

Desenvolvimento de um Sistema de Medição e Análise de Qualidade de Energia Elétrica em Aerogeradores em Conformidade com a Norma IEC 61400-21

Hudson da S. Resende

Unidade de Pesquisa Aplicada, UNPA
Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis,
CTGAS-ER
Natal/RN, Brasil
hudsonresende@ctgas.com.br

M. Firmino de Medeiros J

J. Tavares de Oliveira
Departamento de Engenharia de Computação e Automação,
DCA
Departamento de Engenharia Elétrica, DEE
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN
Natal/RN, Brasil
firmينو@dca.ufrn.br; jtavares@ct.ufrn.br

Resumo — Este trabalho apresenta de forma sucinta a primeira etapa das atividades desenvolvidas na elaboração de um Sistema para Medição, Aquisição e análise de dados de Qualidade de Energia Elétrica gerada por aerogeradores conectados ao Sistema Elétrico de Potência - SEP, em conformidade com a norma IEC 61400-21 [1] e utilizando a plataforma NI-CompactRIO/LabVIEW®. Para a validação do sistema proposto, foram realizadas medições em um aerogerador síncrono de polos bobinados de 600 kW instalado em um parque eólico em operação comercial. Como resultado, são apresentadas algumas das características da energia elétrica gerada pela máquina, através da análise e comparação de dados de aquisição obtidos com o sistema desenvolvido, como velocidade de vento, tensão e corrente elétricas, e a potência ativa.

Palavras-Chave- Qualidade de energia, aerogeradores, NI-CompactRIO, LabVIEW.

I. INTRODUÇÃO.

Com objetivo de diversificar a matriz energética e diminuir o impacto ambiental (aquecimento global, alagamentos, etc.) causado pela humanidade, há uma tendência mundial do uso de fontes de energia renováveis para a geração de energia elétrica. Dentre essas fontes a que mais vem se destacando é a eólica.

Porém, à medida que os aerogeradores em parques eólicos são utilizados em número crescente, torna-se cada vez mais necessária a caracterização do comportamento elétrico destas máquinas que possuem, na sua maioria, uma dinâmica de sistema não linear, principalmente no que diz respeito à qualidade da energia elétrica gerada.

Com base neste contexto, foram publicadas normas internacionais para qualidade de energia elétrica, e especificamente para análise de qualidade de energia em aerogeradores, destacando-se a norma IEC61400-21, cujo conteúdo trata da descrição dos procedimentos, dos requisitos

mínimos dos equipamentos para realização de ensaios, e das referências para avaliação dos resultados de medição. No Brasil, essa norma IEC serviu como referência para a elaboração da ABNT NBR IEC 61400-21 [3], norma desenvolvida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

Em Carnielutti [4] é apresentado um sistema de tempo real para a análise de desempenho e qualimetria de aerogeradores conectados à rede, onde é implementado em DSP o algoritmo PLL *Decoupled Double Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop* (DDSRF-PLL), que a partir de componentes simétricas estimadas, calcula as potências ativas, reativas e outros parâmetros de qualidade em conformidade com a IEC 61400. O sistema foi testado em uma bancada experimental que emula as características estáticas e dinâmicas (desconsideradas em alguns testes) de um aerogerador de velocidade fixa conectado à rede elétrica.

A implementação do sistema citado em [4] considera apenas a edição antiga da IEC 61400-21 [2] e um modelo de aerogerador com pouco emprego em parques eólicos no Brasil. O mesmo foi validado através da emulação de uma máquina real.

Este artigo, propõe um sistema de tempo real (*software e hardware*) para medição e análise de qualidade de energia em aerogeradores conectados ao SEP denominado de SMAQEE desenvolvido pela equipe do CTGAS-ER.

São apresentadas as atividades de especificação de equipamentos e componentes, e o desenvolvimento de uma solução para a aquisição e processamento de dados de vento, tensão e corrente de aerogeradores. Esta solução foi elaborada a partir do software LabVIEW® e embarcada na plataforma CompactRIO ambos do fabricante National Instruments. Os dados e resultados das medições foram validados a partir da comparação com os dados medição de um equipamento FLUKE 1760 certificado e do sistema SCADA de um parque eólico da Petrobras, que possui capacidade instalada de 1,8 MW e opera

com aerogeradores síncronos de 600 kW de polos bobinados, velocidade variável, modelo ENERCON E-40/6.44 600 44, instalados na cidade de Macau/RN.

Esses dados foram utilizados no desenvolvimento de algoritmos que calculam a potência ativa e futuramente serão aplicados em algoritmos desenvolvidos para o ensaio e cálculo dos outros parâmetros da norma NBR IEC 61400-21[3] como: Ensaios de potência ativa e reativa, variação de tensão, harmônicas, interarmônicas, componentes de alta frequência, proteção de rede e tempo de reconexão.

Este trabalho foi elaborado com o objetivo de dar suporte ao grupo de avaliação de aerogeradores no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL com o título “Aprimoramento de Aerogerador de 2MW para Adequação às Condições Eólicas Brasileiras”, código ANEEL PD-0553-0020/2012, tendo como proponente a Petrobras e como executor o CTGAS-ER(Centro de Tecnologias dos Gás e Energias Renováveis), a UFRN(Universidade Federal do Rio Grande do Norte) e a UFPE(Universidade Federal de Pernambuco).

II. NORMA IEC - 61400-21 (EDIÇÃO 2.0 2008-08)

A norma IEC-61400-21 intitulada "Parte 21: Medição e avaliação das características de qualidade de energia elétrica de aerogeradores conectados à rede" é a parte da série das IEC 61400 que, no seu escopo, inclui principalmente:

- A definição e a especificação dos parâmetros a serem determinados para caracterizar a qualidade da energia gerada por um aerogerador;
- Procedimentos de medição (incluindo os requisitos mínimos para especificação de equipamentos de medição) e testes (ensaios) para quantificar essas características;
- Procedimentos para avaliar o cumprimento das exigências de potência, incluindo a estimativa da qualidade da energia esperada de um aerogerador específico instalado em um parque eólico.

Os parâmetros definidos pela norma devem ser obtidos por medição e analisados em todas as faixas de operação do aerogerador. Os mesmos são descritos na seguinte sequência.

1. FLUTUAÇÕES DE TENSÃO, CINTILAÇÃO (*flicker*) E VARIAÇÕES DE TENSÃO: Caracterizados de acordo com o tipo de operação, podendo ser CONTÍNUA ou de CHAVEAMENTO;
2. CORRENTES HARMÔNICAS, INTERARMÔNICAS E COMPONENTES DE ALTA FREQUÊNCIA;
3. POTÊNCIA ATIVA: Máxima potência medida, Limite de Taxa de inclinação (Rampa) e Controle de referência (*Set-point*);
4. POTÊNCIA REATIVA: Capacidade de Potência Reativa, e Controle de referência (*Set-point*);
5. PROTEÇÃO DE REDE: Nível de desconexão (por sub e sobre tensão e sub e sobre frequência) e Tempo de desconexão (por sub e sobre tensão e sub e sobre frequência);

6. TEMPO DE RECONEXÃO: Tempo que o aerogerador leva para começar a produzir energia a partir do instante em que a rede está disponível em seus terminais após uma falta de 10s, 1min e 10min.

A medição e cálculo de todos os parâmetros da norma são baseados na medição de dados de vento, de corrente e tensão elétrica obtidos a uma taxa de amostragem mínima de 1 Hz para os dados de vento e 2 kHz para dados de tensão e corrente, sendo que para os ensaios de harmônica e componentes de alta frequência essa taxa mínima aumenta para 20 kHz.

Para realizar essas atividades de medição e aquisição de dados, o primeiro passo foi elaborar a especificação dos equipamentos e os programas para realizar a aquisição, sincronismo, tratamento, enfileiramento e cálculos iniciais de potência a partir dos dados de corrente, tensão e vento. Esses algoritmos constituem um bloco que foi denominado de bloco de aquisição. O desenvolvimento desse sistema se constitui no escopo desse artigo e servirá de base para o cálculo dos outros parâmetros da norma em trabalhos futuros.

III. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

A. Os equipamentos (hardware)

Os requisitos mínimos para especificar os equipamentos, bem como para a validade e especificação das condições de ensaio são padronizados e descritos na norma. Baseado nessas informações foi desenvolvido o sistema proposto neste artigo cujos elementos podem ser visualizados na Fig.1.

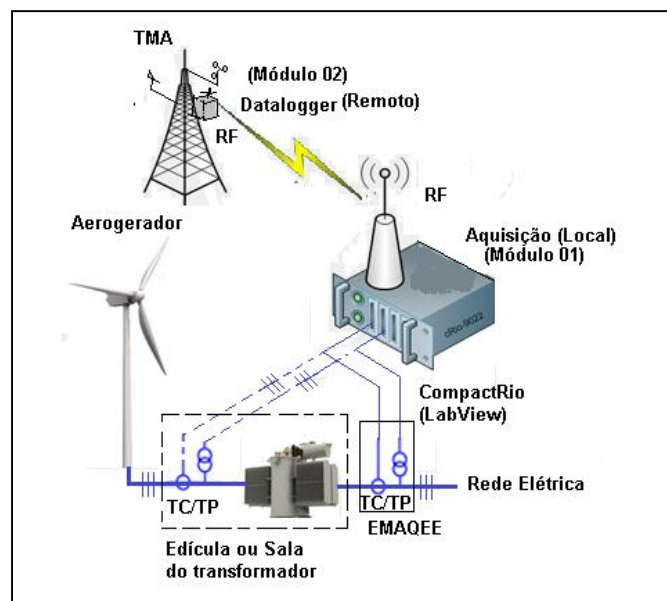


Figura 1. Sistema proposto

A arquitetura base de hardware está fundamentada em dois dispositivos. Uma primeira unidade de aquisição de dados (módulo 01) montado na plataforma CompactRIO, que consiste em um sistema reconfigurável composto de três componentes principais: Um processador com sistema operacional em tempo real (CompactRIO 9022), um chassi cRIO-9112 Xilinx Virtex-5 FPGA (*Field Programmable Gate Array*) reconfigurável e módulos de entrada/saída industriais.

O módulo 01 tem a principal função de fazer a aquisição de dados de medição de corrente e tensão nos terminais do aerogerador. Como a norma IEC 61400-21 em sua última versão não especifica onde são os terminais do aerogerador, cabe ao fabricante definir, e partindo dessa informação o módulo 01 pode trabalhar em duas configurações:

- Configuração 01 - Medição trifásica em Baixa Tensão (BT) na edícula ou sala do transformador de potência do aerogerador, em conjunto com transdutores de tensão modelo LEM CV 3-1500 (entrada: 0 a 1000 Vca rms/saída 0 a 10 Vcc) e Transformadores de Corrente (TCs) modelo LEM LT 2005-S (entrada: 0 a 2000 A/saída: 0 a 400 mA) para medições em aerogeradores de até 1,8 MW em 690 Vca ou modelo LEM LT 4000-S (entrada: 0 a 4000 A/saída: 0 a 800 mA) para aerogeradores com maior potência. Ambos os TCs têm uma banda passante 100 kHz e classe de exatidão 0,3 ideais para uma resposta em frequência requerida pela norma.
- Configuração 02 - Medição trifásica em Média Tensão (MT) dentro de uma estação móvel para medição de tensão e corrente em média tensão denominada EMMAQEE- MT (Equipamento Móvel de Medição e Aquisição de dados de Qualidade de Energia Elétrica em Média Tensão), com barramento com capacidade de até 400 A nominal em conjunto com Transformadores de Potencial (TPs) relação $13,8 \text{ kV}/(115/\sqrt{3})$ para redes coletoras (redes de distribuição interna) de 13,8 kV ou TPs relação $34,5 \text{ kV}/(115/\sqrt{3})$ para redes de 34,5 kV (A maioria dos parques eólicos no Brasil estão conectados neste nível de tensão). Ambos os TPs têm uma classe de exatidão 0,3 atendendo a norma.

Observação: O SMAQEE é o conjunto software e hardware, que pode ser utilizado na configuração 01 ou configuração 02 (EMMAQEE).

Nas duas configurações citadas, o módulo 01 também armazena os dados transmitidos do Módulo 02 (*Datalogger* Meteo-40L do fabricante Ammonit, instalado em uma torre de medição anemométrica (TMA)) via protocolo TCP/IP em uma arquitetura Ethernet, que por sua vez, está conectada a um canal de comunicação por rádio frequência (RF). O canal de comunicação RF é proporcionado pelo uso de transceptores modelo APC 5M da Intelbras ou modelo NanoBridge M5 22 da Ubiquiti.

O módulo 02 tem como função principal fazer a aquisição dos dados de velocidade (usados nos cálculos dos parâmetros da norma) e direção de vento a uma frequência máxima de amostragem de 1 Hz e enviar esses dados para o módulo 01. Para isso, faz uso de um anemômetro de copos e uma biruta potenciométrica.

Todos os equipamentos periféricos de comunicação e proteção do módulo 02 na TMA são alimentados por um sistema de energia fotovoltaica que, quando não está fornecendo energia para o módulo 02, está alimentando e armazenando a mesma em uma bateria dimensionada para suprir potência ao módulo 02 em períodos de baixa ou ausência da incidência solar no painel, evitando a perda de dados durante as campanhas de medição.

Ainda em relação à escolha da plataforma CompactRIO, o processador de tempo real fornece comportamento determinístico e capacidade de executar operações de ponto-flutuante. O FPGA permite que sejam desenvolvidas lógicas que necessitem de alta velocidade de execução e temporização precisa. Estes são conectados por um barramento PCI. Os submódulos industriais podem ser acoplados no sistema fornecendo sensores adequados aos requisitos da IEC 61400-21, ligados diretamente ao FPGA permitindo assim altas taxas de aquisição. Os submódulos escolhidos (NI 9225 e NI 9227 para medição de tensão e corrente) foram validados com os requisitos da norma no item 3. – Requisitos para Medição.

Maiores detalhes sobre a implementação desse sistema podem ser encontrados em [4] - [8] "não publicados".

B. Software

1) Aquisição de dados de vento.

Para a aquisição dos dados de vento foi utilizada a solução de software do próprio Datalogger da Ammonit que já faz a amostragem dos dados e transmite para o CompactRIO.

2) Aquisição para FPGA.

Já o algoritmo desenvolvido neste trabalho e embarcado no FPGA do CompactRIO foi elaborado em LabVIEW®, cuja programação se baseia em VIs (*Virtual instruments*), onde várias VIs são interligadas para formar programas funcionais.

Para o sistema proposto foi desenvolvida uma VI para a aquisição de dados a partir dos módulos conectados ao FPGA do chassi cRIO-9112

A programação para o mesmo foi feita com o módulo NI LabVIEW FPGA® e convertido por este mesmo em VHDL (*Very High Speed Integrated Circuits*), que é uma linguagem utilizada para descrever hardware. Em seguida, o compilador da Xilinx é chamado para compilar e efetuar o *deploy*, ou seja, para rodar a aplicação.

Inicialmente os submódulos de tensão e corrente (NI 9225 e NI 9227) conectados ao chassi FPGA são inicializados em uma estrutura sequencial com uma taxa de amostragem que pode ser configurada de 2 kHz ou 25 KHz. No mesmo bloco ocorre uma comunicação com a controladora que se prepara para receber os dados, a mesma responde dando início a amostragem de dados.

Após essa primeira etapa, ainda no mesmo bloco de sequência, são executados laços que fazem a verificação de parâmetros como a garantia da temporização e tempo de compilação, que só serão executados se houver algum problema.

Em seguida é feita a obtenção dos dados em representação de ponto fixo (ajustados para atender a norma) para na etapa seguinte ser montado com os mesmos um vetor que será iterado para envio de seus elementos em ordem para uma fila FIFO (*Fist In Fist Out*), informação produzida também no FPGA e absorvida pela controladora obtendo acesso direto à memória DMA (*Direct Memory Access*), esses dados, nas próximas etapas são tratados no formato de vetores que por sua vez são utilizados nas VIs para o cálculo das potências. No final do bloco de sequência os submódulos são parados. Um detalhe do laço de aquisição de dados dentro da estrutura sequencial de operações pode ser visualizado na Fig. 2.

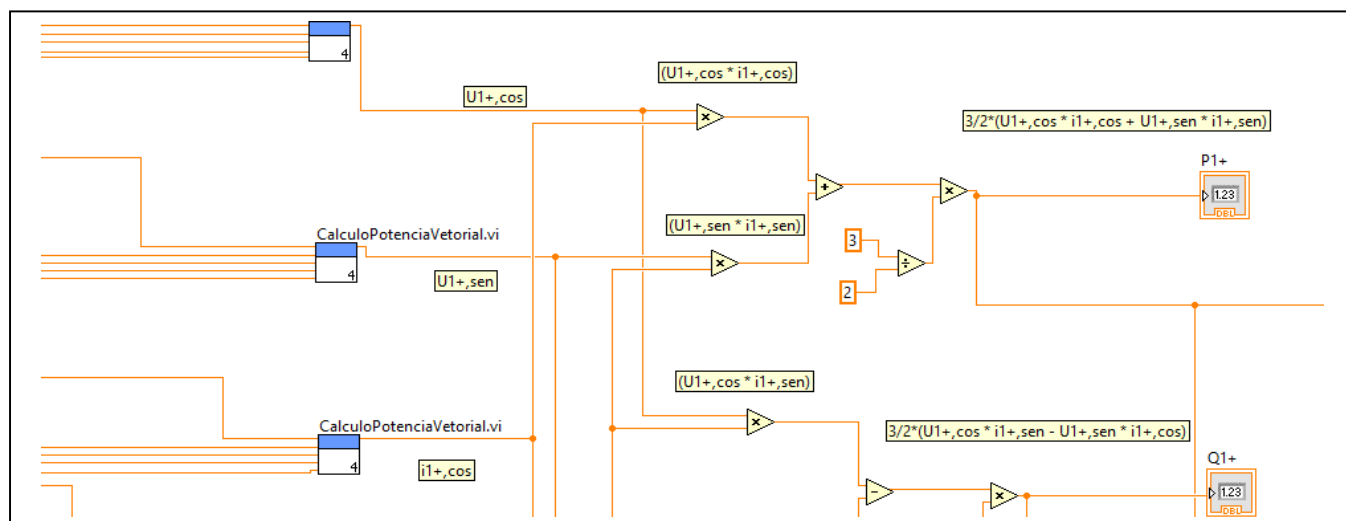


Figura 3 – Trecho da VI cálculo da potência ativa

IV.RESULTADOS E COMPARAÇÕES

1) Os locais de ensaio.

Inicialmente, por questões de logística, foram realizadas medições e comparações visuais iniciais de dados com equipamentos certificados na Subestação Elétrica do CTGAS-ER (SE-CTGAS) simulando a situação real através da utilização dos painéis elétricos e de um segmento de uma torre de medição anemométrica instrumentada com um sistema de aquisição (*Datalogger*) e anemômetro. Após essa fase, as medições foram efetuadas no parque eólico piloto da Petrobras (1,8 MW) localizado na cidade de Macau/RN. Este apresenta 03 aerogeradores síncronos de 600 kW de polos bobinados, velocidade variável, modelo ENERCON E-40/6.44 600 44.

2) Resultados comparativos de Tensão e Corrente

Inicialmente foi feita uma inspeção visual nos formatos dos sinais de tensão e corrente com o objetivo de identificar não conformidades em relação as medidas obtidas em paralelo através de um equipamento certificado. Esta inspeção visual é de grande importância em intervenções em campo, já que testes mais precisos costumam ser inviabilizados pelas condições locais. A inspeção visual foi feita com os resultados de comparação de medição simultânea (em toda a campanha) com um equipamento certificado para medição de potência, o qualímetro FLUKE 1760, utilizado também para o processo de certificação da solução proposta. Tantos os dados gerados pelo SMAQEE quanto os dados gerados simultaneamente pelo FLUKE, foram analisados e validados através de um software desenvolvido pela equipe da UFRN cujos detalhes podem ser vistos em [7]. Na sequência são mostrados em Fig. 4-7 os exemplos de séries temporais de corrente e tensão respectivamente, obtidos após as medições. Observar que os gráficos de corrente indicam um desbalanceamento visível nos sinais de saída medidos em ambos os equipamentos, mostrando que o sinal medido e gerado na solução desenvolvida estava em conformidade com o equipamento de referência. Nos mesmos

gráficos, não foram referenciados as amplitudes e frequências, pois o intuito inicial foi verificar apenas o formato de onda.

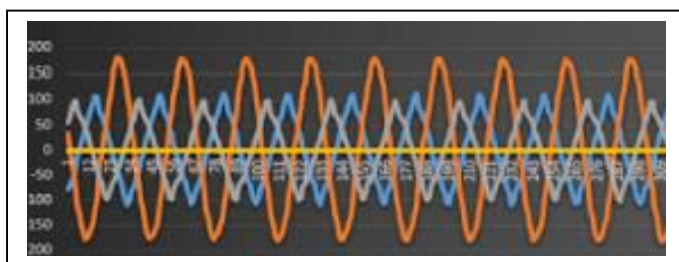


Figura 4 - Corrente medida pela solução desenvolvida.

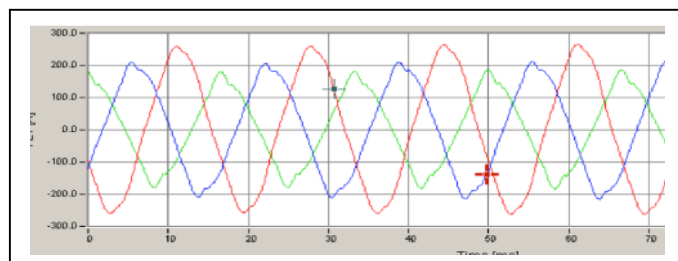


Figura 5 - Corrente medida pelo 1º equipamento de referência (Fluke 1760).

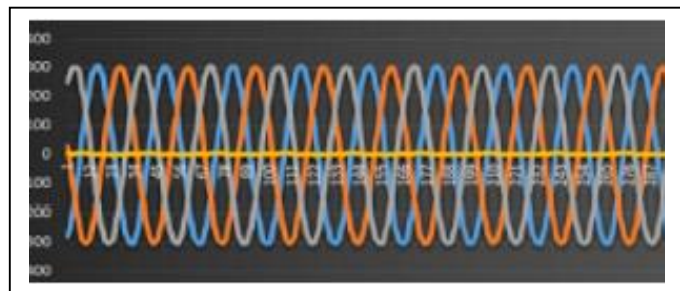


Figura 6 - Tensão medida pela solução desenvolvida.

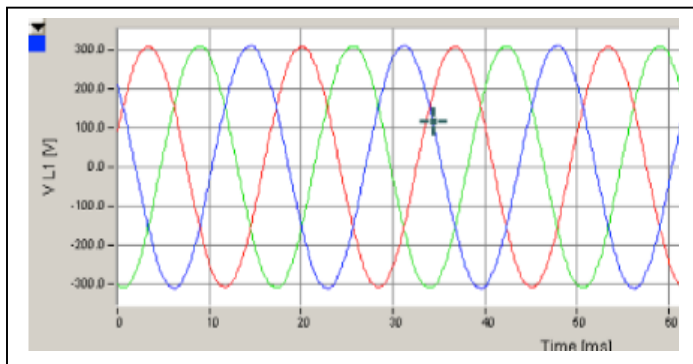


Figura 7 - Tensão medida pela solução desenvolvida.

3) Resultados comparativos potência

A Fig. 8 traz um exemplo de uma série temporal com dados médios de 10 min do vento em (p.u.) e com velocidade média de 6 m/s, mas com turbulências de 5 a 15%. Já nas Fig. 9 e Fig.10, mostram respectivamente as potências ativas calculadas pelo SMAQEE e pelo software SCADA do parque, ambos com dados médios de 10 minutos em p.u. Analisando as figuras 10 e comparando com as figuras 11 e 12, observa-se a influência do vento na geração da potência ativa. Quando a velocidade do vento aumenta ou diminui, a potência ativa aumenta ou diminui proporcionalmente à essa velocidade. Essa variação foi observada em ambos os sistemas com grau de similaridade bastante elevado. Os gráficos das Fig. 8-10 são mostrados também apenas para mostrar o grau de similaridade entre os dados calculados pela solução proposta e os dados calculados pelo sistema de aquisição SCADA.

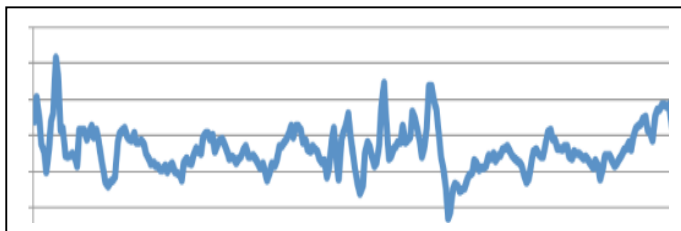


Figura 8 - Dados de vento na altura do rotor

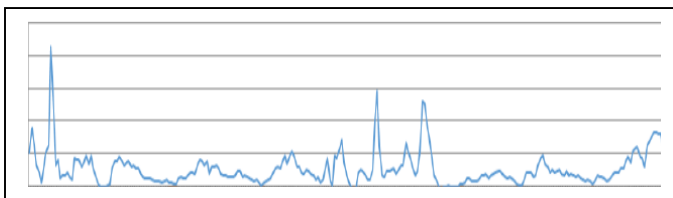


Figura 9 - Dados de potência ativa calculados pela solução desenvolvida (p.u.).

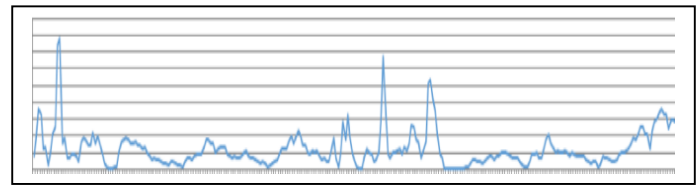


Figura 10 - Dados de potência ativa calculada pelo sistema SCADA (p.u.).

V. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi possível desenvolver a primeira etapa de um sistema de tempo real (software e hardware) para medição e análise de qualidade de energia em aerogeradores conectados ao SEP, denominado SMAQEE, cujos dados servirão de base para os cálculos de outros parâmetros de qualidade previstos na IEC 61400-21. A maior vantagem desse trabalho é que o mesmo foi desenvolvido e testado em um equipamento comercial, cuja tecnologia é atual e empregada em vários parques brasileiros. As medições e comparações foram realizadas com êxito, pois apresentaram um grau de similaridade bastante elevado quando comparados os sinais processados SMAQEE em comparação com os equipamentos de referência, além de validarem a solução proposta, mostraram como se comporta a dinâmica real de um aerogerador.

REFERÊNCIAS

Normas:

- [1] IEC Wind Turbines – Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines, std. 61400-21, Aug. 2008.
- [2] IEC Wind Turbines – Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines, std. 61400-21, Dez. 2001.
- [3] ABNT NBR IEC Turbinas eólicas – Parte 21: Medição e avaliação das características da qualidade da energia de aerogeradores conectados à rede, norma 61400-21, Out. 2010.

Artigos em anais de congresso (Publicados):

- [4] F. M. Camielutti, M. Martins e H. Pinheiro, "Caracterização da qualidade da energia e desempenho de potência de turbinas eólicas," em 2010 - XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), pp. 1866-1873.

Relatórios Técnicos (Não Publicados):

- [5] M. F. Medeiros J., J. T. Oliveira, e F. C. Mota, "R1 – Relatório de Instalação e Parametrização de Qualímetros - Projeto P009 – Avaliação e Caracterização de Impactos de Aerogeradores na Qualidade da Energia Elétrica" CTGAS-ER, Natal, RN, Produto 01, processo 17992/2012, Jul. 2014.
- [6] M. F. Medeiros J., J. T. Oliveira, e F. C. Mota, "R2 – Relatório de Levantamento e Compilação de Dados do Equipamento de Referência - Projeto P009 – Avaliação e Caracterização de Impactos de Aerogeradores na Qualidade da Energia Elétrica" CTGAS-ER, Natal, RN, Produto 02, processo 17992/2012, Jul. 2014.
- [7] M. F. Medeiros J., J. T. Oliveira, e F. C. Mota, "R3 – Relatório de Levantamento e Compilação de Dados do Equipamento a ser Desenvolvido - Projeto P009 – Avaliação e Caracterização de Impactos de Aerogeradores na Qualidade da Energia Elétrica" CTGAS-ER, Natal, RN, Produto 03, processo 17992/2012, Jul. 2014.
- [8] M. F. Medeiros J., J. T. Oliveira, e F. C. Mota, "R6 – Relatório Final (Transferência da ferramenta computacional e conclusões) - Projeto P009 – Avaliação e Caracterização de Impactos de Aerogeradores na Qualidade da Energia Elétrica" CTGAS-ER, Natal, RN, Produto 06, processo 17992/2012, Jun. 2015.