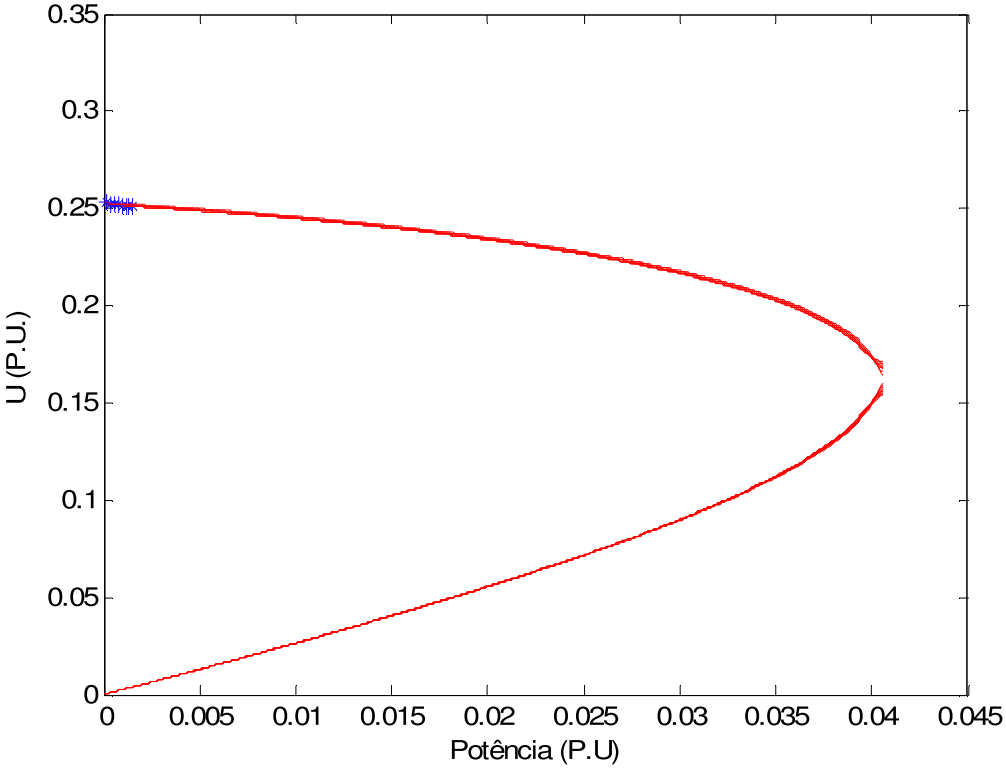

Figura 14: Curvas *PV* para o Canal 3 para o sistema sem geração distribuída.

A figura 14 mostra que para o canal 3 a potência máxima é bem menor que para os canais 1 e 2, isto indica que este canal tem uma capacidade de transmissão menor que os canais anteriores, no entanto os pontos de operação estão ainda mais próximos de zero, o que indica que este canal possui uma margem de canal maior que os canais anteriores.

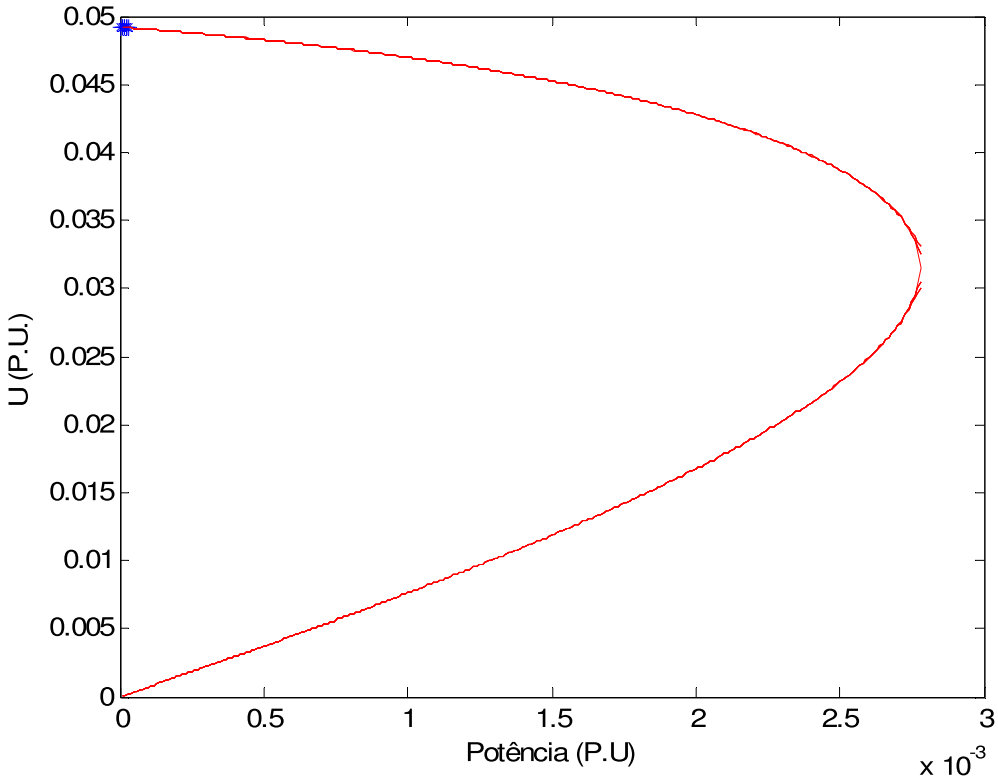

Figura 15: Curvas *PV* para o Canal 4 para o sistema sem geração distribuída.

Os valores máximos das curvas *PV* para o canal 4 são ainda menores que os valores obtidos para o canal 3, os pontos de operação, no entanto também estão ainda mais distantes dos narizes das curvas, o que indica que este canal não deve ser significativo para a análise da estabilidade de tensão para este sistema.

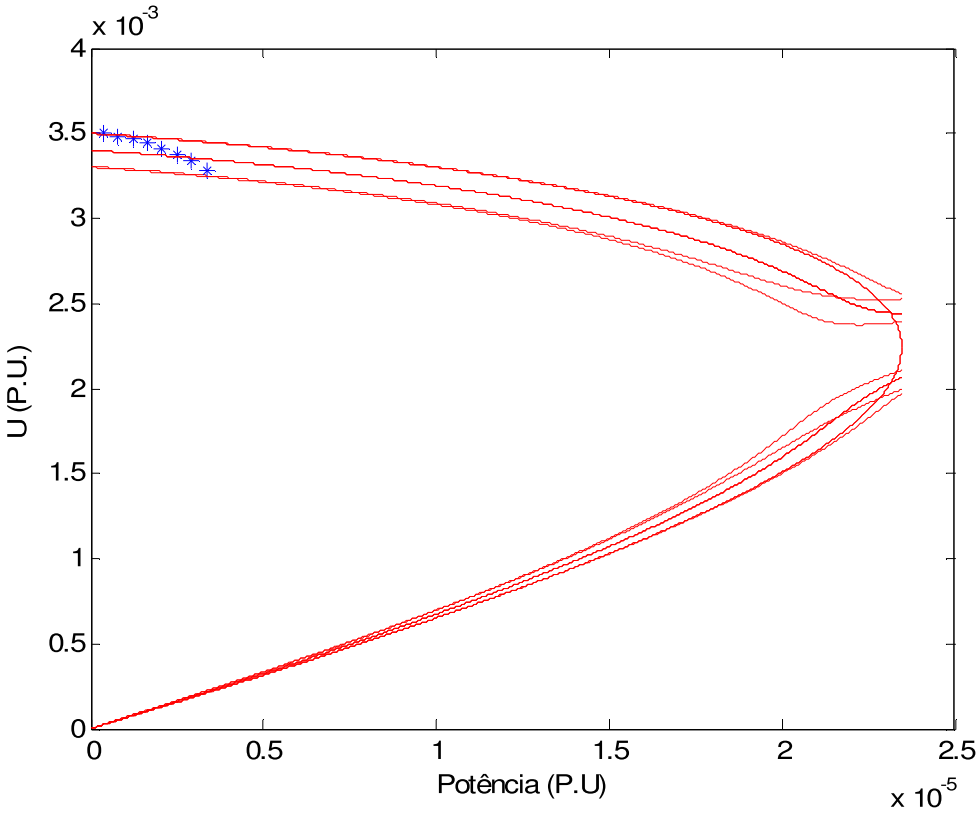

Figura 16: Curvas *PV* para o Canal 5 para o sistema sem geração distribuída.

Analisando a figura 16 observa-se que o canal 5 foi o que apresentou menor potência máxima, ou seja, possui a menor capacidade de transmissão de potência, os pontos de operação do canal também são aparentemente mais significativos que os canais 3 e 4, portanto é necessário a análise dos critérios de determinação do canal crítico para determinar se este é um canal representativo para o sistema.

Os canais críticos foram determinados através dos cálculos da margem de canal e da queda de tensão normalizada equações (24) e (27). Os resultados são mostrados nas figuras 17 e 18 a seguir. Quanto menor a margem de fase, mais representativo é o canal assim como quanto maior a queda de tensão normalizada, maior a representatividade do canal.

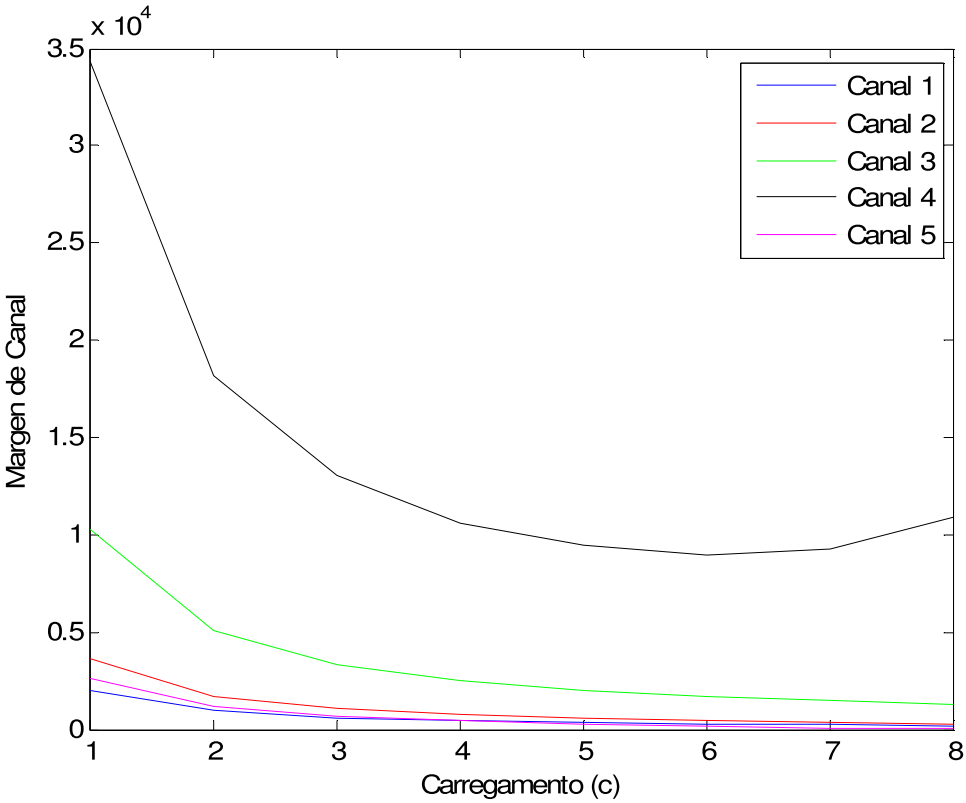

Figura 17: Margem de canal em função do carregamento (c) para os cinco canais.

Como pode ser observado, a análise da margem de fase mostra que o canal mais significativo é o canal 1. A grande magnitude do canal da margem de fase do canal 4 se deve à pequena magnitude da potência aparente de operação ($S_{operação}$) deste canal que, como pode ser observado através das figuras 12 a 16, é a menor de todos os canais em relação ao respectivo S_{max}.

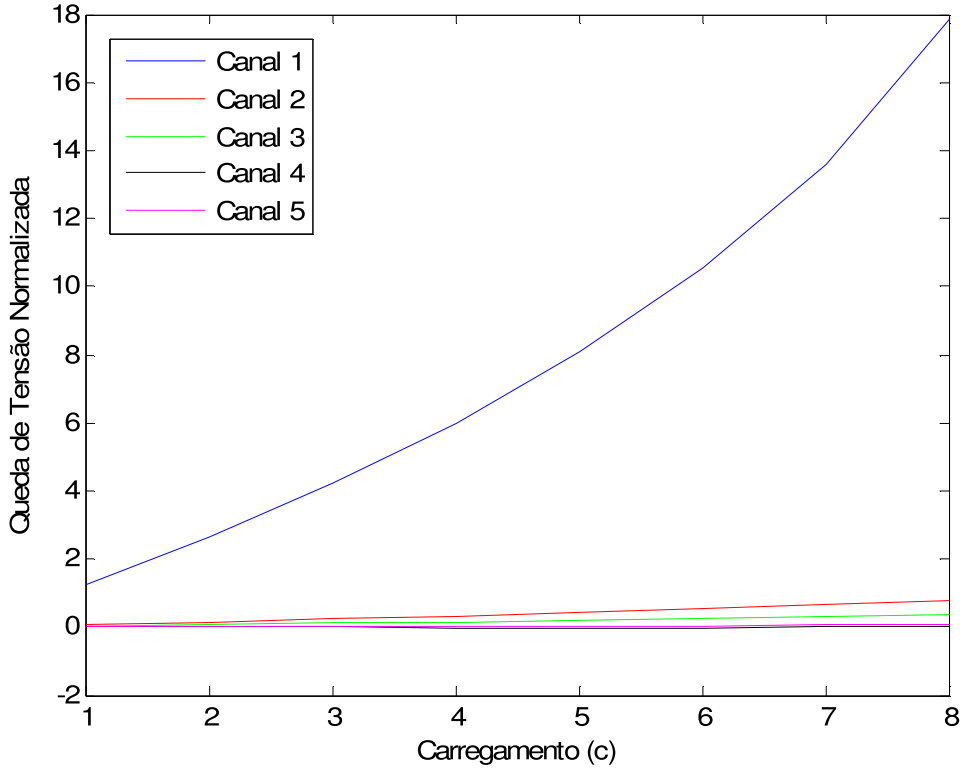

Figura 18: Queda de tensão normalizada em função do carregamento (c) para os cinco canais.

Como pode ser observado, pela análise da queda de tensão normalizada, o canal que representam melhor a estabilidade do sistema é o canal 1. Isto condiz com o observado na avaliação pela margem de canal e com o esperado através da análise visual dos pontos de operação como mencionado anteriormente.

6.2 Sistema com geração distribuída

Para encontrar as tensões e correntes do sistema com geração distribuída foi utilizada a *toolbox SimPowerSystems*do *software*Matlab, que é uma ferramenta para simulação de sistemas de potência.

Os valores de potências utilizados para as cargas foram os mesmos que os usados para a simulação sem o gerador distribuído. E o gerador foi utilizado em dois modos. O primeiro com controle de potência reativa ($Q = 0$) e o segundo com controle de tensão ($V = 1$).

A partir deste ponto o procedimento foi o mesmo para o sistema sem geração distribuída, isto é, cálculo do circuito equivalente obtenção das curvas PV e determinação dos canais críticos.

6.2.1 Geração com controle de potência reativa

Para o primeiro modo com controle de potência reativa as curvas *PV* encontradas são mostradas nas figuras 19 a 23 a seguir.

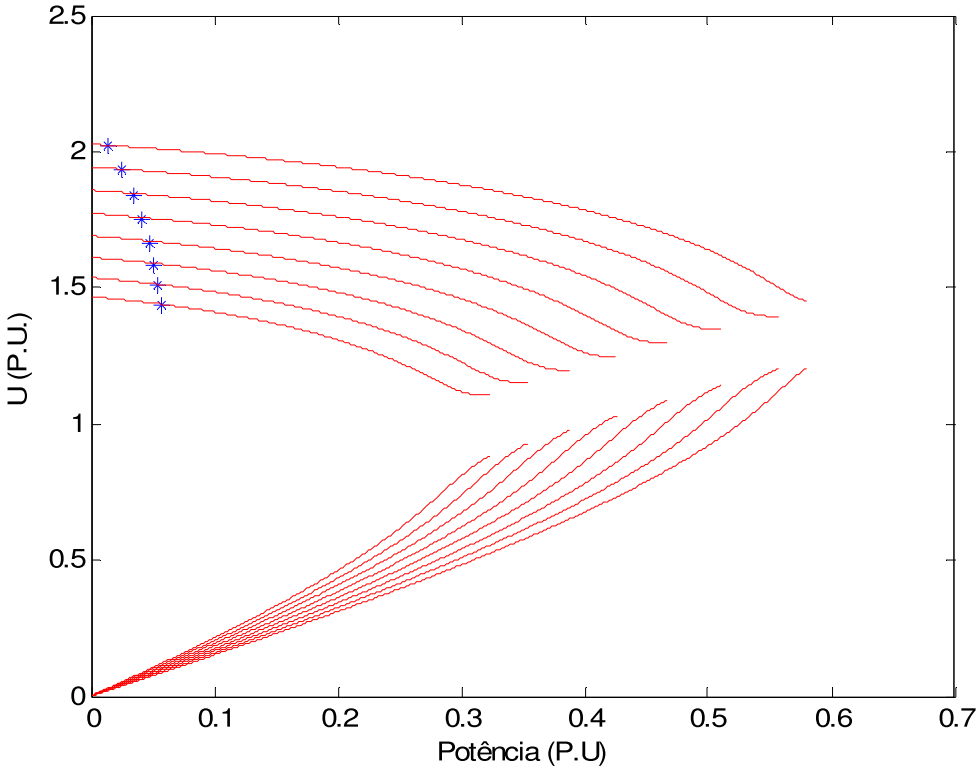

Figura 19: Curvas *PV* para o Canal 1 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*.

Comparando-se as figuras 12 e 19 pode-se notar que o valor da potência máxima do canal aumentou significativamente. Sem o gerador distribuído o este valor era em torno de 0,1 p.u., já o com a inserção do gerador este valor chegou a ficar próximo de 0,6 p.u. Este valor foi bastante afetado pelo carregamento do sistema, no entanto, para o máximo carregamento a potência máxima ficou em torno de 0,3 p.u. Isto indica um aumento da capacidade do sistema de suportar cargas sem entrar em colapso de tensão.

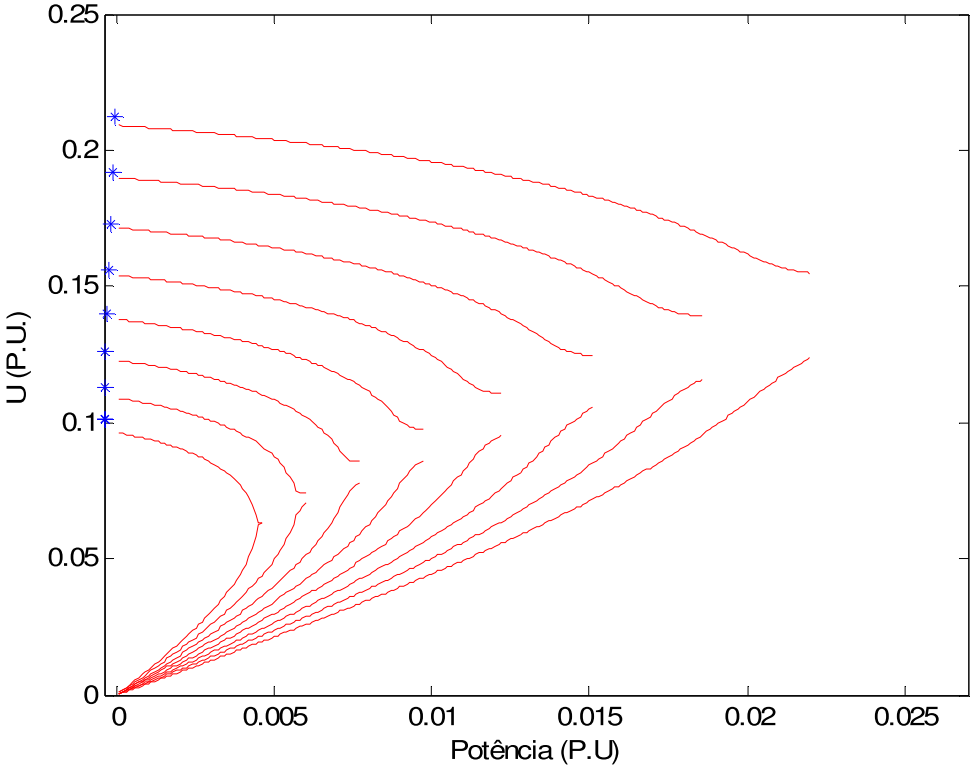

Figura 20: Curvas *PV* para o Canal 2 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*.

Para o canal 2 observa-se umadiminuição do valor de potência máxima, este tipo de comportamento pode ocorrer devido às mudanças na estrutura da rede com o advento do gerador distribuído e do transformador que faz a conexão. Esta diminuição mostra uma diminuição na capacidade de transmissão de potência do canal 2, mas não exatamente do sistema como um todo, pois para analisar o sistema inteiro é necessário avaliar qual é o canal crítico.

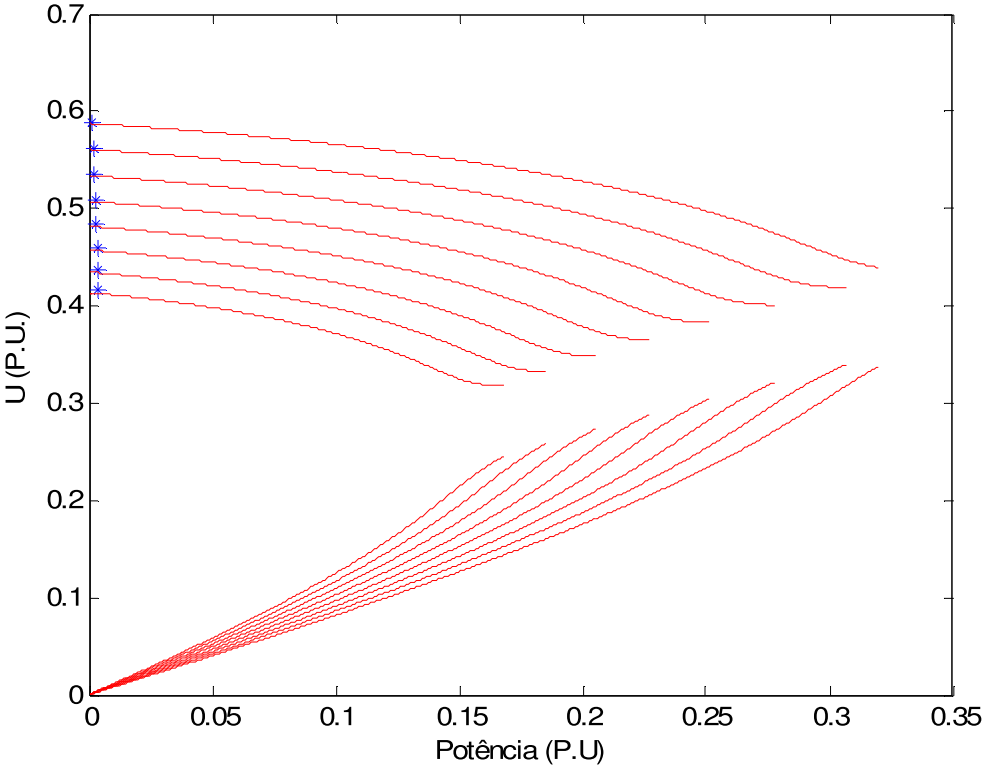

Figura 21: Curvas *PV* para o Canal 3 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*.

O canal 3 mostrou um significativo aumento na capacidade de transmissão de potência em relação ao caso que não havia a geração distribuída, no entanto, para que este aumento possa ser considerado representativo para o sistema é necessário analisar se este é um canal crítico. A análise dos pontos de operação do canal, por outro lado, sugere que este não é um canal crítico.

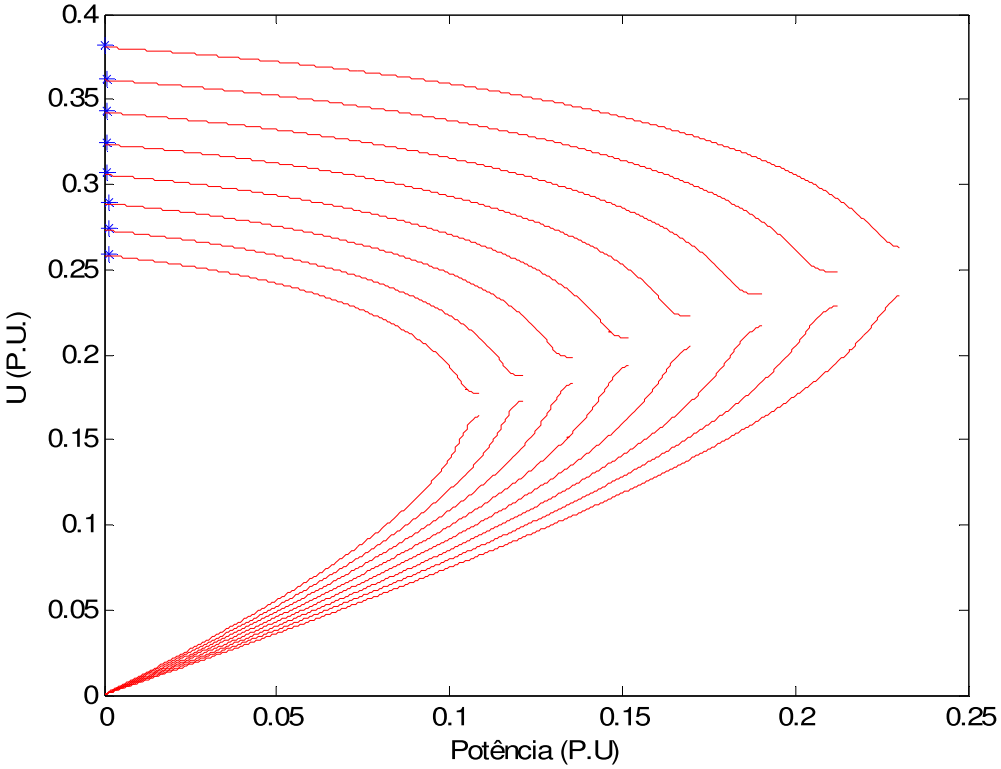

Figura 22: Curvas *PV* para o Canal 4 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*.

O canal 4 também apresentou uma melhora na capacidade de transmissão de potência, assim como os canais 1 e 3. No entanto, os pontos de operação deste canal aparentemente não são significativos, mostrando que este canal não é, provavelmente, significativo para a análise da estabilidade de tensão. Outro ponto a se destacar é que também para este canal o carregamento do sistema afetou bastante as curvas *PV*.

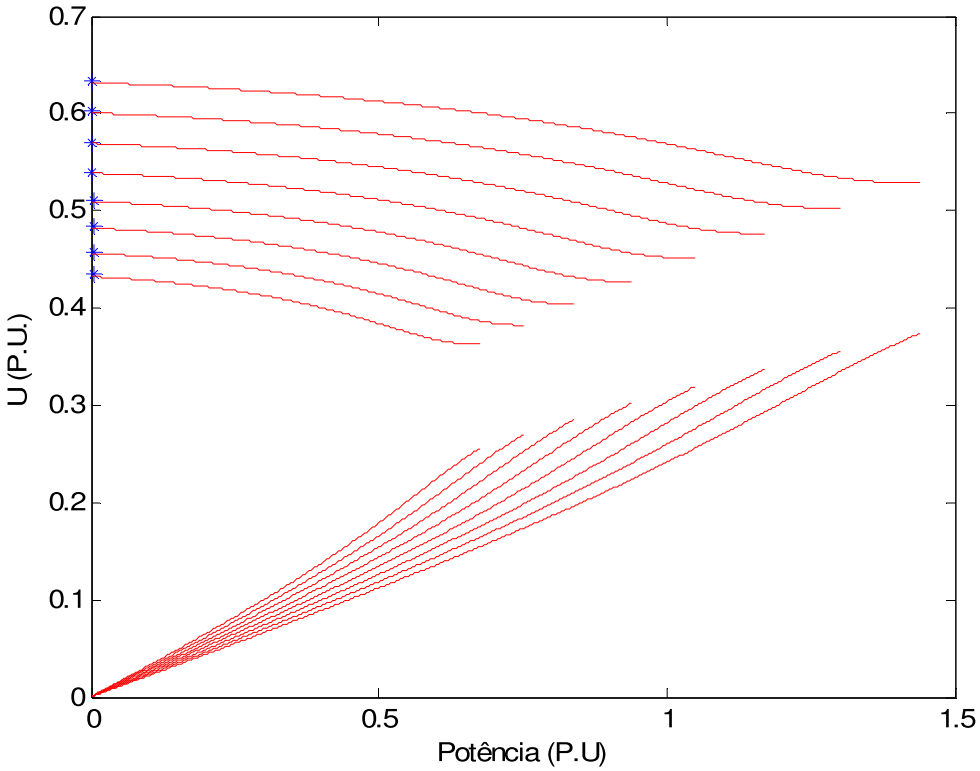

Figura 23:Curvas *PV* para o Canal 5 para o sistema com geração distribuída e controle de *Q*.

Dentre os cinco canais do sistema, aquele que apresentou maior ganho na potência máxima foi o canal 5, como pode indicado na figura 23. Entretanto para se entender melhor o comportamento do sistema é necessário analisar aquele canal que melhor representa o sistema, ou seja, o canal crítico.

Os critérios para determinar o canal críticos, margem de canal e queda de tensão normalizada, são mostrados nas figuras 24 e 25 a seguir.

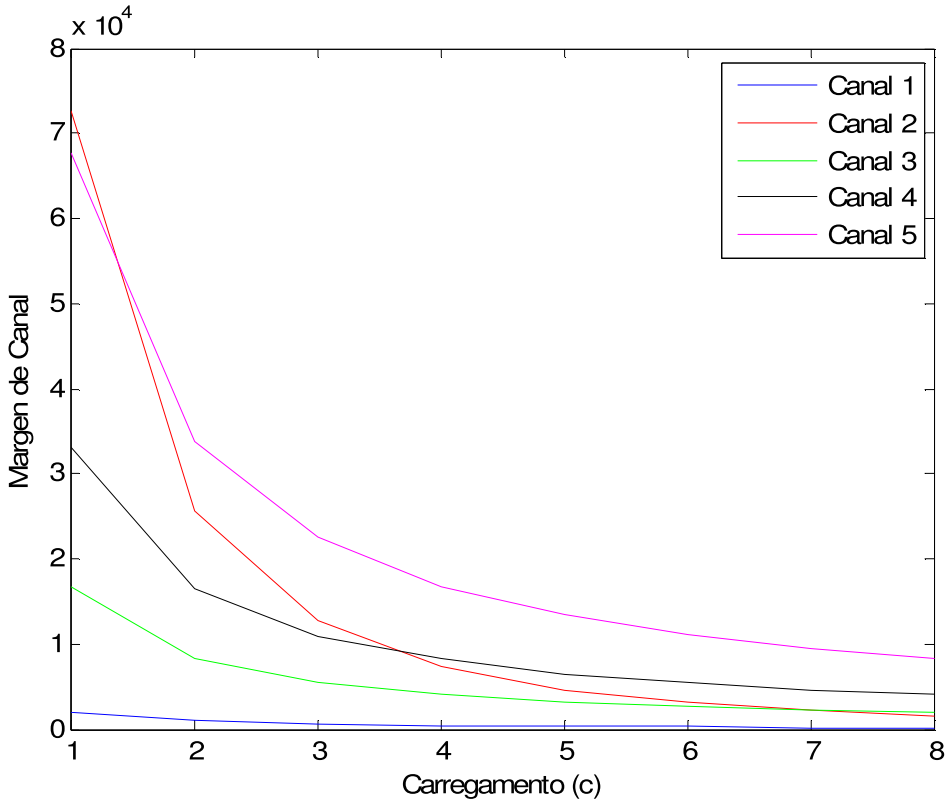

Figura 24: Margem de canal em função do carregamento (c) para os cinco canais para o caso com GD com controle de potência reativa.

Observando-se o gráfico da margem de canal observa-se que o canal 1 é aquele que apresenta a menor margem de fase, isto indica que segundo este critério o canal 1 é o mais significativo.

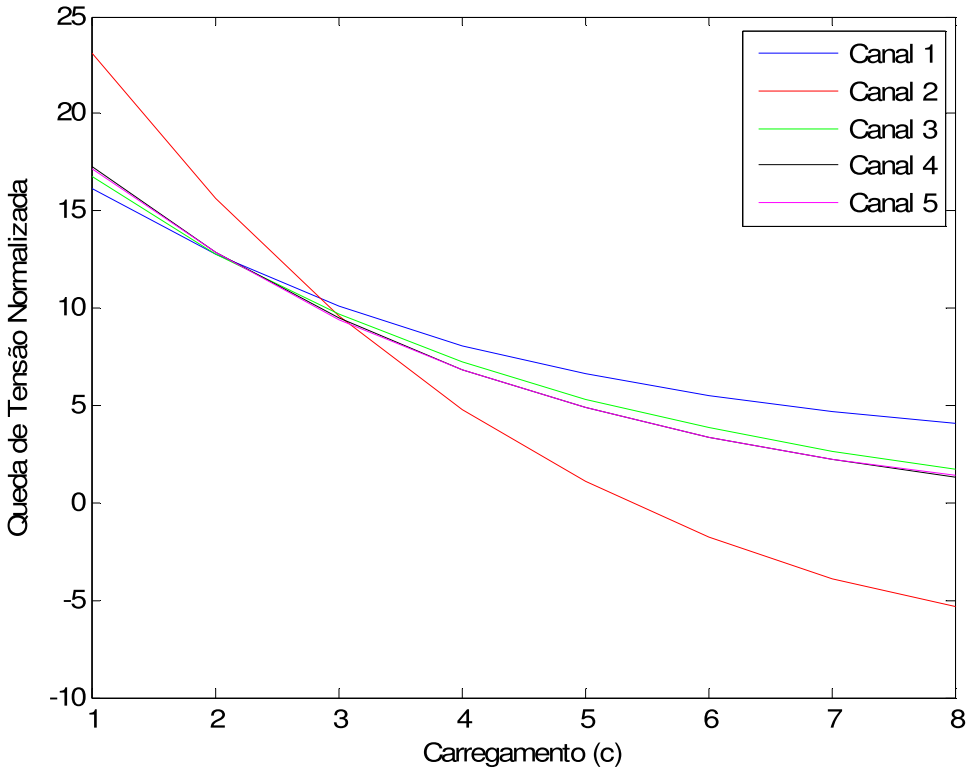

Figura 25: Queda de tensão normalizada em função do carregamento (c) para os cinco canais para o caso com GD com controle de potência reativa.

Como pode ser notado também pelo critério da queda de tensão normalizada para o maior carregamento [2], o canal crítico, aquele que melhor representa o sistema no que diz respeito à estabilidade de tensão, continua sendo o canal 1. Comparando-se este canal para o caso sem geração distribuída e o caso com geração distribuída com controle de tensão, observa-se uma melhora nas condições do sistema sobre o ponto de vista da estabilidade de tensão.

6.2.2 Geração com controle de tensão

Já para o segundo modo, com controle de tensão, as curvas *PV* são mostradas nas figuras 26 a 30 a seguir.

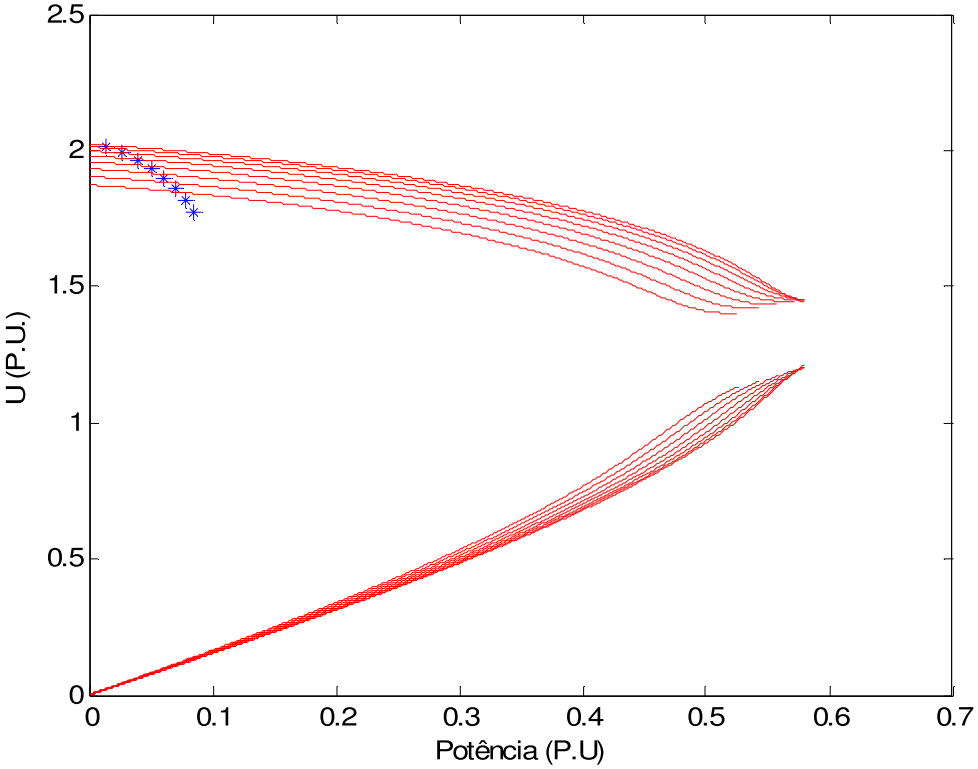

Figura 26: Curvas *PV* para o Canal 1 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*.

Analisando a figura 26, observa-se que em comparação com a figura 12 que houve um aumento do nível de potência que o sistema suporta. Este aumento já era esperado levando-se em conta o resultado observado na figura 19. Entretanto em comparação com os resultados obtidos para o caso com controle de potência reativa, observa-se que o aumento do carregamento do sistema não afeta significativamente os valores de potência máxima das curvas *PV*.

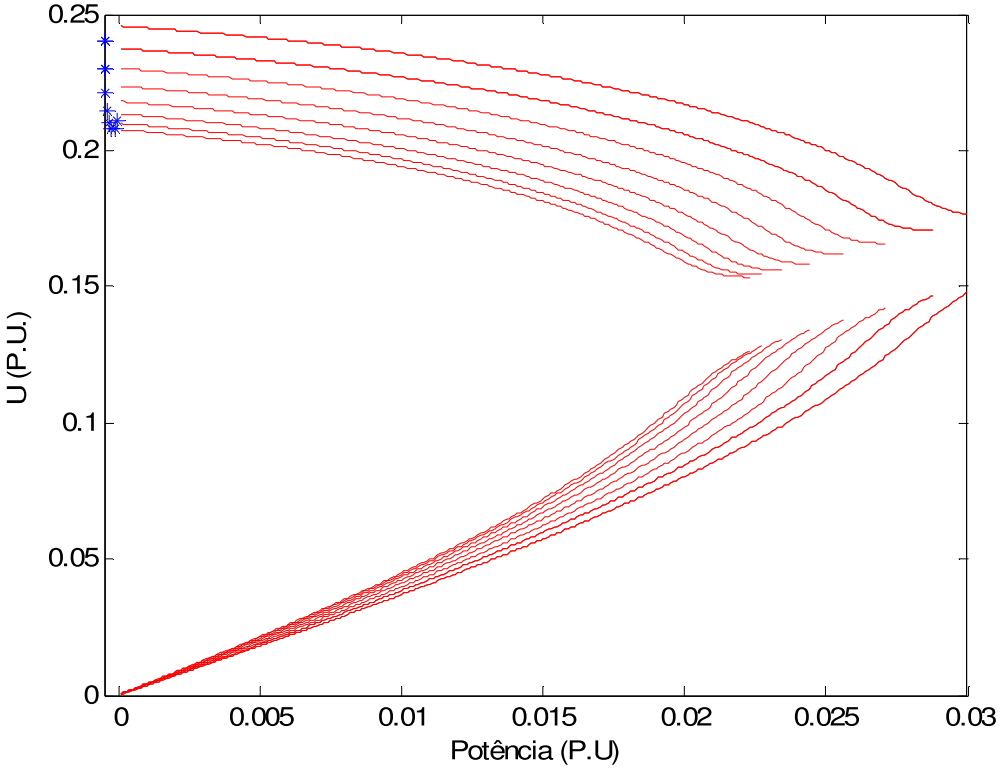

Figura 27: Curvas *PV* para o Canal 2 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*.

O comportamento do canal 2 para o caso com geração distribuída com controle de tensão foi semelhante ao observado no caso com controle da potência reativa, ou seja, houve uma diminuição na capacidade de transmissão de potência através do canal 2. No entanto este canal não se mostrou significativo nos casos anteriores.

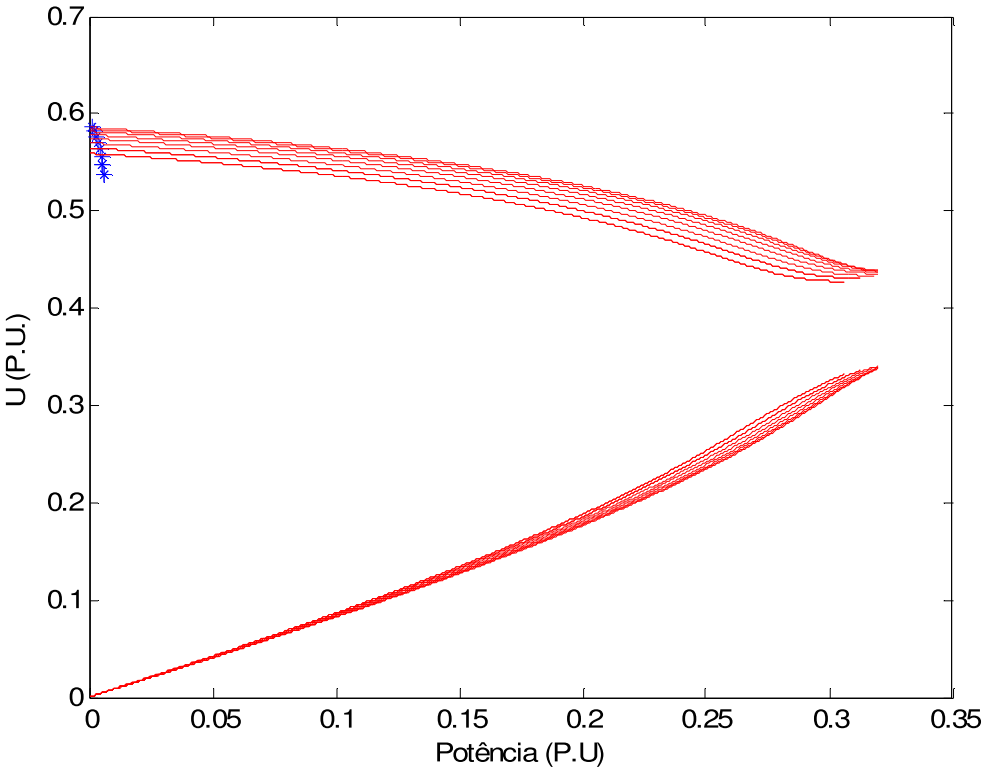

Figura 28: Curvas *PV* para o Canal 3 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*.

A figura 28 mostra que para o canal 3 houve um aumento nas potências máximas das curvas PV como para o caso com controle de reativos, a figura também mostra que o controle da tensão faz com que o carregamento do sistema afete menos as curvas *PV*, como observado para o canal 1.

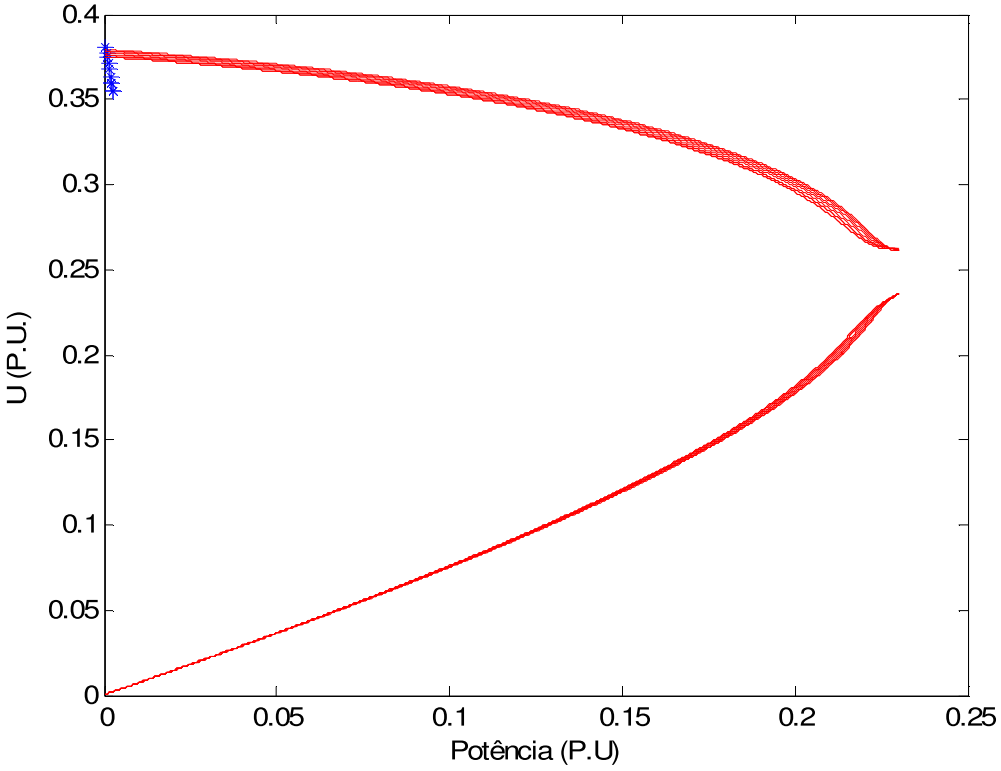

Figura 29: Curvas *PV* para o Canal 4 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*.

As análises feitas até aqui para os canais 1 e 3 podem ser feitas também para o canal 4 como mostra a figura 29. Para este canal foi observado um aumento na capacidade de transmissão de potência em relação ao caso sem geração distribuída, semelhante ao aumento observado para o caso com geração com controle de potência reativa, no entanto, o aumento do carregamento do sistema não impactou de modo significativo nas potências máximas das curvas *PV*.

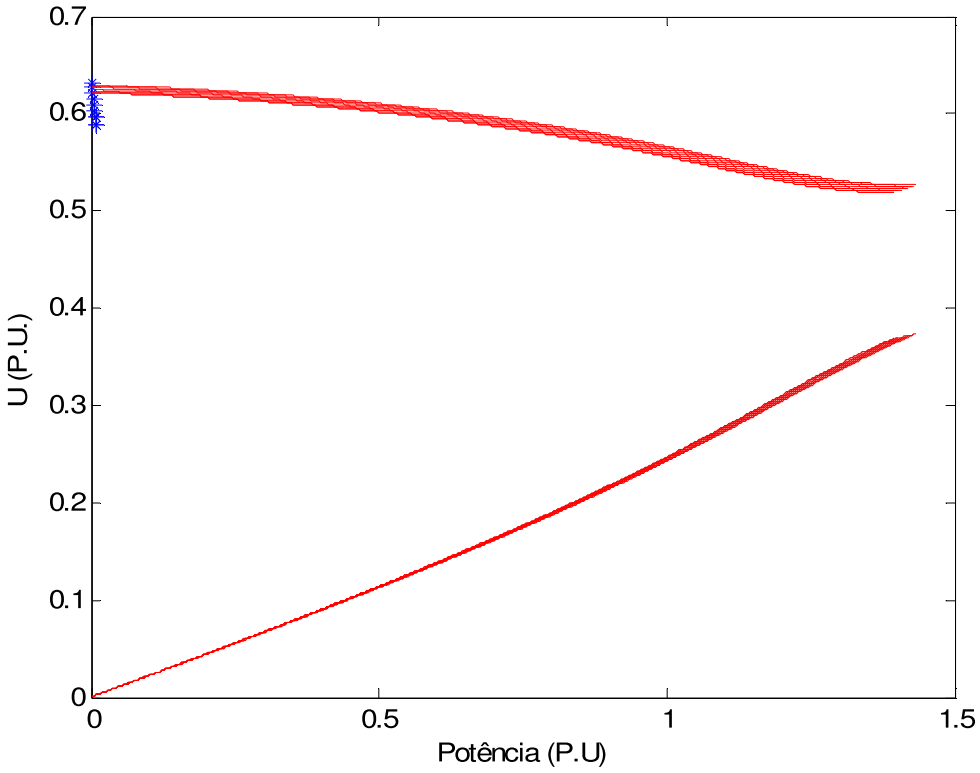

Figura 30: Curvas *PV* para o Canal 5 para o sistema com geração distribuída e controle de *V*.

O canal 5 segue o mesmo padrão observado para os canais 1,3 e 4. No entanto para fazer a análise de forma coerente é preciso analisar aquele canal que melhor representa o sistema, isto é, o canal crítico.

Os critérios para determinar o canal crítico são mostrados nas figuras 31 e 32 a seguir.

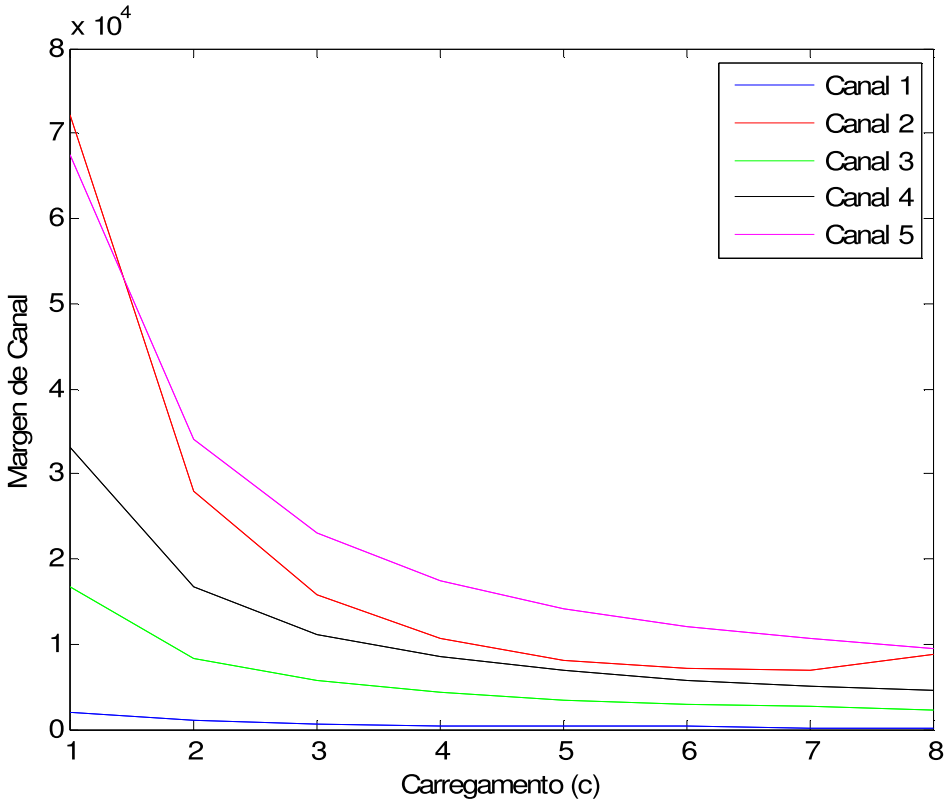

Figura 31: Margem de canal em função do carregamento (c) para os cinco canais para o caso com GD com controle de tensão.

Observando-se o gráfico da margem de canal observa-se que o canal 1 é aquele que apresenta a menor margem de fase, isto indica que segundo este critério o canal 1 é o mais significativo.

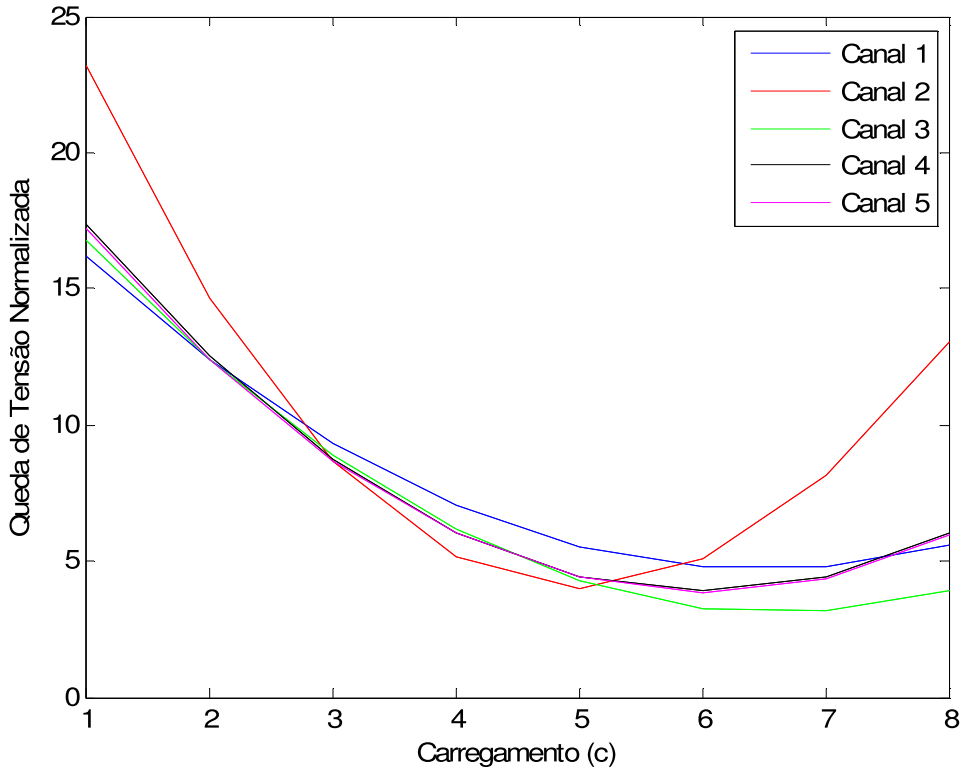

Figura 32: Queda de tensão normalizada em função do carregamento (c) para os cinco canais para o caso com GD com controle de tensão.

Analisando a queda de tensão normalizada o canal que se apresenta como canal crítico é o canal 2, isto contraria o mostrado pela margem de canal, que mostra não somente que o canal crítico é o canal 1 como mostra que o canal 2 não é um canal significativo. Além disso, o canal 1 se mostrou o mais significativo para todos os demais casos o que indica que ele é de fato o canal que melhor representa o sistema.

O canal crítico do sistema, portanto, é o canal 1. Ele mostra que o sistema se torna mais estável com a presença de geração distribuída no sistema. Ele mostra ainda que um controle de tensão na geração distribuídafaz com que as curvas PV dos canais sejam menos sensíveis ao carregamento do sistema, isto é, o controle de tensão melhora ainda mais a resposta do sistema no que se refere à estabilidade de tensão.

7 Conclusões

Pode-se concluir com os estudos realizados neste trabalho de conclusão de curso que o método de Transformação em Componentes de Canal (*CCT*) apresentado possui a capacidade de desacoplar um sistema complexo e acoplado em sistemas mais simples compostos apenas de uma fonte geradora, alimentando uma carga através de uma impedância série. Conclui-se também que as maiores dificuldades na implementação do método são a não previsibilidade do mesmo causado pela diferença da matriz $[T]$ para cada novo sistema que o método for empregado e o acoplamento das cargas que ocorre devido à transformação, oque exige que se encontre um circuito equivalente para cada ponto de operação do sistema.

Este tipo de sistema simplificado obtido através da transformação em componentes de canal torna-se adequado para o estudo de estabilidade de tensão, uma vez que a obtenção das curvas que relacionam a tensão na carga com a potência entregue é facilmente obtida, assim a análise de apenas um canal é suficiente para o entendimento do sistema como um todo.

Pode-se concluir também que a geração distribuída tem vários impactos no sistema de distribuição ao qual ela é instalada. Entre estes impactos está o nível de estabilidade de tensão do sistema, ou seja, a quantidade de carga que este sistema pode suportar sem entrar em colapso de tensão. Isto pode ser notado através da análise das figuras 12, 19 e 26, que mostram as curva *PV* do canal 1, que é aquele que melhor representa o sistema para estabilidade de tensão. Esta melhora na estabilidade foi mais acentuada no caso em que foi empregado o controle detensão no nó do gerador distribuído. Isto pode ser explicado pelo fato que, mesmo com o aumento do carregamento do sistema, o controle de tensão ajuda a manter as tensões em todos os nós do sistema.

Alguns estudos podem ser feitos no sentido de aprofundar a análise realizada neste trabalho de conclusão de curso. Entre estes estudos pode-se citar a influência da potência reativa gerada pelo gerador distribuído, uma vez que neste trabalho foi utilizada apenas potência reativa igual a zero. Outro aspecto pertinente é o aumento do número de geradores distribuídos na rede.

8 Referências Bibliográficas

[1] KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**, New York: McGraw-Hill, 1994

[2] PORDANJANI, I. R. **Power System Voltage Stability Assessment Using Channel Components Transform**. Thesis (Ph.D. in Power Engineering and Power Electronics). University of Alberta. 2013.

[3] JENKINS, N.; ALLAN, R.; CROSSLEY, P.; KIRSCHEN, D.; STRBAC, G. **Embedded Generation**, London: Lightning Source UK, 2008.

[4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica - PRODIST.** 2012.

[5] ARAUJO, F.B.; PRADA, R.B. **Distributed Generation: Voltage Stability Analysis,** in *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble* , vol., no., pp.1-4, 16-20 June 2013.

[6] FREITAS, W.; VIEIRA; J. C. M.; MORELATO, A.; SILVA, L. C. P.; COSTA, V. F.; LEMOS, F. A. B. **Comparative Analysis Between Synchronous and Induction Machines for Distributed Generation Applications,** in *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.21, no.1, pp.301-311, Feb. 2006.

[7] GRILO, A. P.; MOREIRA, P. C. M.; VIEIRA; J. C. M.; FREITAS, W.; BANSAL, R. C. **Analytical tools to assess the voltage stability of induction-based distributed generators**, International Journal of Eletrical Power and Energy Systems, March 2012, Pages 31-39.

[8] LIMA, R. L. **Análise de requisitos técnicos para ilhamento intencional de geradores síncronos distribuídos**. Dissertação (Mestrado) – Unversidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

[9] KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**, New York: CRC Press LLC, 2002

[10] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2005.

[11] MATHWORKS. Disponível em <http://www.mathworks.com>. Acesso em: fev. de 2014.

Anexo A

Informações do Sistema

O sistema representado na figura 10 utilizado neste estudo é formado por seis cargas do tipo potência constante, um gerador distribuído, um transformador, uma subestação e cinco segmentos de linha.

As informações sobre as cargas do sistema são mostrados na tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Potência das cargas do sistema da figura 10.

Carga	Potência (MVA)
1 (S_1)	$(5{,}3 + j2{,}2555)$
2 (S_2)	$(3{,}9 + j1{,}6636)$
3 (S_3)	$(3{,}3 + j1{,}406)$
4 (S_4)	$(2{,}8 + j1{,}1956)$
5 (S_5)	$(2{,}3 + j0{,}98)$
6 (S_6)	$(2{,}4 + j1{,}0231)$

Já as informações das impedâncias das linhas são dadas na tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Impedância dos trechos do sistema da figura 10.

Trecho	Impedância (Ω)
1-2 (Z_{12})	$(0{,}2812 + j1{,}2659)$
2-3 (Z_{23})	$(0{,}2499 + j1{,}1252)$
3-4 (Z_{34})	$(0{,}1562 + j0{,}7033)$
5-6 (Z_{45})	$(0{,}1249 + j0{,}5626)$
7-8 (Z_{56})	$(0{,}09375 + j0{,}4219)$

As bases adotadas para o sistema são as bases da subestação mostradas na tabela 3 a segir.

Tabela 3:Dados das bases da subestação do sistema.

Base kV	33
Base MVA	1500

Os dados de tensão gerada e potência nominal do gerador distribuído usado na simulação são mostrados na tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Dados do gerador distribuído.

Tensão(kV)	6,9
Potência (MVA)	30

Por fim os dados da relação de transformação e impedância do transformador que conecta o Gerador distribuído ao restante do sistema são mostrados na tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Dados do transformador do gerador distribuído.

Relação de Transformação	$6{,}9/33$
Impedância (p.u.)	$0{,}2j$