



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/22
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

MODELAGEM DE GERADORES FOTOVOLTAICOS PARA ESTUDOS EM REGIME DINÂMICO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

**Juliana Portugal da Costa
UFPA**

**João Paulo Abreu Vieira(*)
UFPA**

RESUMO

O presente trabalho visa a modelagem de geradores fotovoltaicos para estudos em regime dinâmico de sistemas de energia elétrica no *software* ANATEM, do CEPEL. O gerador fotovoltaico foi modelado através da funcionalidade de Controle Definido pelo Usuário (CDU) disponível no *software*, que permite a utilização de modelos diferentes daqueles pré-existent no ANATEM. Para verificar o desempenho do modelo, foram realizadas simulações de curto-circuito em uma barra do sistema e do efeito das nuvens sob a geração fotovoltaica. Os resultados detalham o comportamento deste tipo de geração face a tais distúrbios.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de energia elétrica, geração fotovoltaica, modelagem dinâmica.

1.0 - INTRODUÇÃO

A penetração da geração fotovoltaica tem se tornado cada vez mais expressiva nos sistemas de energia elétrica (SEEs) por todo mundo, especialmente, em países desenvolvidos. Embora o Brasil apresente níveis elevados de irradiação média anual quando comparados aos da Alemanha (país líder na capacidade instalada de geração fotovoltaica), poucos investimentos vêm sendo feitos no sentido de fomentar a produção deste tipo de energia. Por outro lado, a necessidade de diversificação da matriz energética, através da inclusão de maior quantidade de fontes renováveis de energia, e a regulamentação da geração distribuída no Brasil, por meio da Resolução Normativa 482, da ANEEL, são fatores de incentivo à alavancada deste tipo de geração no país.

Tal mudança de paradigma na operação dos SEEs (no Brasil, essencialmente baseado em máquinas síncronas de elevada inércia), torna necessária a realização de estudos estáticos e dinâmicos, em vista a garantir a segurança e a operação confiável do sistema. Os sistemas baseados em energia solar fotovoltaica, ou geradores fotovoltaicos (GFV), são constituídos basicamente por: painéis fotovoltaicos e inversores de frequência, assim como de seus esquemas de controle e proteção. Este conjunto de equipamentos torna a modelagem matemática dos sistemas a GFV multivariável e não linear, e objeto de pesquisa para representação dessa fonte para estudos em regime dinâmico de SEEs. Estes modelos matemáticos podem ser facilmente encontrados no estado da arte da tecnologia fotovoltaica, compreendendo desde a modelagem da fonte primária até a dinâmica relacionada aos inversores. Apesar disto, muitas ferramentas computacionais, amplamente conhecidas e utilizadas no âmbito das simulações dinâmicas de SEPs, não possuem tais modelos. No Brasil, um dos *softwares* mais utilizados para a realização de análises de transitórios eletromecânicos é o ANATEM do CEPEL, que apesar de sua popularidade, ainda não possui o modelo dinâmico pré-definido de GFV.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de geradores fotovoltaicos para estudos em regime dinâmico de SEEs. O modelo matemático do GFV foi implementado no *software* ANATEM por meio da funcionalidade do Controlador Definido pelo Usuário (CDU), onde é oferecida uma grande variedade de blocos elementares, os quais podem ser conectados para modelagem de praticamente qualquer tipo de controle. O

modelo do gerador fotovoltaico considerou a representação dos seguintes componentes: inversor CC/CA e seus controles associados.

A modelagem dinâmica do gerador fotovoltaico foi investigada por meio de simulações computacionais no domínio do tempo, considerando dois distúrbios: 1) curto-circuito próximo ao gerador fotovoltaico; e 2) variação na irradiação solar. O sistema teste adotado nas simulações do trabalho foi o sistema de distribuição de 33 barras do IEEE. Para fins dos estudos definidos, foram realizadas modificações no sistema original, no qual foi acrescentado um transformador para conexão de um GFV. Os resultados de simulação mostraram que o modelo matemático proposto do GFV é adequado para estudos em regime dinâmico de SEEs.

2.0 - MODELO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Uma usina fotovoltaica é, normalmente, caracterizada pelo agrupamento de várias fontes de pequeno porte conectadas à rede elétrica através de conversores, em um ponto comum. Desta maneira, é razoável considerar tais conversores em paralelo como um único conversor equivalente, levando em conta que a potência de saída de cada um será a mesma, em um dado instante de tempo. Esta suposição assume dispersão geográfica mínima e irradiação solar uniforme sobre os geradores. Devido às considerações acima mencionadas, é satisfatório aproximar o modelo de um GFV pelo modelo genérico de geradores eólicos do tipo 4 (WT4), o qual representa geradores eólicos a conversor pleno e que será considerado neste trabalho.

O desempenho dinâmico da frequência elétrica do GFV/WT4 é completamente imposto pelo conversor. O controle das potências ativa e reativa é realizado por reguladores rápidos e de alta largura de banda. O modelo do conversor é representado por uma fonte corrente que responde a comandos vindos dos controles, e que considera também as funções de proteção de sub e sobretensão. Os sinais de potência ativa são inicializados pela potência de saída do gerador obtida no fluxo de potência. Uma visão geral da estrutura do WT4 é mostrada na Figura 1.

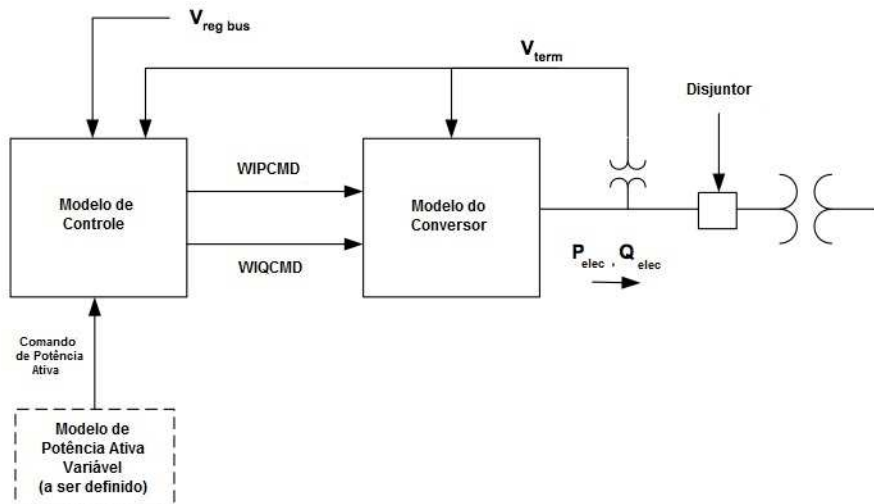


FIGURA 1 – Visão geral do modelo dinâmico do GFV.

O modelo do GFV foi implementado no *software* ANATEM, através da funcionalidade de Controle Definido pelo Usuário (CDU) (1).

2.1 Modelos para estudos de fluxo de carga

Para os estudos de fluxo de carga, é suficiente utilizar um modelo simplificado do GFV, o qual consiste em um único gerador e um transformador. Estas especificações são suficientes para geradores fotovoltaicos conectados à rede em um ponto de conexão de 34,5kV ou 13,8 kV. Para valores de tensão acima de 34,5kV poderá ser necessária a utilização de mais transformadores (2). Neste trabalho, o transformador está conectado a uma barra de 13,8kV.

Em estudos de fluxo de carga, o GFV equivalente é modelado através de injeções de potências ativa e reativa. Tanto a potência ativa quanto a potência reativa injetadas na rede devem respeitar a capacidade do inversor do GFV. Desta maneira, o fluxo de carga deve considerar os limites da corrente do inversor do GFV equivalente em análise.

Neste trabalho, o fluxo de carga é calculado pelo *software* ANAREDE (3), do CEPEL.

2.1.1 Condições Iniciais para simulação dinâmica

O fluxo de carga fornece as condições iniciais para as simulações dinâmicas. Para se obter uma inicialização bem-sucedida, é imprescindível respeitar os limites máximos e mínimos de potência ativa e reativa. Inconsistências entre o fluxo de potência e o modelo dinâmico resultarão em problemas durante a inicialização.

2.2 Modelos para estudo dinâmico

O modelo do GFV utilizado no trabalho é mostrado nas seções a seguir.

2.2.1 Modelo do inversor

O conversor realiza a interface entre a planta fotovoltaica e a rede elétrica. É uma fonte de corrente controlada que, em resposta aos comandos de correntes ativa e reativa vindos do esquema de controle, calcula a corrente a ser injetada na rede. Esta fonte de corrente controlada incorpora, ainda, uma lógica de potência para suporte a subtensões pela limitação da corrente ativa e uma lógica para mitigar sobretensões através da redução na injeção de corrente reativa. O modelo do conversor é apresentado na Figura 2 (4).

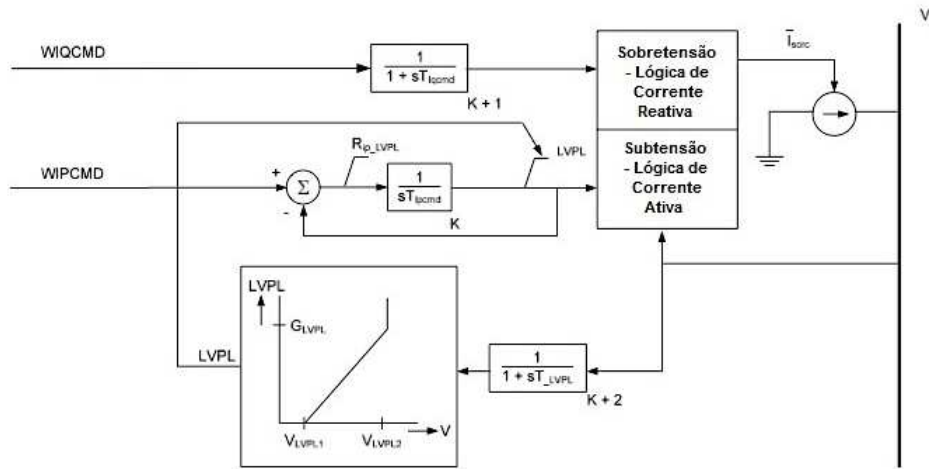


FIGURA 2 – Modelo do Conversor.

A lógica de potência para subtensões (LVPL) reduz o estresse do sistema durante e imediatamente após faltas sustentadas, pela limitação do comando de corrente ativa. Sob condições normais de operação, a tensão terminal filtrada está acima de V_{LVPL2} e não há limite superior. Quando a tensão cai abaixo de V_{LVPL2} durante uma falta, um valor G_{LVPL} é calculado e aplicado. Quando a tensão está abaixo de V_{LVPL1} , G_{LVPL} se torna zero. Durante o período de recuperação pós-falta, a tensão irá exceder V_{LVPL2} e G_{LVPL} não será mais considerado. Contudo, a taxa de aumento do comando de corrente ativa será restringida pela taxa de limite da rampa.

A função do LVPL é reduzir linearmente a injeção de corrente ativa quando a tensão terminal atinge valores abaixo de 0,8 p.u.. A injeção de corrente reativa se mantém alta sob estas condições transitórias, fornecendo suporte à tensão terminal. Por outro lado, os controles irão agir também com o objetivo de limitar sobre-tensões nos terminais, através da interrupção na injeção de corrente reativa quando a tensão terminal ultrapassar 120%. Este efeito é representado pela função de gestão de corrente reativa face a sobre-tensões. A injeção de corrente reativa é limitada pelas especificações do inversor.

3.0 - CONTROLE DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Nos tópicos a seguir serão apresentados detalhes do controle da geração fotovoltaica.

3.1 Controle das Potências Ativa e Reativa

O módulo de controle do conversor é mostrado na Figura 3. O controle de potência reativa monitora a tensão terminal e a compara à tensão de referência. O regulador é um controlador PI, que possui ganhos ajustáveis, com o objetivo de alcançar o desempenho desejado. Se necessário, os valores devem ser ajustados.

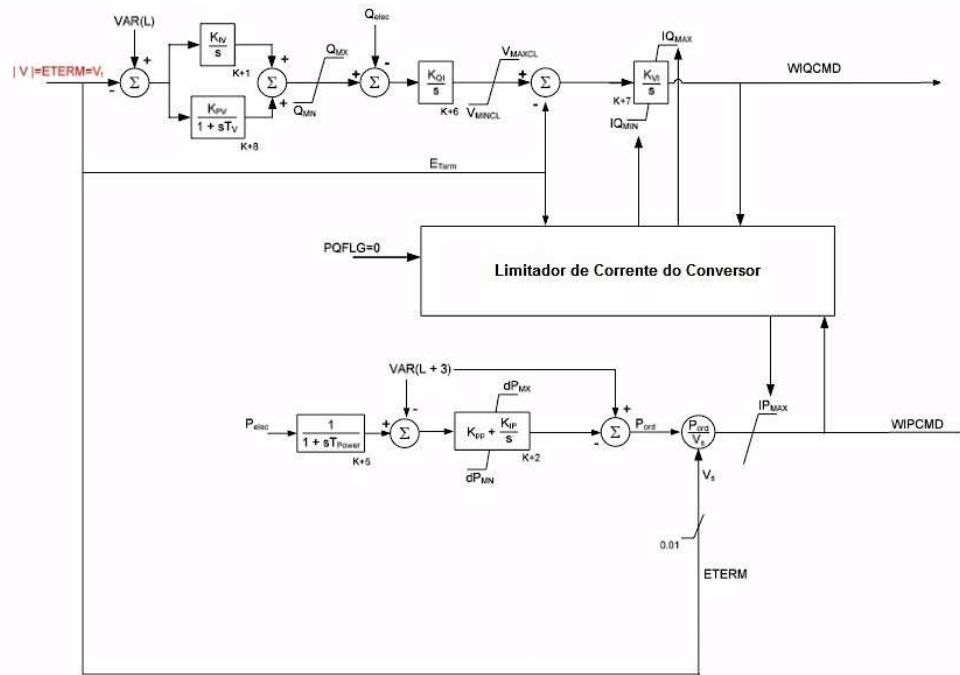


FIGURA 3: Esquemático de controle.

O controle tensão/Var monitora a potência reativa (Q_{calc}), com o objetivo de calcular o valor de $WIQCMD$ necessário para atingir o sinal de potência reativa vindo do controle de potência reativa. É realizada então uma comparação entre as potências gerada pelo conversor (Q_{calc}) e aquela calculada pelo controle de potência reativa, o erro resultante é integrado, juntamente a um ganho K_{QI} , pra gerar a tensão de referência (V_{ref}). A tensão de referência é comparada à tensão terminal e o seu erro é integrado e multiplicado por um ganho K_{VI} , resultando no comando de corrente reativa $WIQCMD$.

O controle de potência ativa atua de maneira a fornecer o comando de potência vindo do fluxo de carga. Esta se mantém constante, a não ser que seja inserida uma lógica que forneça um perfil de potência variando no tempo. Assim, o sinal $WIPCMD$ é originado a partir desta potência inicial e do valor da tensão terminal.

4.0 - RESULTADOS

4.1 Sistema Teste

Para as simulações realizadas, foi utilizada a rede elétrica de 33 barras do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), apresentada na Figura 4, a qual é um sistema amplamente utilizado para estudos envolvendo redes de distribuição. É um sistema radial, cuja carga total instalada é: 3,715MW e 2,29MVar, considerando tensão base de 13,8kV e potência base de 100MVA. O diagrama unifilar do sistema é representado na Figura 4.

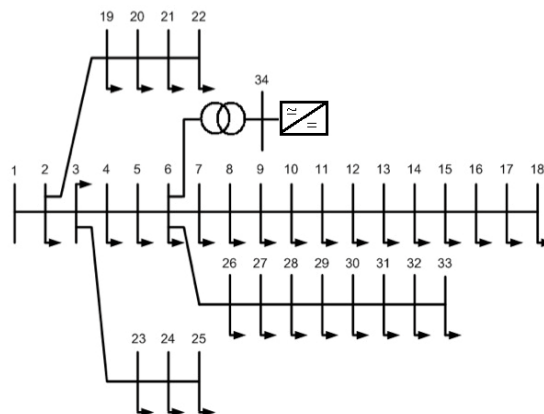


FIGURA 4 – IEEE 33 barras com gerador fotovoltaico.

O sistema foi considerado trifásico equilibrado, enquanto que as cargas foram modeladas como potência constante. Informações sobre os parâmetros de linhas e cargas podem ser encontrados em (5). O conversor do SFV foi conectado à barra 34, a qual é ligada à rede pela barra 6, com o auxílio de um transformador. A modelagem na rede foi realizada no *software* ANAREDE, de onde foram obtidas as respostas do fluxo de carga.

4.2 Estudos de Caso

Neste trabalho serão apresentados dois estudos de caso. O primeiro se refere à reposta da planta de geração fotovoltaica a um curto-circuito de 100ms na barra 5. Enquanto que o segundo caso simula o efeito das nuvens neste tipo de geração. Neste caso, foi aplicada uma redução de 20% na potência de entrada do conversor, em rampa, com início em 5s e final em 55s. Após este período, a potência de entrada do gerador foi mantida constante.

4.2.1 Resposta a um curto-circuito

As figuras a seguir mostram o comportamento de determinadas variáveis do sistema fotovoltaico. Na Figura 5, observa-se a tensão na barra 34, antes, durante e depois do curto-circuito. Nota-se o afundamento da tensão na barra no instante em que a falta é aplicada. Com a remoção do curto, a tensão volta rapidamente para um valor aceitável, mostrando a rápida dinâmica do sistema fotovoltaico.

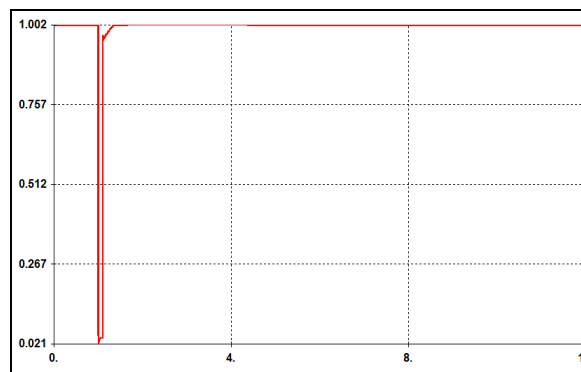


FIGURA 5 – Curto-circuito: Tensão na barra 34.

Nas Figuras 6 e 7, observam-se as respostas de corrente e potência reativas face ao curto-circuito. Na Figura 6, verifica-se o aumento da potência reativa com o objetivo de restaurar a tensão do barramento. A corrente reativa sofre variações com o mesmo objetivo de fornecer suporte à tensão no momento da falta.

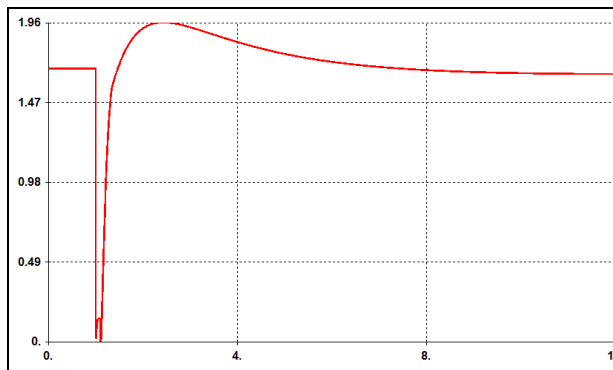


FIGURA 6 – Curto-circuito: Potência Reativa.

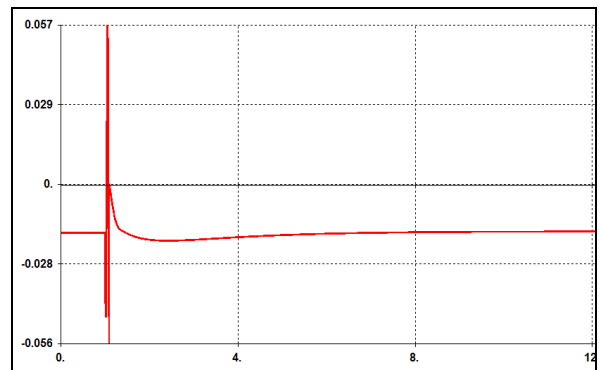


FIGURA 7 – Curto-circuito: Corrente Reativa.

As Figuras 8 e 9 mostram as respostas de potência e corrente ativas. Na Figura 8, percebe-se que o fornecimento de potência ativa se reestabelece instantes após a eliminação do curto-circuito. Enquanto que na Figura 9, verifica-se inicialmente uma limitação na corrente ativa, com o intuito de permitir maior suporte de reativos.

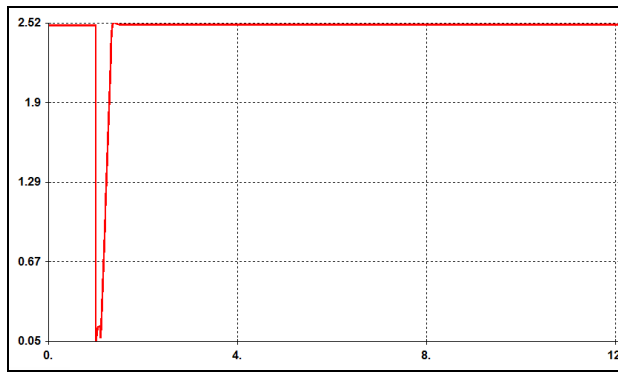


FIGURA 8 – Curto-circuito: Potência Ativa.

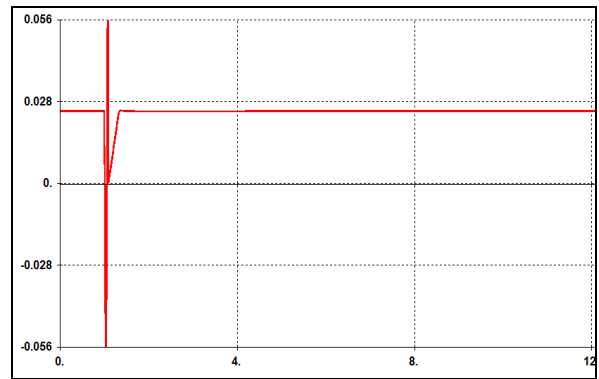


FIGURA 9 – Curto-circuito: Corrente Ativa

4.2.2 Efeito das nuvens

Da Figura 10 até a Figura 14 são apresentados os resultados para o caso do efeito das nuvens. A potência injetada por uma usina fotovoltaica pode variar em função das condições climáticas, tal como a ocorrência da formação de nuvens, a qual é representada pela redução em rampa da potência (6).

Na Figura 10, nota-se o comportamento da potência ativa fornecida pela usina fotovoltaica para a rede elétrica. A potência ativa sofre um decréscimo em rampa similar à limitação na potência de entrada do gerador. Na Figura 10, nota-se o comportamento da corrente ativa semelhante ao da potência.

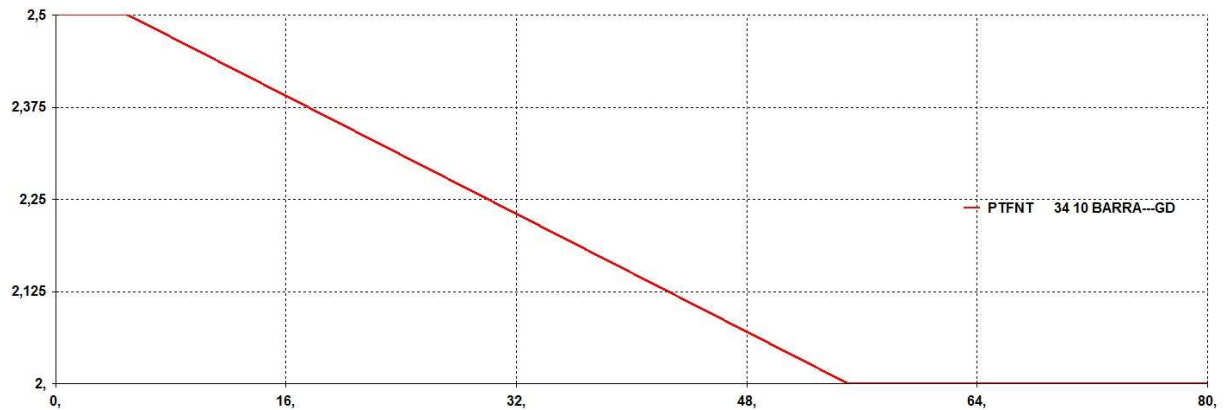


FIGURA10 – Efeito das Nuvens: Potência Ativa.

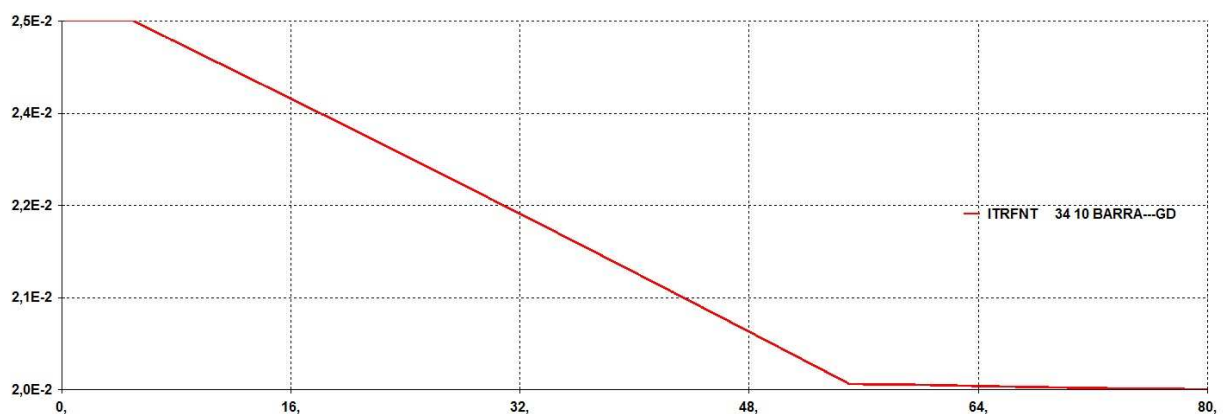


FIGURA 11 – Efeito das Nuvens: Corrente Ativa.

Na Figura 12, é mostrada a resposta da tensão ao efeito das nuvens. Nota-se que o módulo da tensão sofre diminuição durante a aplicação da rampa de potência, porém sem chegar a violar os limites de tensão. Após a remoção da rampa, a tensão volta a crescer, tendendo novamente à unidade.

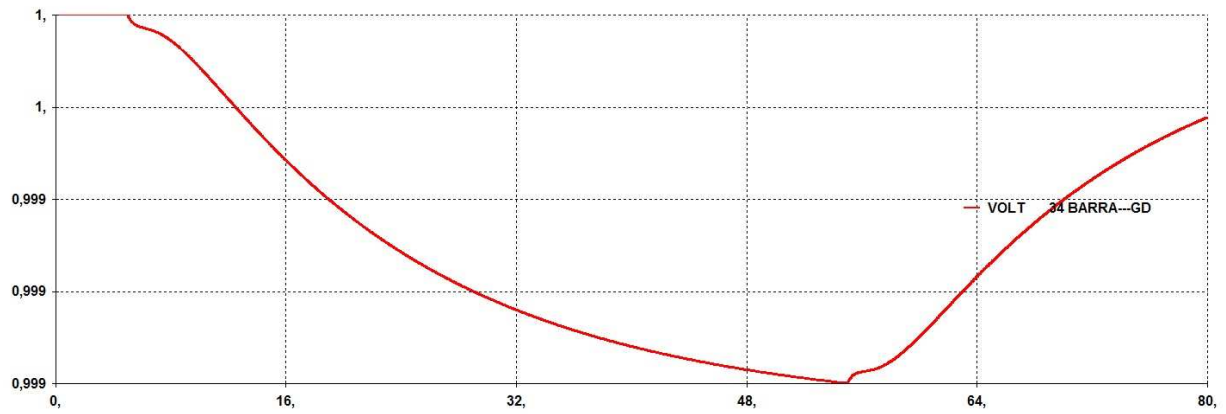


FIGURA 12 – Efeito das Nuvens: Tensão.

Na Figura 13, verifica-se o efeito das nuvens sobre a potência reativa. Percebe-se que a injeção de potência reativa aumenta durante a aplicação da rampa. Após a eliminação desta, a potência reativa continua a aumentar, com o objetivo de fazer com que a tensão retorne ao seu valor de referência.

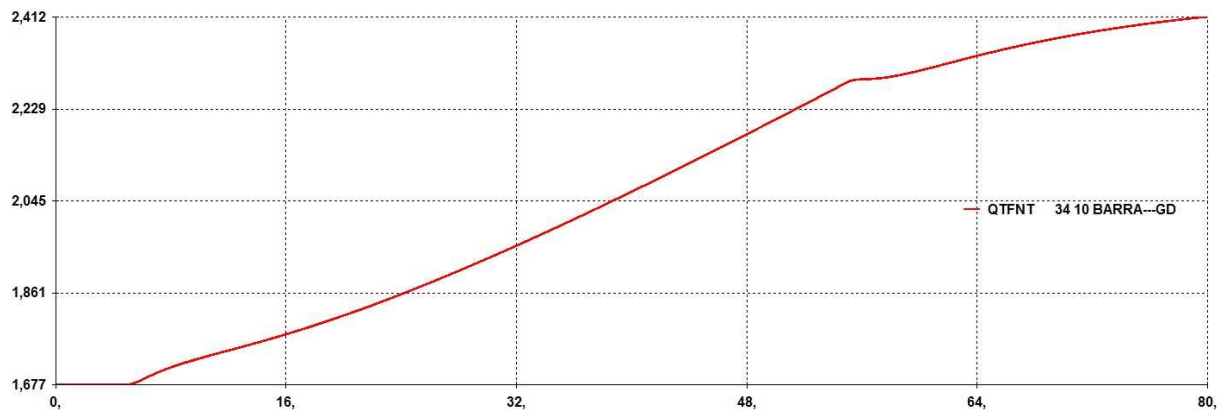


FIGURA 13 – Efeito das Nuvens: Potência Reativa.

A Figura 14 mostra aumento no consumo de corrente reativa até que a tensão volte a se estabilizar.

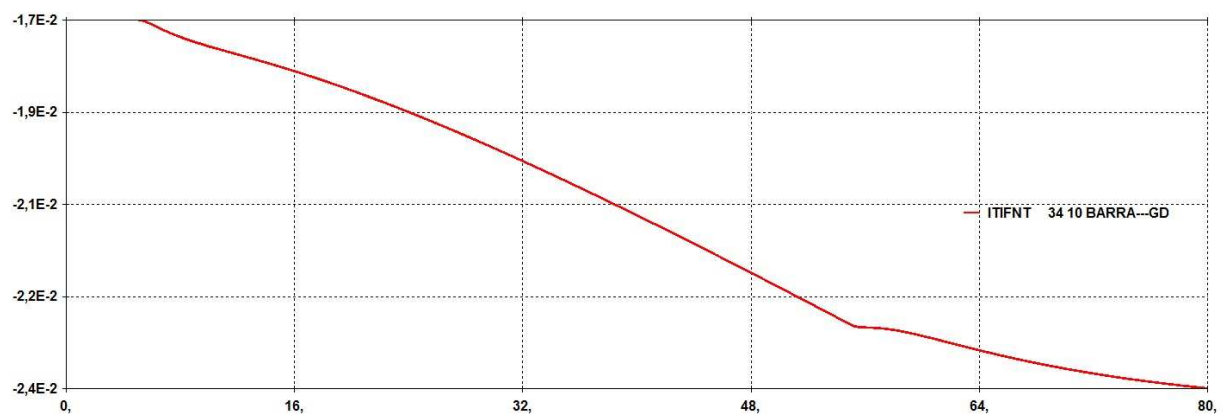


FIGURA14 – Efeito das Nuvens: Corrente Reativa.

5.0 - CONCLUSÃO

A geração fotovoltaica é um tipo de geração altamente promissora em diversos aspectos. De baixos impactos ambientais e necessidade de manutenção, a geração fotovoltaica vem ganhando espaço nos sistemas elétricos de diversos países, principalmente nos desenvolvidos. Em termos de recursos naturais, o Brasil é um país muito atrativo para a utilização da energia solar, portanto, espera-se que nos próximos anos ocorra um aumento também

em sua atratividade econômica.

O objetivo deste trabalho foi, portanto, o de modelar um gerador fotovoltaico, baseado no modelo WT4, para a conexão com a rede elétrica e posterior realização de estudos de estabilidade. Para verificar a validade do modelo, foram realizados dois estudos, o primeiro de curto-circuito e o segundo, sobre o efeito das nuvens sobre a planta de geração fotovoltaica.

Os resultados apresentados na Seção 4 se mostraram satisfatórios e condizentes com o comportamento esperado para o sistema de geração fotovoltaica. Tanto na simulação de curto-circuito, quanto na de efeitos das nuvens sobre a usina fotovoltaica, pôde ser notada a atuação do conversor, bem como de seu controle sobre as variáveis apresentadas. No estudo de curto circuito, pôde-se ainda verificar a lógica de corrente ativa para subtensões.

Diversos trabalhos à respeito da geração fotovoltaica devem ser realizados para que se possa compreender de maneira satisfatória o comportamento deste tipo de geração em sistemas elétricos. Adaptações no modelo apresentado e inclusão de funcionalidades são objetivos futuros desta pesquisa, visando tornar o modelo o mais completo possível para a análise dinâmica de sistemas de potência com presença de geração fotovoltaica.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL. Programa ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos: Manual do Usuário. V 10.04.06, 2012.
- (2) CLARK, K, W. MILLER, N e WALLING, R. Modeling of GE Solar Photovoltaic Plants for Grid Studies. Versão 1.1, 2010.
- (3) CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL. Programa de Análise de Redes: Manual do Usuário. V 09.07.02, 2011.
- (4) SIEMENS WIND. Siemens WT4 Model for the Brazilian *Software* ANATEM. 2010.
- (5) IEEE DISTRIBUTION PLANNING WORKING GROUP REPORT, Radial distribution test feeders, IEEE Transactions on Power Systems, Agosto 1991, Volume 6, Número 3, pp 975-985.
- (6) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, Nota Técnica: Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Maio, 2012.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Juliana Portugal da Costa Nasceu em Belém, em 1990. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2014). Atualmente é aluna de mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Seus interesses em pesquisa estão focados em modelagem e simulação da geração distribuída em sistemas de energia elétrica.

João Paulo Abreu Vieira Possui graduação (2004), mestrado (2006) e doutorado (2009) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é professor adjunto da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará. Seus interesses em pesquisa estão focados em modelagem, simulação, estabilidade, controle e segurança de sistemas elétricos de potência; integração da geração distribuída em sistemas de energia elétrica. É membro do IEEE PES.