



**XXIV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/14

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - GDS

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E ELETROMECAÑICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA COM A PRESENÇA DE FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA ELÉTRICA

**Gustavo Silva
Salge(*)
CONPROVE
Indústria e
Comércio**

**Paulo Sergio
Pereira Junior
CONPROVE
Indústria e
Comércio**

**Moisés Júnior
Batista B. Davi
CONPROVE
Indústria e
Comércio**

**Paulo Sergio
Pereira
CONPROVE
Engenharia**

**Gustavo Espinha
Lourenço
CONPROVE
Engenharia**

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova ferramenta computacional concebida e desenvolvida no Brasil, composta por diversos recursos que permitem a modelagem de sistemas de potência complexos e posterior análise de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos.

Neste contexto, serão apresentados os diversos modelos e recursos destinados à simulação de sistemas elétricos e por fim, será realizado um estudo de caso com geradores eólicos, objetivando demonstrar o potencial da ferramenta proposta.

PALAVRAS-CHAVE

Energias Renováveis, PS Simul, Simulação Computacional, Transitórios Eletromagnéticos, Transitórios Eletromecânicos

1.0 - INTRODUÇÃO

Em função da complexidade atual dos sistemas elétricos aliada à necessidade de cada vez mais se realizar análises transitórias com modelos fiéis do sistema de potência e controle, observa-se uma crescente demanda por ferramentas computacionais capazes de auxiliar nessas análises, o que tem resultado em uma solicitação do setor elétrico por softwares desenvolvidos para tais estudos.

Contudo, em uma grande parcela dos aplicativos disponíveis atualmente, o usuário ainda encontra dificuldades principalmente no que tange a dificuldade de manuseio, a interface gráfica, visualização e obtenção de resultados e entrada de dados nos módulos/blocos que representam os componentes. Outro aspecto de queixa dos usuários, se relaciona as limitações dos modelos disponibilizados pelos softwares que, em muitos casos, atendem apenas a uma pequena parcela de aplicações.

Diante disso, este artigo apresentará uma ferramenta que realiza a modelagem e análise de sistemas elétricos em geral utilizando diversos recursos que visam mitigar a grande maioria das dificuldades encontradas nas ferramentas hoje disponíveis, trazendo ao usuário um software com grande flexibilidade operacional.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

O programa PS SIMUL, desenvolvido no Brasil desde o ano de 2009 pela empresa CONPROVE, teve sua primeira versão lançada no ano de 2014, e possui uma versão demonstrativa disponibilizada pelo site da empresa. Este software, criado com a finalidade principal de permitir ao usuário modelar componentes dos sistemas de potência e de controle complexos 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.

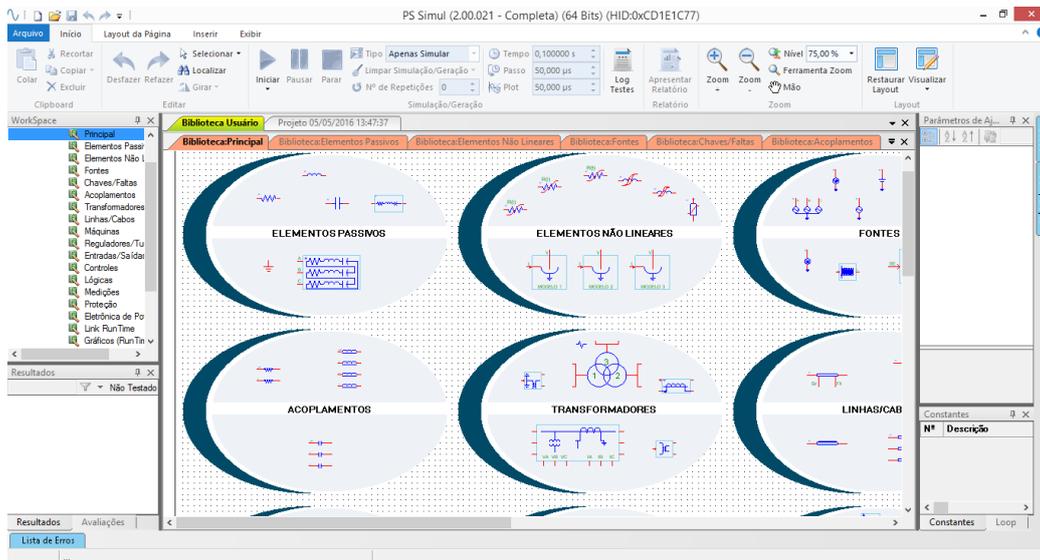


FIGURA 1 – Tela principal do programa PS SIMUL.

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, e etc. A figura 2 ilustra os ambientes supracitados.

É importante salientar que em um mesmo projeto, múltiplas páginas de Draft e Runtime podem ser inseridas de tal forma a manter os circuitos organizados. Para sistemas muito grandes e/ou com sistemas de controle, esse recurso permite que a modelagem fique ainda mais estruturada.

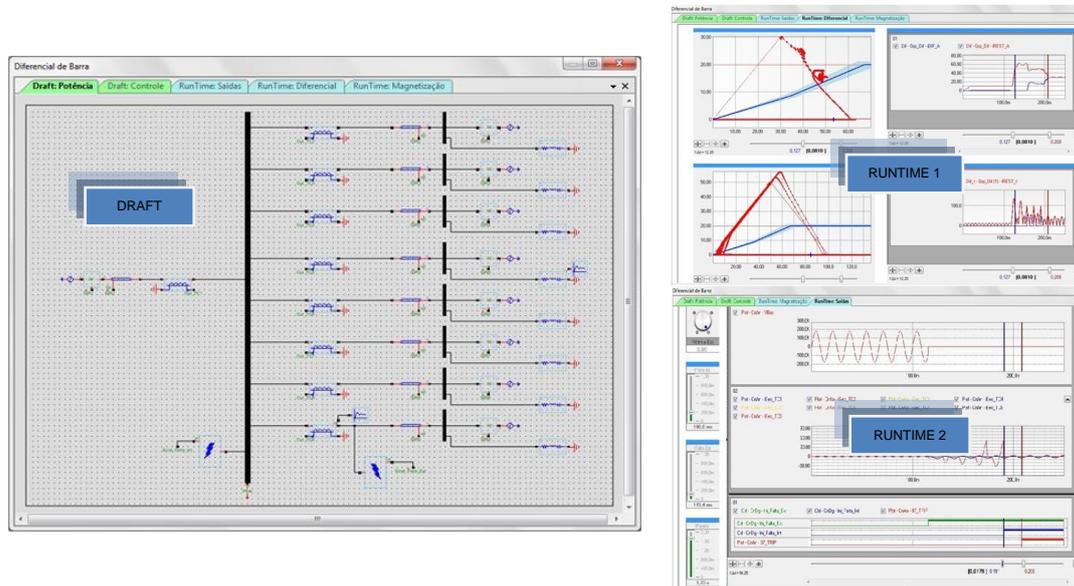


FIGURA 2 – Ambientes de Draft e Runtime do software PS Simul.

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

- Utiliza o método híbrido de solução das equações diferenciais (Trapezoidal + 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;
- Recursos de busca e comparação de componentes;
- Geração automática de relatórios completos das simulações;

- Recurso para declaração de parâmetros como constantes, lista de constantes e loop com constantes, permitindo ao usuário a realização de uma varredura nos valores ajustados de tal forma a obter os resultados automaticamente e estes armazenados em um mesmo arquivo;
- Definição, pelo usuário, de avaliações automáticas dos resultados obtidos, por amplitude ou tempo;
- Criação de blocos através de outros já existentes ou via programação nas linguagens C# ou VB;
- 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 testes em malha fechada com a realimentação de sinais binários;
- Disponível nos idiomas Português, Inglês e Espanhol.

No que tange a biblioteca do software, são disponibilizados 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. É válido ressaltar que com o intuito de agilizar e facilitar a modelagem do sistema, diversos blocos disponíveis no PS Simul já são uma junção de vários outros quando comparados a diferentes softwares no mercado.

Tendo em vista que o foco para demonstração desta ferramenta no artigo relaciona-se diretamente à utilização de modelos e recursos destinados à simulação de sistemas de transmissão com a presença de fontes renováveis, serão destacados os seguintes modelos:

- **Modelos de máquinas elétricas:**

São disponibilizados diversos modelos de máquinas elétricas como, por exemplo: máquinas síncronas (com possibilidade de conexão externa e entrada de dados por circuito equivalente ou dados de gerador), máquinas síncronas de ímã permanente, máquinas assíncronas trifásicas (entrada de dados por circuito equivalente, dados de ensaio ou dados de catálogo), máquinas assíncronas monofásicas (partidas com fase dividida, Capacitor-Start, Capacitor-Start-Run ou enrolamentos disponíveis), máquinas DC (excitação externa ou ímã permanente) e motores de passo (ímã permanente ou relutância variável).

- **Modelos de componentes de eletrônica de potência:**

Além dos componentes básicos da eletrônica de potência (Diodo, IGBT, Mosfet, Tiristor, TRIAC, etc.), estão disponíveis também modelos como: pontes retificadoras/inversoras monofásicas ou trifásicas, conversores DC-DC, compensadores série controlados por tiristores, compensadores estáticos de reativo, bancos de reatores e capacitores controlados por tiristores, controles para geração de pulsos, entre outros componentes.

- **Modelos de cargas para o sistema:**

A fim de representar as cargas de um sistema elétrico, são disponibilizados componentes RLC monofásicos e trifásicos nas mais diversas configurações (série, paralelo, estrela, delta, etc.), podendo ser definidos em função dos valores de potência ou pelos valores RLC. Existe ainda a possibilidade de simulação de cargas não lineares tais como indutores saturáveis, compensadores série capacitivos, para-raios, fornos à arco, entre outros, através de blocos já modelados no software.

- **Modelos completos 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 com os componentes de sequência, podendo ou não ser habilitado o recurso de falta para linhas 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 renováveis de energia:**

No que se refere a fontes renováveis de energia elétrica, são disponibilizados modelos para simulações de geração através das energias solar e eólica. Para geração solar, já existem modelados no software painéis fotovoltaicos, métodos de máxima transferência de potência (MPPT) e os conversores DC-DC (Buck, Buck-Boost, Cuk e Sepic). Em se tratando da energia eólica, que será utilizada para os estudos deste trabalho, são disponibilizados: turbinas (2 ou 3 pás), fontes eólicas com a caracterização de diversos fenômenos típicos do comportamento do vento (rajada, rampa, ruído, média) e reguladores de ângulo de inclinação das pás para a turbina.

3.0 - TOPOLOGIAS UTILIZADAS NA GERAÇÃO EÓLICA

Existem várias configurações utilizadas para conexão de geradores eólicos ao sistema de potência, no entanto, de um modo global, todas as tecnologias se enquadram em dois grandes grupos: geração eólica com velocidade fixa e com velocidade variável. A topologia de velocidade fixa é dotada de geradores de indução (assíncronos) enquanto que a de velocidade variável utiliza tanto geradores assíncronos quanto geradores síncronos. A literatura agrupa os principais arranjos que têm sido usados em parques eólicos no que tange a construção dos aerogeradores em quatro tipos:

TIPO I: utilizam geradores de indução com o rotor em gaiola de esquilo (GIGE) e operam em velocidade fixa ligeiramente acima da frequência da rede. Para compensar o baixo suporte de reativo fornecido à rede, bancos de capacitores são conectados em paralelo com os geradores e são chaveados de acordo com a potência gerada pela máquina. Visando compatibilizar a baixa frequência de rotação das pás (20 a 150 RPM) com a rotação normalmente exigida para o rotor (1200 a 1800 RPM), utiliza-se uma caixa de engrenagens multiplicadora. A partida da unidade é realizada por um soft-start, o qual é curto-circuitado em operação normal. A grande simplicidade desta tecnologia se justifica pelo fato do gerador encontrar-se conectado diretamente à rede elétrica.

TIPO II: são similares ao tipo I com a diferença de utilizar um gerador de indução com rotor bobinado (GIRB). Resistências variáveis são conectadas ao rotor através de anéis e escovas e ajustadas em função das flutuações da carga solicitada ao gerador. A mudança da resistência rotórica possibilita a variação da velocidade do gerador (cerca de 10% da nominal) por meio da variação do escorregamento. Assim como no TIPO I, necessita de uso da caixa de engrenagens, é conectado a um banco de capacitores e sua partida é realizada por um soft-start.

TIPOS III - conhecido como gerador de indução duplamente alimentado (GIDA), tem o seu estator acoplado diretamente a rede AC e da sua saída realimenta-se um sinal no rotor da máquina. Essa realimentação é feita usando um retificador e um inversor que trabalham de forma bidirecional, ou seja, permite o fluxo de energia em ambas as direções. Os conversores são projetados para fornecer uma potência de até 30% da potência total do aerogerador e permite uma faixa de velocidade de operação muito mais ampla que os tipos anteriores, normalmente entre 0,7 a 1,3 pu tornando o aerogerador mais eficiente na extração da potência do vento e na redução do stress mecânico do conjunto turbina-gerador. Devido à flexibilidade do controle dos inversores que utilizam técnicas de controle vetorial, o sistema permite controlar as tensões, ângulos e frequência do sinal aplicado no rotor, controlando assim o fluxo de potência ativa e reativa. Esse arranjo ainda necessita da caixa de engrenagens multiplicadora.

TIPO IV - podem ser construídos com geradores de indução (GI) ou síncronos (GS), sendo que os últimos podem ser com o rotor bobinado ou de ímã permanente. Esse arranjo utiliza a eletrônica de potência através de um sistema retificador e inversor para realizar o acoplamento do estator do gerador à rede AC do sistema elétrico. Por esse motivo, o conversor AC-AC deve ser projetado para 100% da potência nominal do gerador. Tendo em vista que a tensão fornecida à rede pelo gerador depende do inversor, o sistema permite que se projete o gerador para trabalhar com o rotor em uma ampla faixa de velocidades. O arranjo mecânico também permite variações, como por exemplo, a eliminação da caixa de engrenagens quando utilizado um gerador síncrono multipolos de ímã permanente.

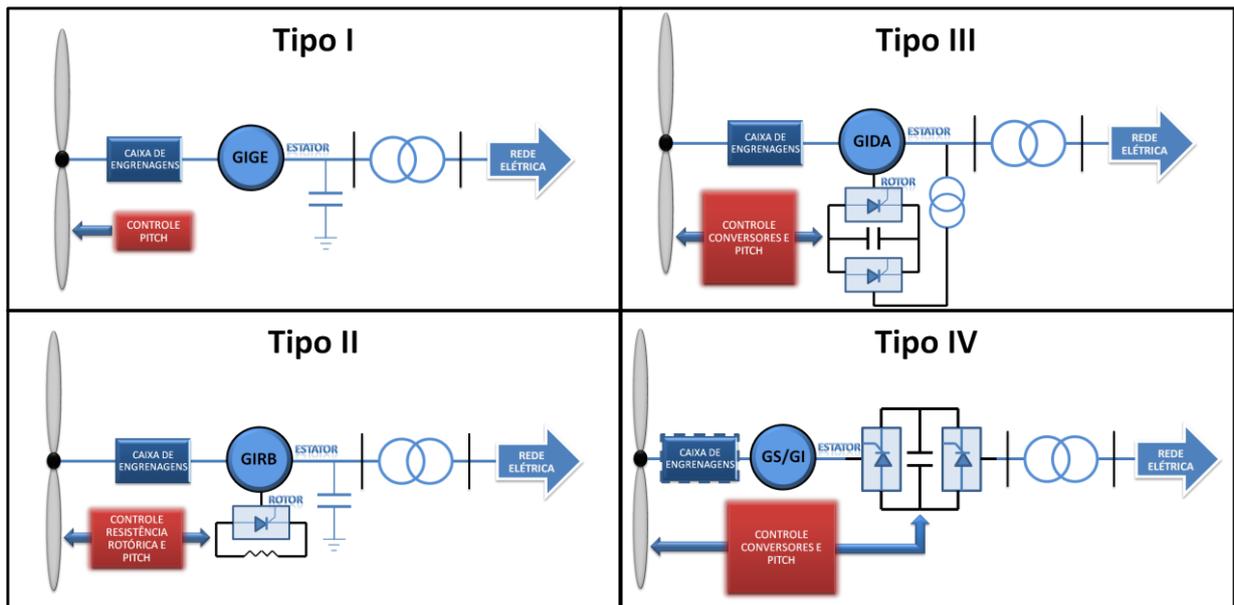


FIGURA 3 – Arranjos de aerogeradores.

4.0 - METODOLOGIA

Para exemplificar o potencial do software foi estabelecido o sistema do Tipo I, que retrata o caso de uma planta eólica utilizando geradores de indução acoplados a rede AC. Para tal, foram utilizados os modelos de gerador de indução, transformadores, fontes, cargas, controladores e turbinas eólicas já existentes no software. Para simulação da fonte de vento, foi utilizado um bloco capaz de reproduzir diversos fenômenos tais como: média, rajada, rampa e ruído, sendo a velocidade final uma composição dos fenômenos escolhidos pelo usuário.

O comportamento mecânico da turbina eólica com três pás foi modelado utilizando um bloco que tem como entrada a velocidade do vento [m/s], a velocidade mecânica da máquina conectada a turbina [rad/s] e o ângulo de inclinação das pás da turbina [graus]. Através do equacionamento realizado internamente por este componente, obtêm-se na saída: Tm [pu] e Pm [pu] que são o torque e potência mecânica da turbina, respectivamente. É válido ressaltar que a turbina modelada pode ser conectada tanto a um gerador síncrono quanto ao de indução. Além disso, o usuário pode observar o comportamento da turbina ($\omega \times P$) ao mesmo tempo em que a parametriza, através de um gráfico que é disposto ao lado da caixa de parametrização. A figura 4 apresenta um exemplo de parametrização da turbina, mostrando sua curva de comportamento.

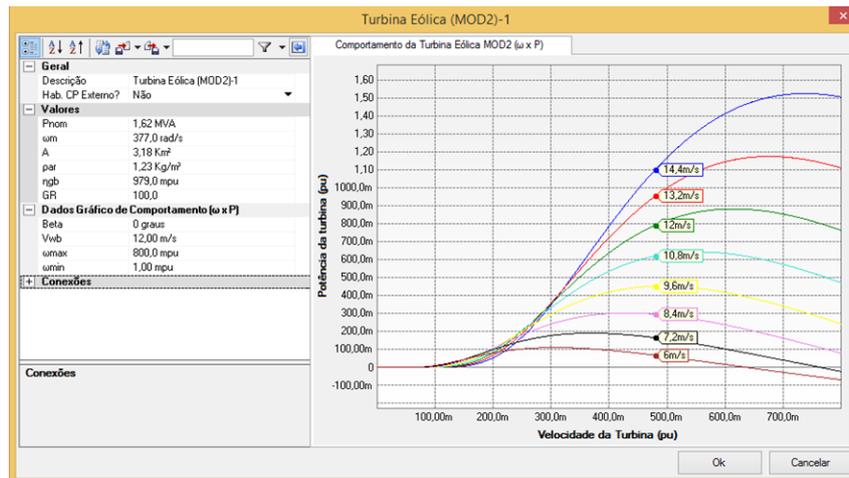


FIGURA 4 – Parametrização de uma turbina eólica com gráfico de comportamento.

4.1 O Sistema em estudo

O sistema simulado é representado na figura 5 e contempla um parque eólico construído com 80 aerogeradores dispostos em 4 coletores compostos de 20 geradores cada, sendo que cada gerador possui potência nominal de 5 MVA gerando na tensão nominal de 0.69 kV. Cada aerogerador é associado a um transformador elevador de 0.69/34.5 kV que são interconectados através de vários circuitos coletores 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).

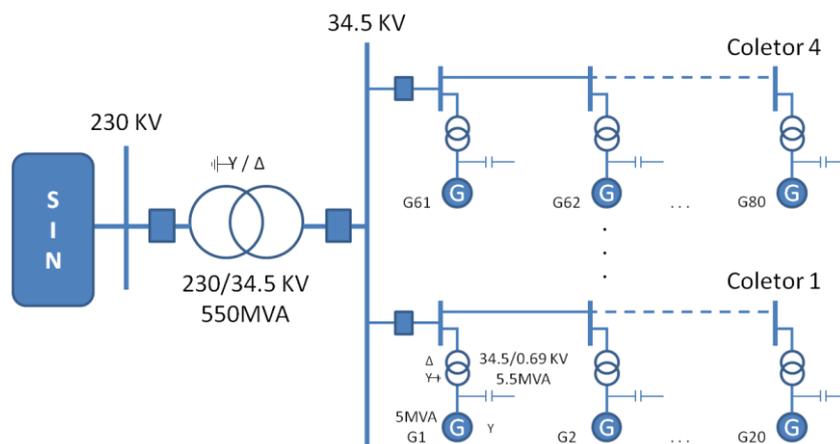


FIGURA 5 – Diagrama unifilar do parque eólico.

A confecção do sistema inclui os modelos para a velocidade do vento, modelagem do sistema mecânico, da máquina de indução de gaiola de esquilo 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 potencia. O sistema de energia AC foi

representado pelo equivalente de Thevenin através de uma fonte de tensão com uma impedância série. As figuras 6 e 7 ilustram o sistema modelado na tela do software destacando as várias partes que o compõe.

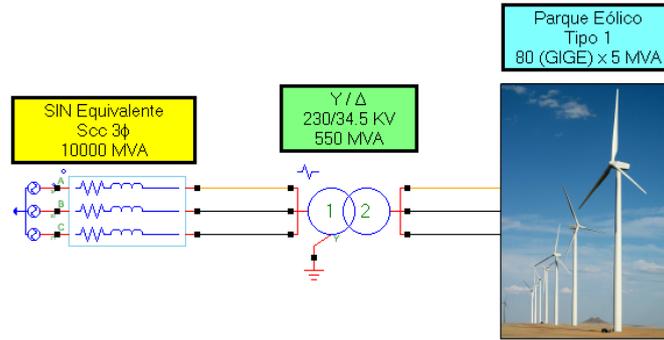


FIGURA 6 – Circuito de potência modelado no software PS Simul.

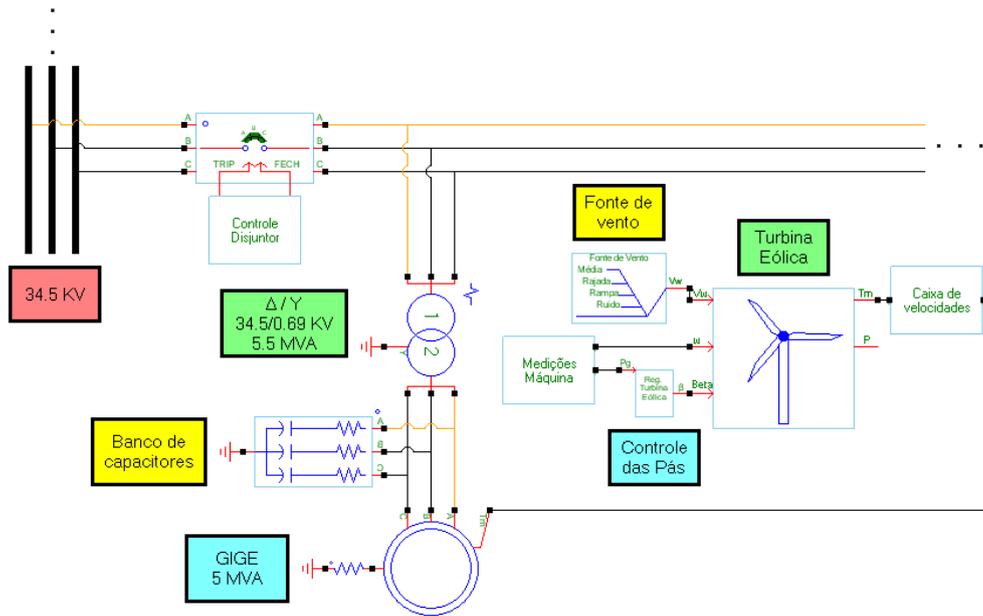


FIGURA 7 – Circuito de um dos aerogeradores com seu controle associado modelados no software PS Simul.

5.0 - ESTUDO DE CASO

Foram realizados dois estudos de caso para averiguação do comportamento do parque eólico em regime dinâmico frente a duas diferentes solicitações. No primeiro caso os aerogeradores operando inicialmente com vento incidente com velocidade média de 9 m/s com ocorrência de elevação da velocidade na forma de rajada para 13 m/s com duração do fenômeno de 3 s. No segundo cenário o parque eólico fornecendo máxima potência com ocorrência de falta trifásica no barramento de entrada da planta do lado de média tensão (34.5 kV) com duração de 0.1 s.

5.1 Caso 1 – Velocidade média de 9 m/s com aumento para 13 m/s na forma de rajada por 3 s

A alteração da velocidade do vento incidente nas pás dos aerogeradores do parque eólico caracteriza uma elevação temporária da energia ativa injetada na rede que logo é reajustada para as conduções operativas nominais pela ação dos controladores do ângulo das pás em conjunto com a turbina de vento. A variação da velocidade do vento foi realizada na forma de uma rajada segundo a Equação 1 [1] já modelada no software.

Onde,

$$\begin{aligned}
 & \text{se } t < T1g, & Vwraj &= 0 \\
 & \text{se } Vcos < t < T1g + Tg, & Vwraj &= Vcos \\
 & \text{se } t > T1g + Tg, & Vwraj &= 0
 \end{aligned}$$

$$Vcos = \left(\frac{MaxRaj}{2} \right) * \left(1 - \cos \left(2 * \pi * \left(\left(\frac{t}{Tg} \right) - \left(\frac{T1g}{Tg} \right) \right) \right) \right)$$

$MaxRaj$ → Define o pico de velocidade da rajada
 $T1g$ → Define o instante inicial da rajada
 Tg → Define o período da rajada

EQUAÇÃO 1 – Equação da fonte de vento para a saída em rajada.

Neste caso as máquinas estão operando próximas as suas potências nominais e a elevação do vento causa uma sobrecarga temporária nas máquinas que é regulada em função do controle das pás, o qual modifica a inclinação das mesmas de tal forma a equalizar o torque e a velocidade mecânica para que a potência máxima de geração não ultrapasse 1pu conforme definido no controle.

Para demonstrar a ação do controlador do ângulo das pás do aerogerador, a mesma situação também foi aplicada a um sistema sem a presença dessa regulação. A figura 8 ilustra as variações das potências ativa e reativa entregues pelo parque eólico ao SIN, assim como as ações dos controladores (ângulo das pás e torque mecânico) e a velocidade dos aerogeradores, além da característica do vento aplicado à turbina. Todos os gráficos apresentam o comportamento tanto do sistema com controle de ângulo das pás quanto no sistema com ausência do mesmo.

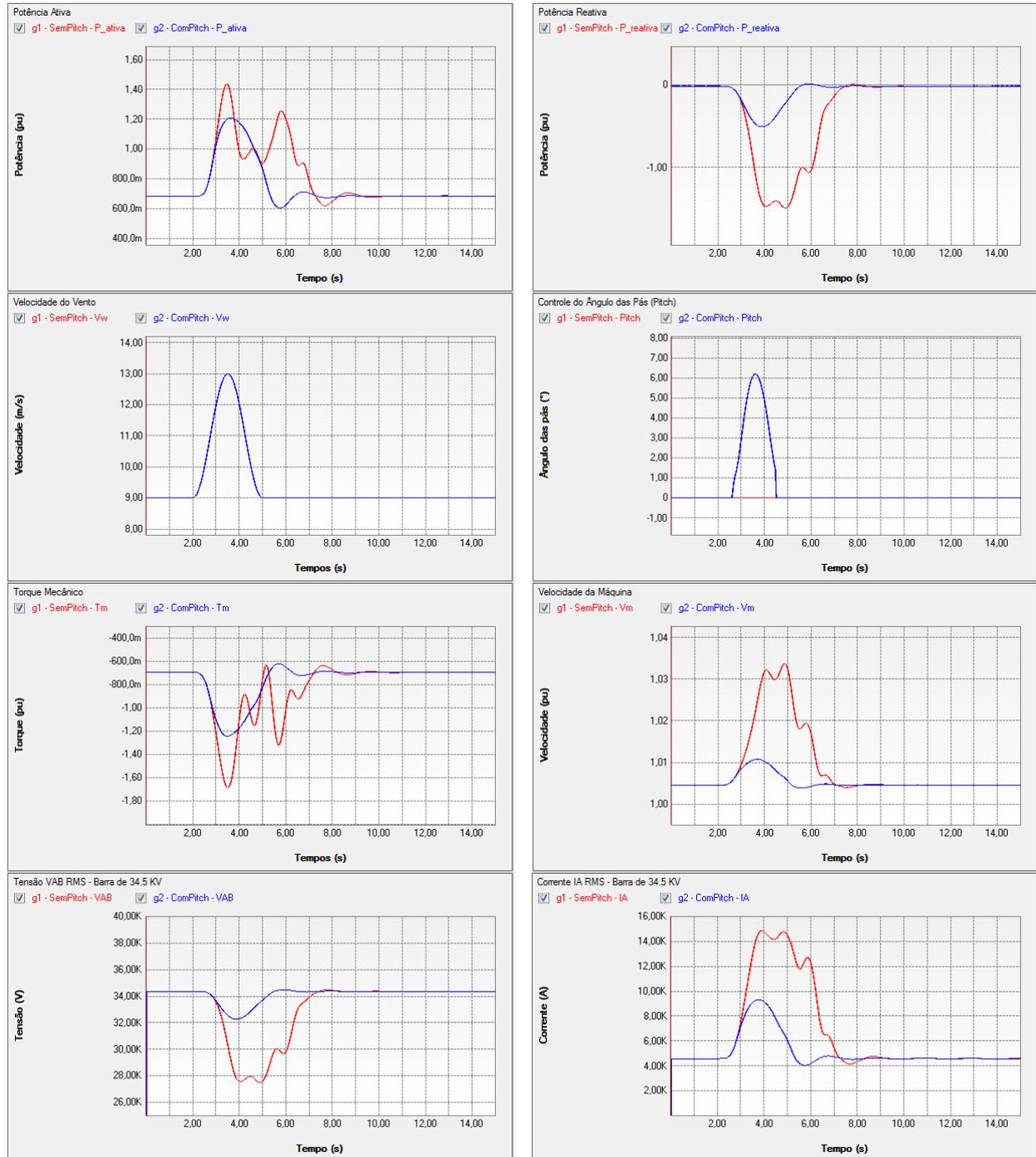


FIGURA 8 – Resultados da variação da velocidade do vento.

Percebe-se claramente a ação do sistema de controle levando as máquinas do parque a retornarem a condição de ajuste, que nesse caso, para um vento incidente de 9 m/s equivalem a 0.7 pu de geração de potência. Outro ponto

a ser observado a partir dos resultados é a importância do controle do ângulo das pás que limitou a taxa de variação da potência fornecida, evitando assim que as máquinas sofram um esforço excessivo.

5.2 Caso 2 – Vento com ruídos e aplicação de falta trifásica na barra de 34.5 kV durante 0.1 s

Neste segundo cenário foi aplicada uma falta trifásica temporária com duração de 0.1 s na média tensão (34.5 kV) no barramento de entrada da planta eólica de tal forma a analisar a contribuição do parque para o curto-circuito e a dinâmica do arranjo. Após a retirada do defeito verificou-se o comportamento dos controles da turbina dos aerogeradores no sentido de retomada do fornecimento de potência pela planta, como pode ser analisado através do comportamento da tensão e corrente do parque eólico juntamente com os gráficos de potência ativa e reativa apresentados pela figura 9.

Para este caso, a velocidade média do vento foi ajustada em 10m/s e a esse valor foram adicionados ruídos, os quais foram modelados através de uma função matemática [1] já modelada pela ferramenta e ditada por:

$$V_{\text{ruído}} = 2 * \sum_{i=1}^n \left((Sr(w_i) * \Delta\omega)^{\frac{1}{2}} \right) * \cos(w_i * t + \phi_i)$$

Onde,

$$w_i = \left(i - \left(\frac{1}{2} \right) \right) * \Delta\omega$$

$$Sr(w_i) = (2 * Km * F^2 * \text{módulo}(w_i)) / (\pi^2 * \left(1 + \left(F * \frac{w_i}{u * \pi} \right)^2 \right)^{\frac{1}{4}})$$

n → número de componentes do ruído

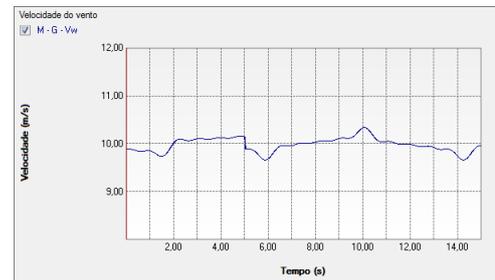
$\Delta\omega$ → controle da amplitude do ruído

Km → coeficiente de arrasto superficial

F → escala de turbulência

u → velocidade média (referência) do vento

ϕ_i → número aleatório no intervalo de 0 a 2π



EQUAÇÃO 2 – Equação e forma de onda da fonte de vento para a saída com ruído.

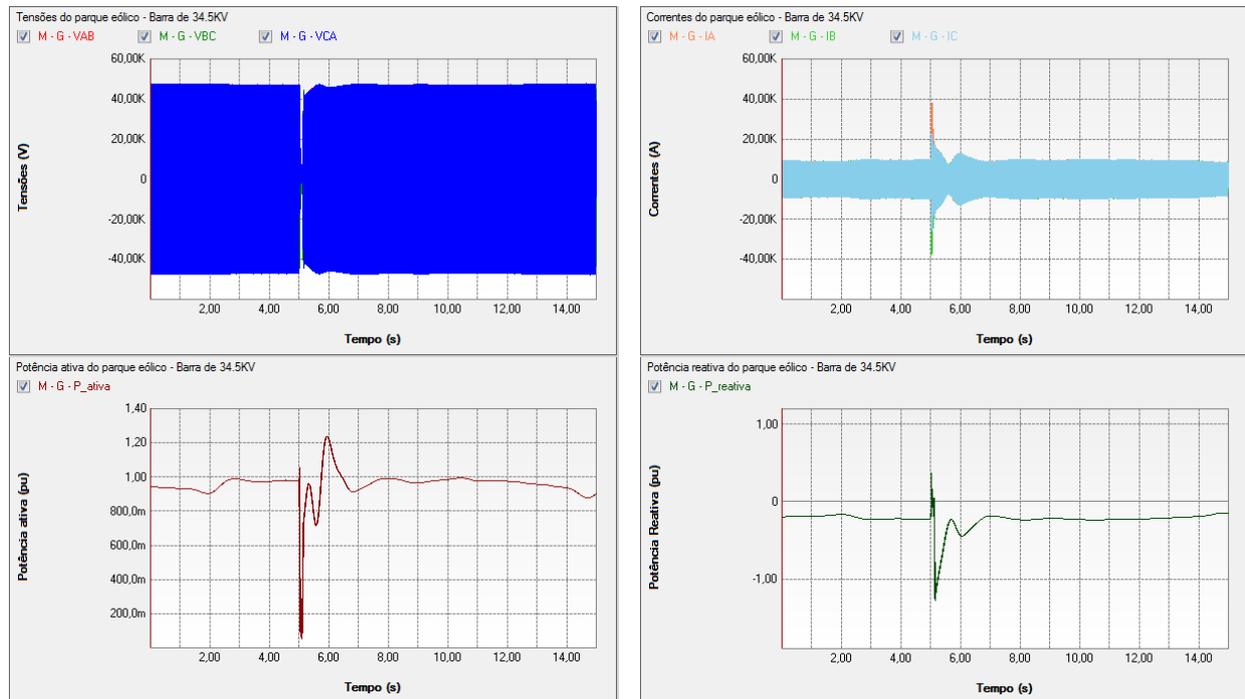


FIGURA 9 – Resultados da aplicação da falta.

Nota-se pelos resultados obtidos que o ruído aplicado ao vento provoca uma oscilação da potência fornecida em regime permanente e o fornecimento de potência ativa e reativa permanecem praticamente nulos durante a falta e após a sua retirada os controles atuam para que o fornecimento de potência seja reestabelecido. Percebem-se também distorções harmônicas nos sinais de corrente durante os primeiros ciclos de aplicação da falta e durante a sua eliminação devido à súbita retomada da tensão da rede.

Além da análise do comportamento eletromecânico das máquinas podemos realizar também o estudo eletromagnético do caso no PS Simul. Utilizando um dos recursos de verificação de indicadores de qualidade de energia presentes no software, foram detectadas algumas distorções transitórias com períodos de alguns ciclos durante a aplicação e retirada da falta como pode ser comprovado pela figura 10 que apresenta um zoom nas correntes da Figura 9 durante a falta e a decomposição harmônica de um ciclo da corrente da fase A até a 50ª ordem a partir do momento destacado na imagem.

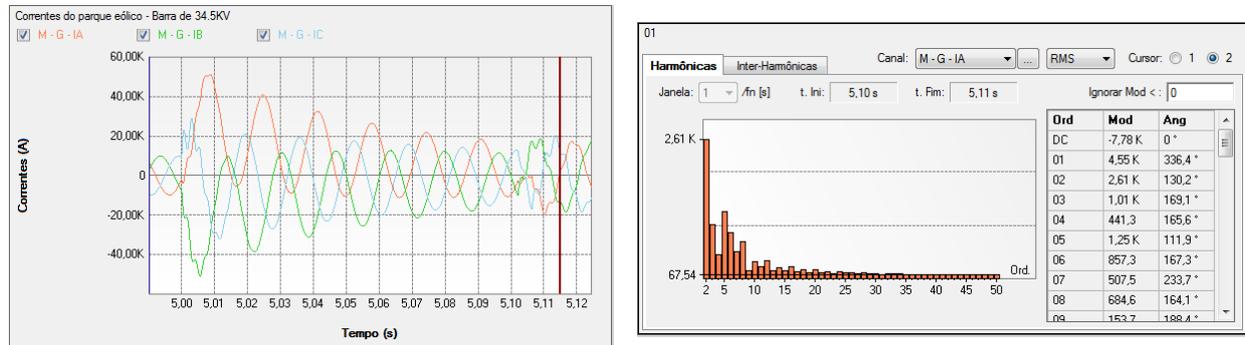


FIGURA 10 – Gráfico da distorção harmônica presente durante a falta.

6.0 - CONCLUSÕES

Um novo software desenvolvido no Brasil foi apresentado, ilustrando o potencial do mesmo 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 a modelagem de parques eólicos, 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 que ocorrem diariamente pelos especialistas das empresas analisando 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 de difícil uso equanto que outras mais sofisticadas possuem custo elevado, dificultando 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-las nos diversos setores realizando estudos eletromagnéticos e eletromecânicos sem grandes complicações e sobretudo com baixo custo.

Aliado a isso a presença no Brasil de uma equipe que desenvolvedores de software da iniciativa privada vem somar a equipe existente em Universidades e Centros de pesquisa de forma a aproximar e melhorar a qualidade das soluções oferecidas e criar uma massa de competência no assunto à nível nacional.

Estabelecida tal competência, poderá haver troca de experiências de forma que o Brasil possa ter uma maior equipe que se dedique a modelagem e implementação de softwares que atendam as necessidades das empresas brasileiras, de forma a assegurar melhores resultados e consequentemente aumentar a confiabilidade e a robustez do Sistema Elétrico Brasileiro.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CONPROVE INDÚSTRIA E COMÉRCIO. PS Simul: Manual de utilização do software. Uberlândia: 2017, 881p. Versão demonstrativa disponível em: www.conprove.com.br/pub/i_ps_simul.html. Acesso em: 27/03/2017.
- (2) PAVINATTO, Eduardo Fiorini, 2005. Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- (3) BONELLI, Arthur Fernando. Modelagem e simulação de unidade eólica para estudos de indicadores de qualidade da energia elétrica. 2010. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- (4) SENGER, E. C., REIS FILHO, F. A.. Plantas eólicas: modelagem para estudos de curto-circuito e critérios de ajustes das proteções, STPC 2014, Brasil.