XVIII ERIAC
DÉCIMO OITAVO ENCONTRO
REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE

Foz do Iguaçu, Brasil

19 a 23 de maio de 2019

CE-NN

Comitê de Estudos CE - Título do Comitê de Estudos CE

ESTUDOS OPERACIONAIS DE USINAS DE GERAÇÃO EÓLICA E SOLAR ATRAVÉS DE UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL INOVADORA

P. S. P. Junior*
Conprove Indústria
Brasil

G. S. Salge
Conprove Indústria
Brasil

M. J. B. B. Davi
Conprove Indústria
Brasil

C. M. Martins
Conprove Indústria
Brasil

P. S. Pereira
Conprove Engenharia
Brasil

G. E. Lourenço
Conprove Engenharia
Brasil

Resumo *– O artigo terá como foco a apresentação de uma plataforma computacional inovadora e sua utilização para estudos envolvendo a modelagem e operação de sistemas de geração eólica e solar. Serão estudados casos de interligação de usinas eólicas à rede elétrica com avaliação do uso da inércia sintética para redução de variações de frequência no sistema e, além disso, casos de interligação de usinas solares à rede ressaltando o desempenho de métodos MPPT, conversores DC-DC e controles do sistema inversor.*

.

Palavras-chave: Energia Eólica – Energia Solar – Transitórios Eletromagnéticos – Simulação Computacional – Energias Renováveis.

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia, aliado às questões de sustentabilidade, têm feito crescer a demanda por fontes de energia elétrica limpa e eficaz.

Contudo a implantação de novas usinas de geração ao sistema interligado pode ser impactante, em termos de operação, controle e proteção caso não sejam realizados estudos com o devido critério antes da interligação. Diante disso, faz-se necessária a busca por técnicas que possibilitem uma análise detalhada da interação entre estes novos sistemas e as redes das concessionárias de energia, a fim de prever possíveis impactos indesejados. A alternativa mais utilizada para realização de tais análises e estudos, devido sua eficiência e baixo custo, são os aplicativos computacionais, que permitem ao usuário a modelagem de sistemas elétricos com a maior fidelidade possível ao sistema real.

Neste contexto, o artigo terá como foco a apresentação de uma plataforma computacional inovadora e sua utilização para estudos envolvendo a modelagem e operação de sistemas de geração eólica e solar. A ferramenta possibilita a análise de sistemas elétricos com alto nível de complexidade, dispondo de uma interface amigável ao usuário e recursos avançados para simulação de transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos e sistemas de controle.

2 DESENVOLVIMENTO

O programa PS SIMUL, desenvolvido no Brasil desde o ano de 2009 pela empresa CONPROVE, teve sua primeira versão lançada em 2014 e possui uma versão gratuita disponibilizada pelo site da empresa [1]. Este software, criado com a finalidade principal de permitir ao usuário modelar os mais variados e complexos componentes dos sistemas de potência/controle e simular transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, possui uma interface bastante intuitiva e amigável, utilizando uma série de recursos que facilitam a entrada de dados em geral, assim como a obtenção e avaliação de resultados. A Figura 1 apresenta a tela principal do programa.

* Rua Visconde de Ouro Preto, nº 75, CEP 38.405-202, Uberlândia, MG, Brasil – conprove@conprove.com.br

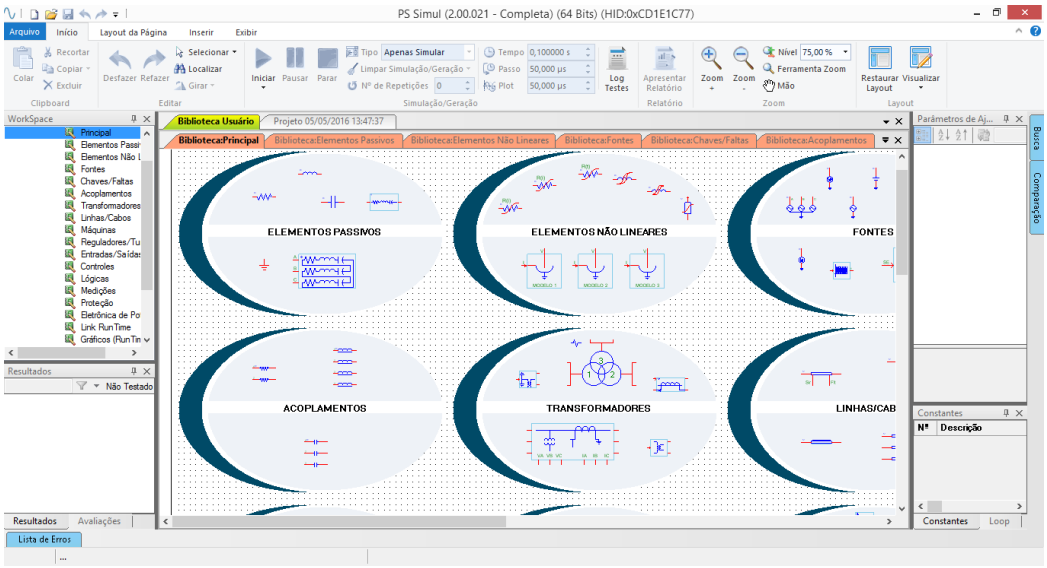

Fig. 1. Tela principal do programa PS SIMUL.

A metodologia de trabalho do software o subdivide em dois ambientes: Draft e Runtime. No ambiente do Draft o usuário irá, de fato, realizar a modelagem do sistema a ser simulado adicionando componentes de potência e/ou controle, disponibilizados pela biblioteca do aplicativo, e direcionando os sinais que deseja visualizar graficamente após a simulação. A Runtime, por sua vez, é um ambiente desenvolvido para apresentação dos resultados da simulação de diversas maneiras, através da inserção de gráficos dos tipos: analógicos, digitais, fasores, trajetórias de impedância, gráfico de barras, gráficos XY, entre outros. A montagem de painéis para controle de variáveis do sistema modelado também é possibilitada na Runtime pelos blocos: Dial, Chave, Slider, LED, Medidor, etc. A Figura 2 ilustra os ambientes supracitados.

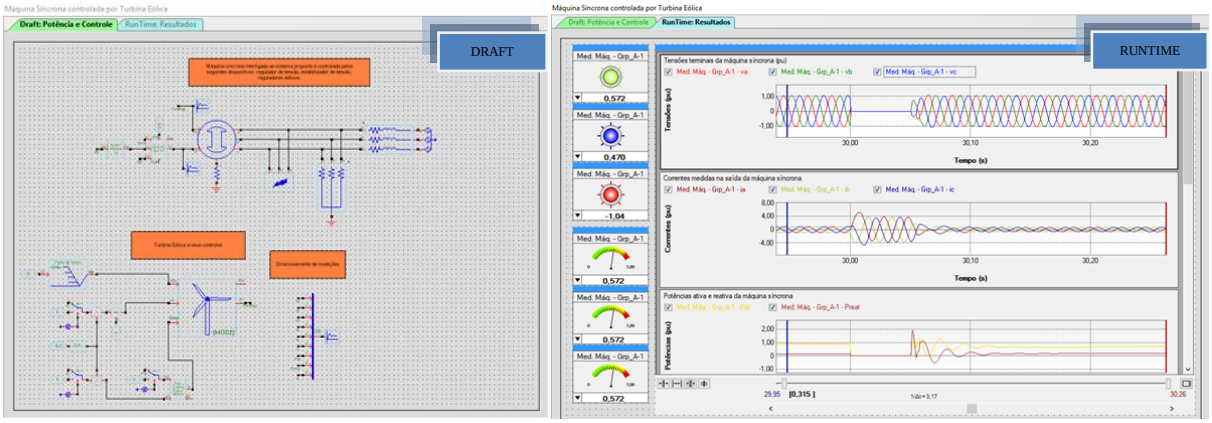

Fig. 2. Ambientes de Draft e Runtime do software PS Simul.

Em se tratando dos recursos disponibilizados, seguem algumas das principais características deste software:

- Utiliza o método híbrido de solução das equações diferenciais (Trapezoidal + Interpolação + Euler) que evita a ocorrência de oscilações numéricas durante a simulação;
- Possibilidade de reprodução de distúrbios reais no software com a importação de arquivos no formato COMTRADE ou CSV;
- Geração automática de relatórios completos das simulações;
- Criação, pelo usuário, de rotinas automatizadas de testes com a definição de parâmetros como constantes e a posterior realização de avaliações automáticas dos resultados obtidos, por amplitude ou tempo;
- Possibilita a conexão direta com as malas de testes da CONPROVE para a geração das formas de onda obtidas na simulação sem a necessidade de exportação para formato COMTRADE;
- Método Iterativo que, juntamente com a mala de testes, permite a realização de ensaios em malha

fechada com a realimentação de sinais binários [2];
- Disponível nos idiomas Português, Espanhol e Inglês.

Outro grande diferencial dessa ferramenta está na quantidade e nível de detalhamento dos componentes disponibilizados em sua biblioteca que atualmente conta com mais de 400 blocos divididos pelos grupos: Elementos Passivos, Elementos Não Lineares, Fontes, Chaves/Faltas, Acoplamentos, Transformadores, Linhas/Cabos, Máquinas, Reguladores e Turbinas, Entradas/Saídas (conexão com hardware externo), Controles, Lógicas, Medição, Proteção, Eletrônica de Potência, Link com Runtime, Runtime e Outros.
Tendo em vista que o foco para demonstração desta ferramenta no artigo relaciona-se à utilização de modelos e recursos para simulação de sistemas de geração que utilizam fontes de energia renováveis, serão destacados os seguintes componentes:

- **Modelos de fontes e cargas:**
  A fim de representar as fontes e cargas de um sistema elétrico, são disponibilizados: componentes RLC monofásicos e trifásicos nas mais diversas configurações (série, paralelo, estrela, delta, etc.), fontes trifásicas e monofásicas ideais e reais com definições de impedância pelos níveis de curto-circuito ou pelos valores de sequência, máquinas síncronas, assíncronas, DC, entre outras. Existe ainda a possibilidade de simulação de cargas não lineares tais como indutores saturáveis, para-raios e fornos a arco.

- **Modelos para simulação de linhas de transmissão:**
  A ferramenta possibilita ao usuário a simulação de linhas nos modelos PI, RL, Sem Perdas, Bergeron e modelos dependentes da frequência no domínio modal ou das fases. A entrada de dados pode ser feita pela geometria, matrizes RLC ou matrizes de sequência, podendo ou não ser habilitado o recurso de falta que torna possível ao usuário a aplicação de faltas a qualquer distância da linha (km ou %) sem a necessidade de realizar divisões manuais da mesma.

- **Modelos de transformadores de potência:**
  O software também disponibiliza modelos reais e ideais de transformadores de 2 a 5 enrolamentos, com a possibilidade de acesso aos enrolamentos para aplicação de curto entre espiras ou entre espiras e terra, por exemplo. Além disso, a entrada de dados dos transformadores pode ser realizada pelos dados de circuito equivalente ou dados de ensaios.

- **Modelos para simulação de fontes de energia renováveis:**
  Fontes eólicas que reproduzem fenômenos como média, rampa, ruído e rajada; modelos de turbinas eólicas e seus controladores de pitch; painéis fotovoltaicos com cadastro por dados de circuito equivalente ou dados de catálogo; componentes que realizam os métodos MPPT (método de rastreamento de máxima potência): P&O, Beta e Condutância Incremental; conversores DC-DC: boost, buck, buck-boost, cuk e sepic; pontes retificadoras/inversoras; controles para geração de pulsos; entre outros.

3 ESTUDOS DE CASO

3.1 Interligação de usinas eólicas à rede elétrica com avaliação do uso da inércia sintética para redução de variações de frequência no sistema:

Em um sistema interligado, a quantidade de unidades geradoras em operação sincronizada pode ser diretamente correlacionada com a capacidade de resposta inercial a distúrbios com impacto na frequência. Os aerogeradores mais modernos (Tipo III – gerador de indução com dupla alimentação e Tipo IV – gerador síncrono conectado à rede por conversor de potência) dispõem de máquinas com velocidade variável e associadas a conversores eletrônicos que, se por um lado asseguram ao conjunto um elevado desempenho e flexibilidade operativa, por outro lado, o incapacitam de produzir naturalmente uma resposta inercial a distúrbios ocorridos no sistema.
Diante disso, foi necessário o desenvolvimento de uma técnica para que a geração eólica fosse capaz de minimizar a variação de frequência contribuindo com uma energia cinética fictícia extraída através de uma

estratégia de controle, denominada de "inércia sintética". O sistema de controle detecta o desvio de frequência e ajusta o fluxo de energia para a rede, desta forma, a turbina eólica contribui para a inércia do sistema como as unidades geradoras convencionais.

No Brasil, os procedimentos de rede apresentam os seguintes requisitos em relação aos parques eólicos [3]:

- As centrais eólicas com potência instalada superior a 10 MW deverão dispor de controladores sensíveis às variações de frequência, de modo a emular a inércia (inércia sintética) através de modulação transitória da potência de saída, contribuindo com pelo menos 10% de sua potência nominal, por um período mínimo de 5 segundos, quando em regime de subfrequência, para desvios de frequência superiores a 0,2 Hz. A retirada desta contribuição deverá ser automaticamente efetuada caso a frequência retorne a seu valor nominal.
- A injeção inicial de potência ativa deverá ser proporcional à variação da frequência, a uma taxa mínima de 0,8 pu da potência nominal do aerogerador para cada hertz de desvio da frequência.

O sistema simulado contempla um parque eólico construído com 10 aerogeradores dispostos em 2 coletores compostos de 5 geradores cada, sendo que cada gerador possui potência nominal de 2 MVA. Cada aerogerador é associado a um transformador elevador e é interconectado através de um circuito coletor de média tensão até o transformador da subestação de entrada 34.5/230 kV responsável pela conexão da planta com o sistema interligado nacional (SIN).

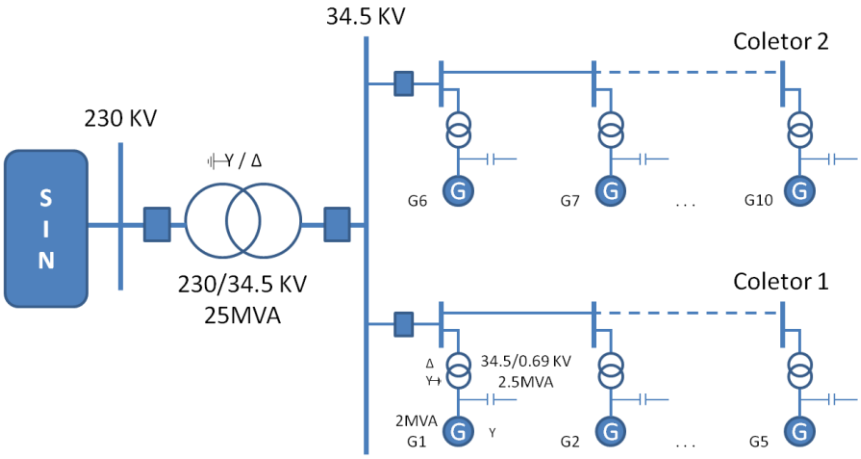

Fig. 3. Diagrama unifilar do parque eólico.

A confecção do sistema inclui os modelos para a velocidade do vento, modelagem do sistema mecânico, da maquina síncrona, do retificador, inversor, conversor DC-DC e dos sistemas de controle envolvendo o controle do ângulo das pás (pitch), o controle do torque mecânico e todos os limitadores de velocidade e potência. O sistema equivalente AC foi representado por uma máquina síncrona (200 MVA) com seus respectivos controladores de tensão e velocidade. As figuras 4 e 5 ilustram o sistema modelado no software destacando as várias partes que o compõe.

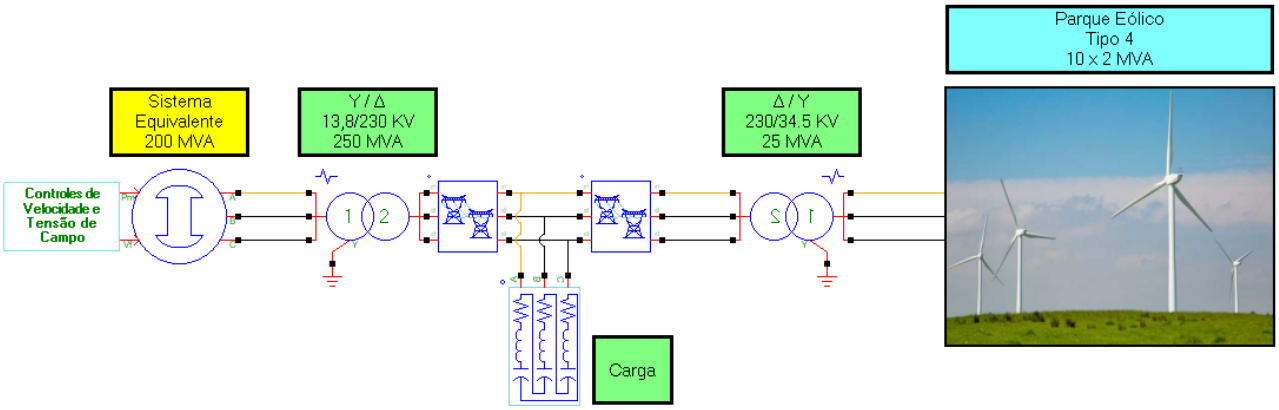

Fig. 4. Circuito de potência modelado no software PS Simul.

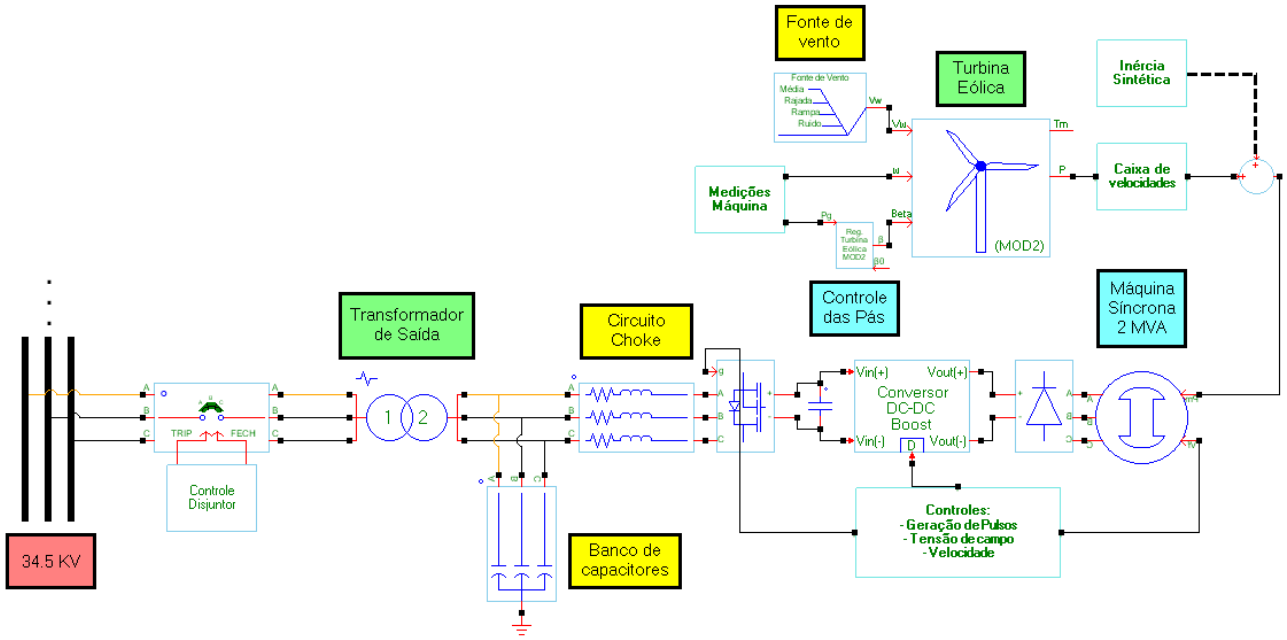

Fig. 5. Detalhamento de um dos aerogeradores com seu controle associado no software PS Simul.

Para avaliar a atuação da inércia sintética, foi considerada inicialmente uma carga de 65 MW sendo o parque eólico responsável por suprir 20 MW, ou seja, 100% da sua potência nominal. O restante da carga (45 MW) é alimentada pelo sistema de geração equivalente.

O evento analisado foi um aumento súbito de 50% da carga alimentada pelo conjunto, com o objetivo de representar a saída de alguma geração do sistema e assim provocar uma variação de frequência da rede. No instante t = 1 segundo, foi simulada a entrada da carga e foram analisados os comportamentos da frequência do sistema e da potência fornecida pelo parque eólico na ausência e na presença da inércia sintética.

Conforme esperado, sem a presença da inércia sintética, o parque eólico não contribuiu durante a ocorrência do distúrbio (Figura 6-a). Analisando a resposta da frequência do sistema com a presença da inércia sintética (Figura 6-b), é notória a diminuição da variação da frequência durante a recomposição do sistema.

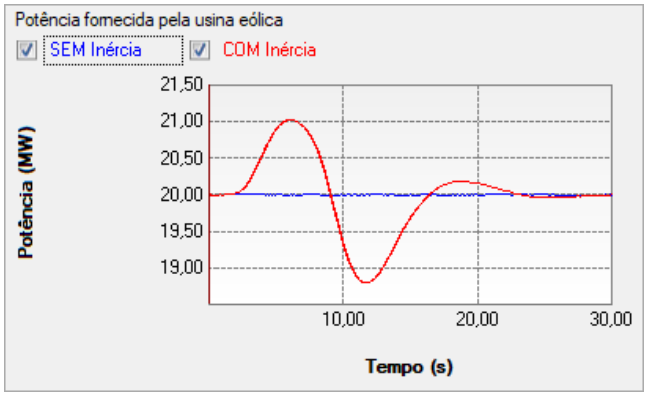

Fig. 6-(a). Potência gerada do parque eólico.

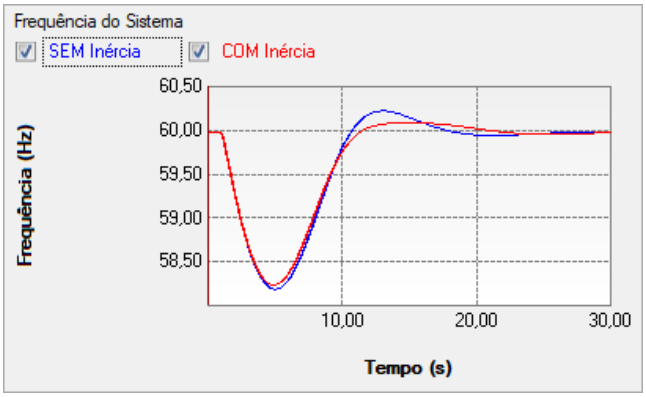

Fig. 6-(b). Frequência do sistema.

3.2 Interligação de usinas solares à rede elétrica ressaltando o desempenho de métodos MPPT, conversores DC-DC e controles do sistema inversor:

No estudo em questão, um arranjo fotovoltaico com potência total de 240 kW foi conectado a uma rede de distribuição de 13,8 kV através de um conversor modelado por uma ponte de três níveis (IGBT) e um transformador de acoplamento. A topologia do conversor modelado faz parte de uma família de inversores multiníveis que surgiu como uma solução às aplicações de energia solar por contar com diversas vantagens como: possibilidade de frequências menores de chaveamento, controle de corrente reativa e diminuição de

DHT das correntes de saída do arranjo [4,5]. O sistema de potência modelado no ambiente Draft do PS Simul está disposto na Figura 7.

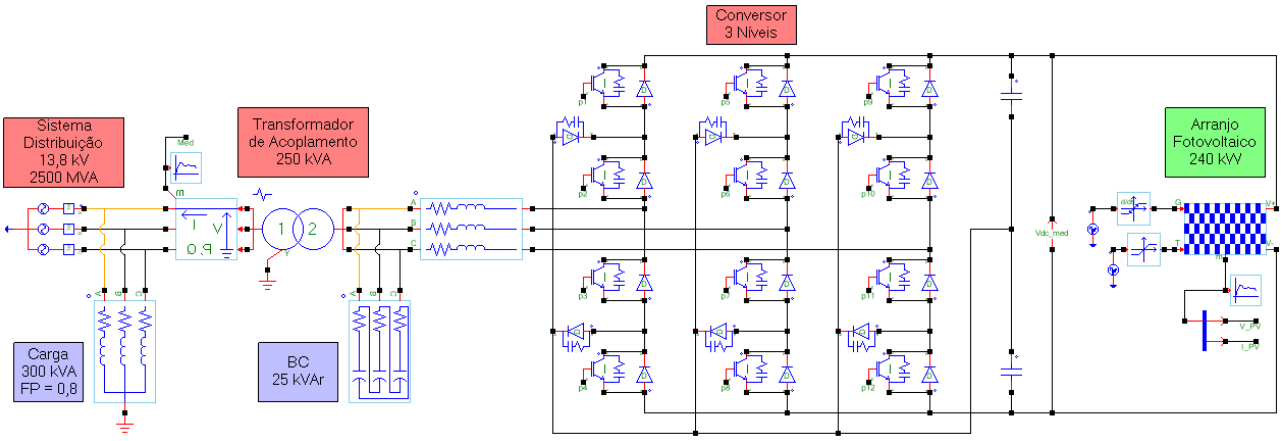

Fig. 7. Sistema de potência modelado no ambiente Draft do software PS Simul.

Como já constatado, uma das maneiras de aumentar a eficiência na produção de eletricidade pelos painéis fotovoltaicos é fazê-los operarem em um ponto de máxima transferência de potência, que se altera com a radiação solar e a temperatura do painel. Para realizar o rastreamento do ponto de máxima transferência de potência utiliza-se uma técnica denominada MPPT (Maximum Power Point Tracking) que pode ser implementada por diversos algoritmos presentes na literatura.

Neste contexto, o sistema de controle modelado é composto basicamente por um controle MPPT (P&O) [6] responsável por fornecer a tensão de referência ao regulador de tensão DC e um regulador de corrente que possibilitará a definição das tensões de referência utilizadas para geração de pulsos aos IGBT's do conversor [7,8]. A figura 8 ilustra o controle modelado no software PS Simul.

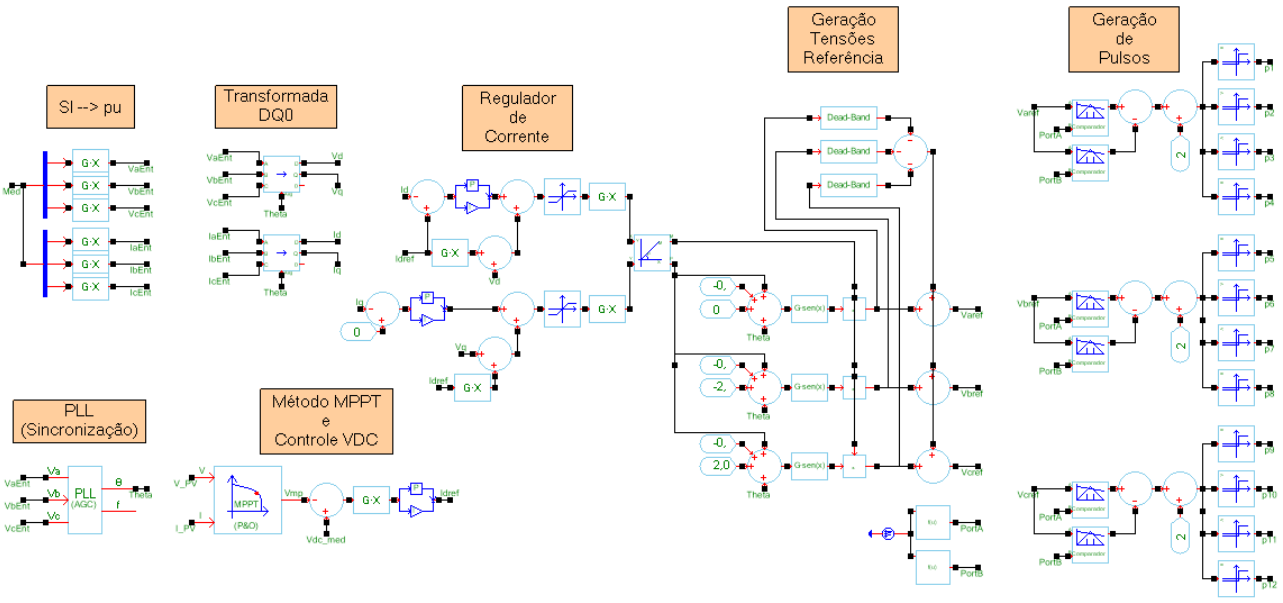

Fig. 8. Sistema de controle modelado no ambiente Draft do software PS Simul.

O arranjo solar em questão é composto por 85 strings em paralelo, com 7 módulos solares em série por string. As curvas características de tensão por potência (V x P) e tensão por corrente (V x I) do arranjo utilizado são fornecidas pelo software PS Simul e podem ser consultadas na Figura 9 para diferentes níveis de irradiância solar.

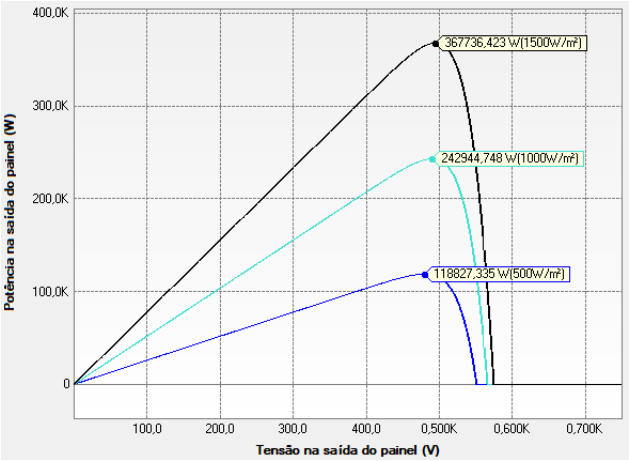

Fig. 9-(a). Curva V x P do arranjo.

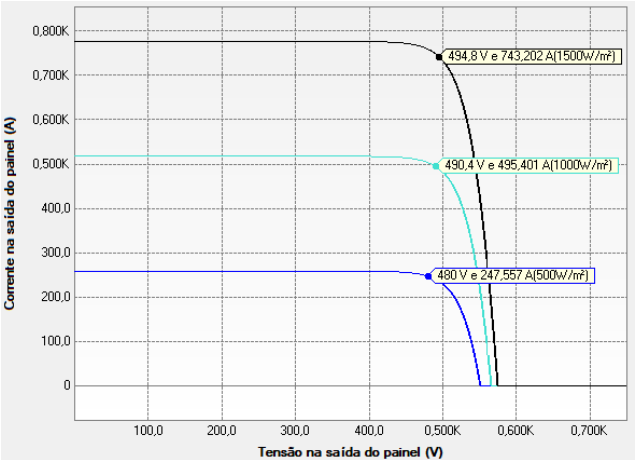

Fig. 9-(b). Curva V x I do arranjo.

Visando avaliar a eficácia do controle implementado o arranjo foi submetido a uma variação de irradiância solar. Inicialmente a irradiância considerada foi de 1000 W/m², sendo esta no instante t = 2 segundos modificada para 500 W/m² e no instante t = 4 segundos retornando ao valor de 1000 W/m². Baseando-se nas curvas características do arranjo, espera-se que este forneça inicialmente ao sistema uma potência ativa de aproximadamente 243 kW sendo nestas condições a tensão DC fixada pelo método MPPT em um valor aproximado de 490,4 V. Após a diminuição da irradiância para 500 W/m², espera-se que o fornecimento de potência ativa seja de aproximadamente 119 kW com uma tensão DC fixada em torno de 480 V pelo método MPPT.

A Figura 10 ilustra as formas de onda da tensão DC medida comparada à de referência (Figura 10-b) e também da potência fornecida pelo painel durante a simulação realizada (Figura 10-a).

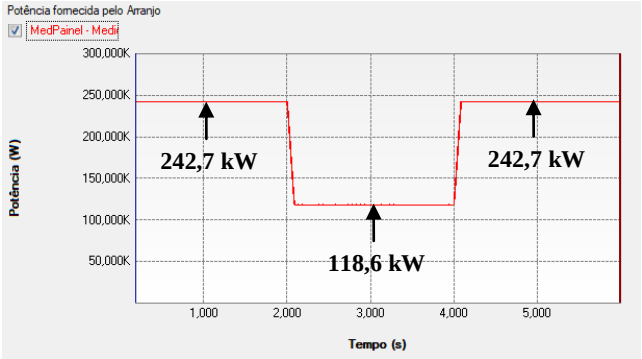

Fig. 10-(a). Potência fornecida pelo arranjo.

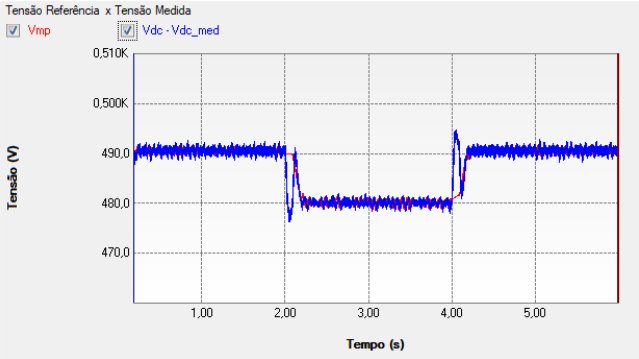

Fig. 10-(b). Tensão Referência x Tensão Medida.

Dessa forma, pode-se concluir que o sistema de controle implementado se mostrou bastante eficaz, tanto na determinação da tensão para fornecimento de máxima potência pelo painel, quanto na geração de pulsos ao conversor.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou o potencial de um software desenvolvido no Brasil para realizar estudos de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos. Foram apresentados os recursos da ferramenta no que concerne aos modelos de componentes clássicos do sistema de potência e uma ênfase foi dada às modelagens de parques eólicos e usinas solares, cujos resultados demonstraram a plena capacidade do software em realizar tais estudos.

O software vem de encontro às necessidades de se ter sistemas elétricos confiáveis e robustos. Tais características são alcançadas através de um grande trabalho de simulações realizado diariamente por especialistas das empresas que analisam as condições de estado permanente e transitório, sendo essa uma tendência mundial, e o Brasil, como sexta economia do planeta está inserido nesse contexto.

Existem algumas ferramentas de simulação disponibilizadas à nível mundial, todavia algumas são antigas

com interfaces nada intuitivas, enquanto que outras são mais sofisticadas porém possuem custo elevado, dificultanto o uso abrangente. A ferramenta aqui apresentada tem a proposta de democratizar o uso de programas de análise transitória, vislumbrando que as empresas possam implantá-los em seus diversos setores para realização de estudos eletromagnéticos e eletromecânicos sem grandes complicações e sobretudo com baixo custo.

5 REFERÊNCIAS

[1] Conprove Engenharia, Indústria e Comércio, PS SIMUL: Software para Modelagem do Sistema de Potência e Simulação de Transitórios Eletromagnéticos. Acesso em 05 de dezembro de 2018, em: http://www.conprove.com.br/pub/i_ps_simul.html

[2] Pereira, P. S., Pereira Junior, P. S., Martins, C. M., Salge, G. S., Lourenço, G. E., Da Silveira, P. M., Davi, M. J. B. B., Guerrero, C. A. V., Reis Filho, F. A. "Testes em Malha Fechada: Uma Comparação Entre Tempo Real e Método Iterativo"; SNPTEE 2017.

[3] Procedimentos de Rede – Módulo 3.6, NOS de 2017.

[4] Ingo Staudt, Semikron Application Note, AN-11001, Issue date: 2011-12-08.

[5] Serkan Sezen, Engin Ozdemir; "Modeling Simulation and Control of Three Phase Three Level Multilevel inverter for grid connected Photovoltaic System", Journal of Optoelectronics and advanced materials, 15, 335-341, 2013.

[6] I. Houssamo, F. Locment, and M. Sechilariu, "Maximum power point tracking for photovoltaic power system: Development and experimental comparison of two algorithms," Renewable Energy, vol. 35, no. 10, pp. 2381–2387, October 2010.

[7] Colak, E. Kabalci, and R. Bayindir, "Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes," Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 2, pp. 1114-1128, February 2011.

[8] M. I. Marei, M. Abdelaziz, and A. M. Assad, "A simple adaptive control technique for shunt active power filter based on clamped-type multilevel inverters, Consumer Electronics Times," vol. 2 no. 2, pp. 85–95, April 2013