



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2024) v. 11, n. 1, pp. 195–208
<https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p195-208>

Uso de inversor solar aprovado pelo INMETRO na microgeração eólica distribuída

Use of a solar inverter approved by INMETRO in distributed wind microgeneration

Marcelo Esposito^{1,*}, Renato Calegari², Taís Rosângela Correia Souza³, Marcelo Correa Ribeiro⁴

¹ Professor do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul Campus Erechim, RS, Brasil

² Técnico de Laboratório, Universidade Federal da Fronteira Sul Campus Erechim, RS, Brasil

³ Graduate Student | Civil, Environmental, and Geo-Engineering, University of Minnesota, Twin Cities

⁴ Professor do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul Campus Erechim, RS, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: marcelo.esposito@uffs.edu.br

Received: 22 May 2024 | Accepted: 1 June 2024 | Published online: 5 June 2024

Resumo: É fato que no Brasil não está consolidada a cultura de instalação de aerogeradores em oposição ao que ocorre com a energia fotovoltaica. Os principais motivos para essa diferença são a escassez de equipamentos e o desconhecimento desta tecnologia por parte dos consumidores. Além dos motivos anteriormente citados, inclui-se o custo de aquisição destes sistemas e a falta de condições adequadas tanto para a instalação física como para o aproveitamento do fator ambiental, o vento. A camada limite impacta significativamente no funcionamento e na eficiência aerodinâmica do equipamento. Em certas regiões, ela pode estender-se a altitudes consideráveis, o que requer a instalação de torres de grande porte para os aerogeradores, aumentando, assim, os custos de instalação e manutenção da planta. Todas as formas de geração de energia elétrica têm vantagens e desvantagens e vale lembrar aqui que das formas disponíveis no mercado a energia eólica é a de menor impacto ambiental desde o berço até o túmulo. O presente trabalho considerou, inicialmente, a possibilidade de utilizar um aerogerador de 1200W (vendido comercialmente) acoplado a um controlador de carga desenvolvido especificamente para esta turbina eólica, um banco de baterias e um inversor solar fotovoltaico (não híbrido). Não obstante, não houve sucesso devido à velocidade média do vento no local não ser suficiente para carregar as baterias na proporção que o inversor solar injeta energia na rede elétrica de 220V. Para demonstrar a viabilidade da microgeração eólica, com ou sem o uso de baterias, são apresentados dois equipamentos desenvolvidos por empresas consolidadas no mercado, que com um circuito eletrônico instalado entre o aerogerador e o inversor solar tornam o sistema eólico *on grid*. Estes projetos consideram velocidades da ordem de 12m/s de vento não turbulento para a potência máxima. Valor não encontrado nem mesmo acima de 200m de altura no local onde o aerogerador de 1200W está instalado. Como solução foi investigado o conceito de microturbina hidráulica, operando *on grid* com o uso de inversor solar. Detalhes dos equipamentos instalados em um sistema em operação são mostrados.

Palavras-chave: geração, distribuída, energia, eólica, inversor.

Abstract: It is a fact that in Brazil the culture of installing wind turbines is not consolidated as opposed to what happens with photovoltaic energy. The main reasons for this difference are the scarcity of equipment and consumers' lack of knowledge of this technology. In addition to the reasons previously mentioned, this includes the cost of acquiring these systems and the lack of suitable conditions for both physical installation and the use of the environmental factor, the wind. The boundary layer significantly impacts the operation and aerodynamic efficiency of the equipment. In certain regions, it can extend to considerable altitudes, which requires the installation of large towers for wind turbines, thus increasing the plant's installation and maintenance costs. All forms of electrical energy generation have advantages and disadvantages and it is worth remembering here that of the forms available on the market, wind energy has the lowest environmental impact from cradle to grave. The present work initially considered the possibility of using a 1200W wind turbine (sold commercially) coupled to a charge controller developed specifically for this

wind turbine, a battery bank and a photovoltaic solar inverter (non-hybrid). However, there was no success due to the average wind speed at the site not being sufficient to charge the batteries at the rate that the solar inverter injects energy into the 220V electrical grid. To demonstrate the viability of wind microgeneration, with or without the use of batteries, two pieces of equipment developed by established companies in the market are presented, which, with an electronic circuit installed between the wind turbine and the solar inverter, make the wind system on grid. These projects consider speeds of the order of 12m/s of non-turbulent wind for maximum power. Value not found even above 200m in height in the place where the 1200W wind turbine is installed. As a solution, the concept of a hydraulic microturbine was investigated, operating on grid using a solar inverter. Details of equipment installed in an operating system are shown.

Keywords: generation, distributed, energy, wind, inverter

1 Introdução

A geração distribuída pode colaborar ainda mais com a redução da conta de luz dos brasileiros. Em 2021, nos 4 primeiros meses do ano, estava em vigor a bandeira amarela. Em maio do mesmo ano, passou a vigorar a bandeira vermelha patamar 1, no mês seguinte, uma nova mudança: passou a valer a bandeira vermelha patamar 2 e em julho além da bandeira vermelha patamar dois a tarifa foi reajustada. A necessidade dessa compensação foi causada pela estiagem que estava afetando as hidrelétricas e aumentando a necessidade de operação de termelétricas. Este é o cenário da matriz energética brasileira. Atualmente o exemplo mais conhecido de microgeração distribuída (até 75kW) é o da fonte solar fotovoltaica. O aumento na conta de luz tem despertado o desejo individual na população de se tornar um prosumidor.

Usualmente aerogeradores de pequeno porte tem saída em corrente alternada (ca), geralmente trifásica de frequência distinta a da rede de 60Hz. Os inversores por sua vez têm entrada em corrente contínua (cc) e saída em corrente alternada (ca) com frequência de 60Hz e forma de onda senoidal sincronizada com a rede da distribuidora de energia elétrica. A necessidade deste circuito controlador ca/cc se dá devido à inexistência no mercado nacional de inversores eólicos com registro no INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), que permitam a conexão por microgeração distribuída com sistema de compensação de energia elétrica (Figura 1).

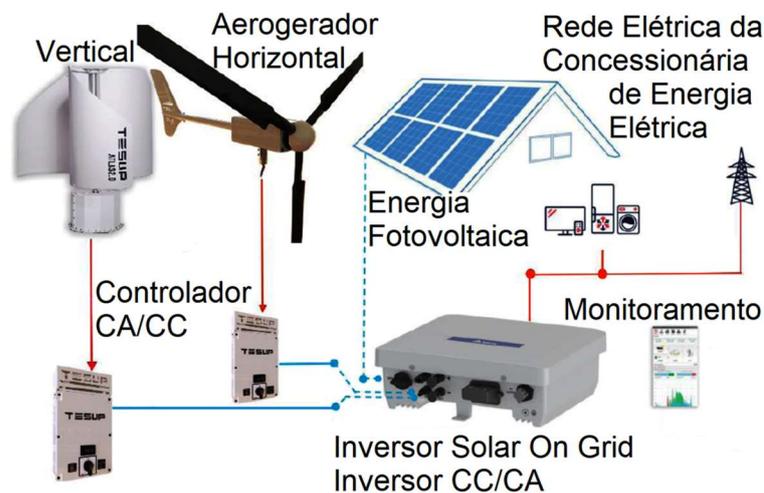


Figura 1. Modelo de ligação de um aerogerador, com o controlador ca/cc, o inversor e a rede elétrica de distribuição.
Fonte: Adaptado de TESUP (n.d)

A quantidade de trabalhos acadêmicos que explora o tema é escassa. Um dos raros encontrados na literatura discute a conexão de aerogeradores de pequeno porte a rede elétrica da concessionária de energia, de forma legalizada e documentada, mostrando o projeto desenvolvido pela Embrapa Clima Temperado (Embrapa), Instituto Federal Sul Rio Grandense Campus Pelotas (Ifsul) e Universidade Católica de Pelotas (Ucpel), intitulado “Viabilidade técnica e econômica do uso de aerogeradores e células fotovoltaicas em propriedades rurais familiares do Rio Grande do Sul” (Rutz et al. 2013). Este projeto fez uso de inversores eólicos que não estão mais disponíveis para compra no mercado nacional. A partir de 2017, os fabricantes interromperam a fabricação mundial de inversores eólicos de potência inferior a 10 kW. Os fabricantes direcionaram suas linhas de produção para o mercado fotovoltaico, mais lucrativo em virtude da demanda.

Em uma pesquisa prévia, verificou-se que nenhuma empresa nacional disponibiliza inversores eólicos para a conexão de microgeração, conectada à rede elétrica da concessionária (operação *on grid* com certificação do INMETRO), embora disponibilize comercialmente turbinas eólicas ou aerogeradores.

Segundo Cruz (2015), até março de 2015, embora em desenvolvimento, ainda não existia portaria do INMETRO estabelecendo os critérios de avaliação de equipamentos para sistemas eólicos de pequeno porte, garantindo uma qualidade mínima de eficiência energética e de segurança. Conseqüentemente, não existiam laboratórios credenciados para a realização de etiquetagem destas turbinas, embora atualmente existam dois laboratórios aptos a realizar ensaios de máquinas eólicas (Laboratórios Especializados em Eletroeletrônica da PUCRS e no Centro Brasileiro de Energia Eólica na Universidade Federal de Pernambuco).

Em 2015 foi publicada a Portaria Nº 168 de 23 de março de 2015 do INMETRO, que se referia a aprovar os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Aerogeradores. Cujo objetivo era: estabelecer os critérios para o Programa de Avaliação da Conformidade para Aerogeradores com foco no desempenho, através do mecanismo de certificação, atendendo aos requisitos especificados nas normas técnicas IEC 61400-11 e ABNT NBR IEC 61400-12-1 (INMETRO, 2015). Em 2019 a Portaria Nº 168 do INMETRO foi revogada pela Portaria Nº 508, de 10 de dezembro de 2019, sendo esta última também revogada (INMETRO, 2019).

É notório que a conexão de inversores, a controladores desenvolvidos especificamente para aerogeradores de pequeno porte trata-se de uma tecnologia promissora, podendo transformar-se em um nicho de mercado. O PRODIST (Procedimentos de Distribuição) elaborado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), traz a seguinte informação em seu Módulo 3: para o caso de sistemas que se conectam à rede por meio de inversores, o acessante deve apresentar certificados atestando que os inversores foram ensaiados e aprovados conforme normas técnicas brasileiras ou normas internacionais, ou o número de registro da concessão do INMETRO. A CPFL Energia (segunda maior distribuidora de energia do Brasil) em sua norma técnica GED 15303 traz a informação: no caso do inversor não ter sido ensaiado conforme essa normalização da ABNT (NBR 16149:2013, NBR 16150:2013, NBR IEC 62116:2012), o acessante, ou seu projetista, deverá fornecer cópia dos certificados do fabricante que demonstrem que o inversor foi aprovado segundo a normalização técnica internacional de origem, bem como uma declaração deste fabricante de que essas normas internacionais cobrem integralmente os requisitos da ABNT, ainda que os excedam.

Atualmente no Brasil, a única forma de aquisição de inversores eólicos se dá através de importação, de forma que a conexão com a rede elétrica da concessionária acabe sendo negada pela falta de ensaios e aprovações conforme a normatização da ABNT ou certificação do INMETRO ou pelo não atendimento a normas internacionais. Percebeu-se ainda que empresas de renome internacional, como as fabricantes de inversores ABB e SMA retiraram do mercado os produtos destinados a aerogeradores de com potência de até 10kW. Por exemplo, a ABB comprou a empresa Power-One em 2013 e para toda a sua linha de produtos a ABB informa: “*Our small wind inverter products are officially in the classic phase and are no longer available for purchase*”.

Inicialmente, o objetivo do presente trabalho consistiu em estudar e realizar uma análise teórica e física um aerogerador instalado na Universidade Federal da Fronteira Sul Campus Erechim, modelo Gerar 246, Enersud de 1200W, inspecionando profundamente os princípios: aerodinâmico, magnético e mecânico.

Estudo detalhado do controlador de carga com *dump load* entregue pela Enersud, identificando melhorias e possibilidades de modificação para torná-lo compatível com a estratégia MPPT do inversor solar escolhido (caso sem o uso de banco de baterias). Utilizando o princípio da engenharia reversa foi possível perceber a impossibilidade de incorporar no controlador original a função de controle de potência. Seria necessário desligar o sistema *dump load* (desligar as resistências de potência do circuito) para que a tensão no controlador ultrapassasse os 48Vcc. Porém, neste caso a velocidade de ponta de pá atingiria qualquer valor dependendo exclusivamente da velocidade do vento. Esta ação pode comprometer a integridade mecânica do aerogerador, já que pode não ter sido testado para velocidades tão altas.

A engenharia reversa do controlador PRV TECH/Enersud ampliou ainda o conhecimento sobre o sistema de controle de carga de baterias estacionárias. Esta é outra forma de conexão a rede, onde o inversor passa a ser alimentado por um banco de baterias.

Devido à dificuldade em atingir a rotação nominal do aerogerador de 480rpm (velocidade do vento de 13m/s) são apresentados casos bem-sucedidos de interfaces entre geradores eólicos e inversores da marca SMA e FIMER. Interfaces desenvolvidas pelas empresas Bornay e Voltsys, respectivamente. De uma forma alternativa, apresenta-se ainda uma interface para microturbinas hidráulicas e inversores da marca FIMER (interface Voltsys). O projeto hidráulico é particularmente interessante para a região onde o aerogerador

em estudo está instalado pela quantidade de córregos e riachos existentes na região. É um tema a ser pesquisado no futuro.

2 Metodologia

Neste trabalho foi utilizado o seguinte aerogerador, com as seguintes especificações: 2,46m de diâmetro, 3 pás, pá com 10 aerofólios, controle de velocidade *active stall*. Sistema magnético de ímã permanente (neodímio), Sistema elétrico trifásico. 48Vcc de tensão *off grid* e 1200W de potência a 400rpm. Balanceamento dinâmico. Turbina eólica composta de pás, leme, gerador, controlador eletrônico com *dump load* e frenagem eletromagnética. Turbina Eólica Gerar 246, fabricada e comercializada pela empresa brasileira Enersud (Maccarini, 2012; Tibola, 2009).

O controlador eletrônico com *dump load* não deve ser confundido com os chamados “controladores de carga” usados em sistemas de armazenamento de energia com baterias. Além de retificar o sinal proveniente do gerador eólico o controlador deve desempenhar as seguintes funções: caso a potência do gerador eólico supere a energia necessária para carregar as baterias e/ou suprir a carga, o controlador deve habilitar a função *dump load* (dispositivo utilizado para a dissipação da energia excedente). Outra função desejável mas que não é entregue pela Enersud seria: o princípio de frenagem do freio mecânico e/ou eletromagnético e o método de frenagem tornam a velocidade de rotação da turbina eólica controlável, melhorando assim a eficiência de geração de energia, a estabilidade e aumenta a vida útil do sistema de geração de energia eólica de forma eficaz (Mo et al., 2016). O controlador de carga com *dump load* original da Enersud não realiza o controle de velocidade da turbina. Dispõe apenas do controle aerodinâmico por estolamento e a frenagem eletromagnética que retém o cubo em 0rpm.

O esquema elétrico de ligação de todo o circuito até a conexão com a rede é mostrado na Figura 2.

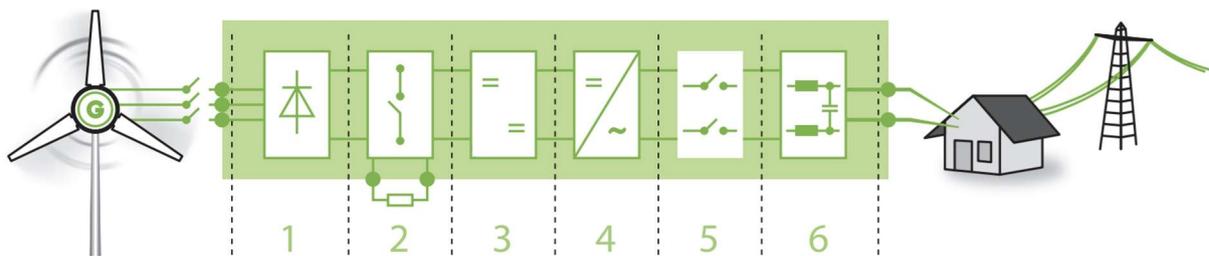


Figura 2. Esquema elétrico utilizado no presente trabalho. Aerogerador trifásico. 1-Retificador. 2-Freio eletromagnético, sistema de proteção ca e cc, *Dump load* (resistência de descarga) e controlador de carga. 3-Banco de baterias. 4-Inversor solar (conexão com a rede elétrica). 5 e 6-Proteção ca e conexão *on grid* 220Vca monofásica.

O inversor solar fotovoltaico da marca phb, modelo PHB1500-NS de potência nominal de 1,5kWca ao ter sua única *string* conectada ao banco de baterias permitiu a conexão com a rede de 220Vca (Figura 3). O inversor solar da marca Growatt, modelo MIC2000TL-X de 2kWca, indicou a falha *Boost Abnormal (01)*. Em contato com o suporte da Growatt a sugestão foi mudar o *Register N° 124 Traker Model* para o valor 2. A conclusão neste caso foi de que o inversor solar não permite a ligação com baterias (Figura 4). O inversor da marca Ingeteam, modelo INGECON SUN 1 PLAY de 3kWca permitiu a conexão com a rede elétrica (Figura 5). O inversor da marca Sungrow, modelo SG5K-D permitiu a conexão com a rede 220Vca (Figura 6). A partir da substituição da fonte fotovoltaica por baterias foi possível selecionar o melhor modelo de inversor para os experimentos seguintes. O modelo escolhido foi o PHB1500-NS, pela limitação de corrente apresentada pelo inversor, ou seja, por aparentemente apresentar uma estratégia de MPPT mais adequada para a operação com baterias, dentre os modelos de inversores ensaiados.

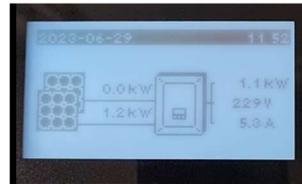
Tensão cc máx. 450Vcc
 Corrente Isc FV 12,5Acc
 Faixa de op. SPMP 80...400Vcc
 Corrente cc máx. 10Acc
 Tensão ca nominal 220Vca
 Corrente ca máxima 7,5A
 Freq. nominal 60Hz
 Potência ca nominal 1.5kW
 N° SPMP/N° Strings 1/1



Figura 3. Etiqueta de identificação do inversor PHB1500-NS utilizado nos experimentos com o banco de baterias.

Tensão cc máx. 500Vcc
 Faixa de tensão PV 50...500Vcc
 Corrente Isc 16Acc
 Corrente cc máx. 13Acc
 Potência ca máx. 2000W
 Tensão ca nominal 220Vca
 Corrente ca máx. 9,5Aca
 Freq. nominal 60Hz
 String 1

Figura 4. Display do inversor mostrando o código de falha da conexão do inversor com o banco de baterias (126Vcc). Etiqueta de identificação do inversor MIC2000TL-X utilizado nos experimentos com o banco de baterias.



(29-06-2023)
 Tensão (baterias) 120Vcc
 Potência cc 1,2kWcc
 Potência ca 1,1kWca
 Corrente ca 5,3Aca

Vccmáx 850V
 VMPPT₁ 125...750Vcc
 VMPPT₂ 90...750Vcc
 IscPV₁ 13Acc
 IscPV₂ 13Acc
 Vca/f 220/230/240Vca-50/60Hz
 Pca 3000W
 Icamáx 16A
 String 2

Figura 5. Display do inversor mostrando as grandezas elétricas (MPPT₂) da conexão do inversor com o banco de baterias (126Vcc). Etiqueta de identificação do inversor INGECON SUN 1 PLAY.

Máx. tensão de entrada 600Vcc
 Mín. tensão MPP 90Vcc
 Máx. tensão MPP 560Vcc
 Máx. cor. de entr. 20(10/10)Acc
 Máx. Isc 24(12/12)Acc
 Tensão ca saída nom. 220/240V
 Freq. de saída nom. 50/60Hz
 Máx. corrente de saída 22,7Aca
 Potencia de saída nom. 5kW
 String 2

Figura 6. Etiqueta de identificação do inversor SG5K-D utilizado nos experimentos com o banco de baterias.

Onde:

Isc (*Short Circuit* – Corrente de curto-circuito)

FV (Fotovoltaica)

PV (*Photovoltaics* - Fotovoltaica)

MPP (*Maximum power point* - Ponto de máxima potência)

MPPT (*Maximum power point tracking* - Rastreamento do ponto de máxima potência)

SPMP (Seguimento do ponto de máxima potência)

3 Resultados e discussões

Uma série de experimentos foram realizados para identificar o funcionamento do aerogerador. A diferença de peso entre as pás (1677g, 1750g, 1712g – Figura 7) pode ter sido a causa do agravamento de um defeito no *swivel* (Figura 8) da turbina eólica. O aerogerador foi recebido e instalado em 24/02/2022 e retornou da garantia em 17/04/2023 (ficou 30 dias no concerto). Durante este período de praticamente um ano de operação em ambiente natural efetuou-se uma análise sobre o princípio de funcionamento do controlador de carga mostrado nas Figuras 9 e 10, e o seu circuito esquemático mostrado na Figura 11.

Partindo de velocidades do vento de 0m/s, a função do controlador é garantir que não sejam conectadas as baterias com tensões superiores a 48Vcc. Nos instantes em que a velocidade de ponta de pá ultrapassa o valor definido pelo fabricante, uma tensão retificada e filtrada superior a 48Vcc é gerada, de forma que a energia excedente é dissipada nas resistências elétricas de descarga.

A principal informação retirada desta etapa do trabalho foi que se as resistências de descarga forem desconectadas do circuito é possível obter tensões da ordem de 100Vcc dependendo da velocidade do vento. Porém, mesmo com o freio aerodinâmico por *estol* é possível que ventos de altas velocidades provoquem danos mecânicos aos componentes do aerogerador devido a falta do freio obtido a partir da adição de carga ao circuito elétrico.

Uma outra forma de modificar a tensão de saída e aumentar o número de baterias em série, a serem carregadas, é modificando a programação do microcontrolador PIC12F683 (IC1 na Figura 11). O voltímetro instalado na face frontal do controlador de carga (Figura 9) indica a tensão nas baterias, ou seja, ainda que a turbina eólica esteja parada a indicação que aparece no *display* se refere a tensão sobre as baterias. Caso ocorra a geração de energia pelo aerogerador, com tensão superior à das baterias, este será o valor mostrado.



Figura 7. Da esquerda para a direita, resistências de descarga (*dump load*), leme, pás e controlador de carga (24/02/2022).



Figura 8. *Swivel* acoplado ao alternador e ao cubo do aerogerador (24/02/2022).



Figura 9. Controlador de turbina eólica GERAR246, modelo CGG-1000-48V, marca Enersud (24/02/2022).

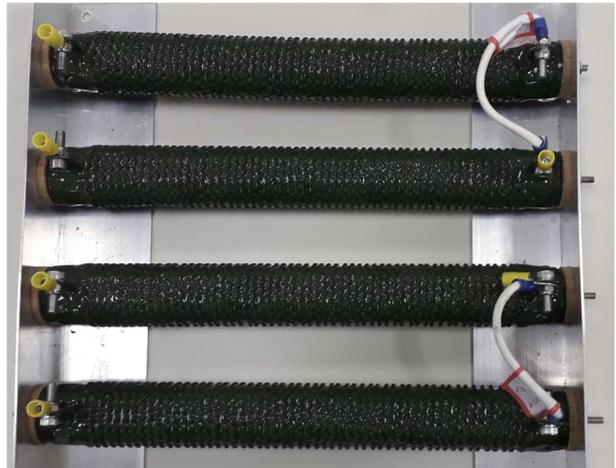


Figura 10. Resistências de descarga, *dump load*, do controlador de turbina eólica GERAR246, modelo CGG-1000-48V, marca Enersud. 4 resistências de 6Ω , 350W (24/02/2022).

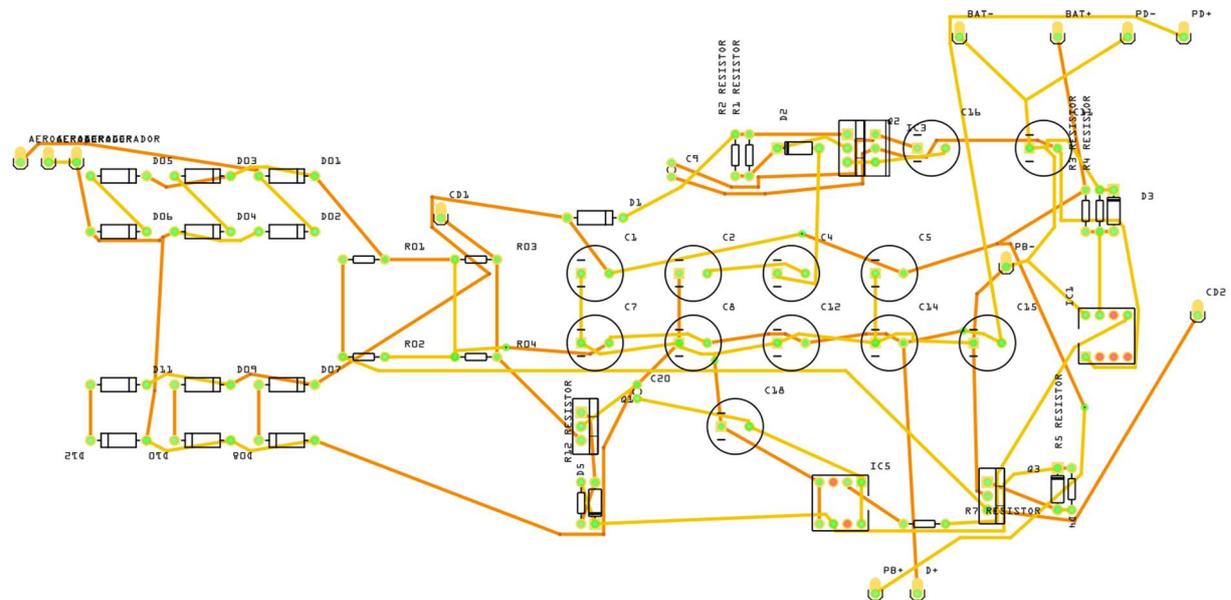


Figura 11. Diagrama esquemático do controlador de turbina eólica GERAR246, modelo CGG-1000-48V, marca Enersud (23/05/2023).

Esta etapa inicial teve como objetivo identificar a possibilidade de conexão direta do controlador de carga com o inversor solar fotovoltaico. O dimensionamento do inversor levou em conta a potência nominal do aerogerador de 1200W, 48Vcc. Considerando as seguintes características elétricas do inversor solar: entrada cc; tensão: 30 ... 600Vcc; tensão de operação MPPT: 30 ... 550Vcc; tensão para a máxima potência: 180 ... 500Vcc. Saída ca; tensão: 220Vca; monofásica (L, N, PE); operação *on grid*. Desde que a velocidade do vento se mantivesse estável e próxima a nominal de 13m/s a tensão de 48Vcc seria suficiente para ligar a rede o inversor solar.

O aerogerador foi instalado com o cubo a uma altura de 6m do solo. Além disso, uma estação meteorológica foi instalada na mesma altura nas proximidades do mesmo. Dessa forma, identificou-se que a velocidade média do vento no local foi de apenas 2,5m/s, magnitude suficiente apenas para alcançar a velocidade de partida da turbina eólica (2,2m/s). A geração de energia elétrica ocorreu apenas em dias atípicos, com rajadas de vento, geralmente em condições turbulentas.

Na prática, não basta que a tensão seja superior a 30Vcc na entrada do inversor. É preciso superar a corrente elétrica mínima necessária para a entrada em operação. Outro aspecto importante é o comportamento dinâmico das variáveis: irradiação solar e velocidade do vento. Enquanto a variação da irradiação solar é da ordem de minutos, a velocidade do vento varia geralmente na escala de segundos. O uso de armazenadores de energia como baterias tende a minimizar essa discrepância no caso da microgeração eólica. Em locais ideais para a geração eólica, torres anemométricas são instaladas de 1 a 5 anos antes da instalação dos aerogeradores. Dessa forma, torna-se possível a aquisição de dados, além da compreensão a respeito do comportamento dinâmico da velocidade e direção do vento, temperatura, pressão atmosférica e etc.

Sistemas fotovoltaicos, por sua vez, são modelados utilizando fontes de corrente elétrica, diodos e resistores. O controle sobre o valor da corrente que percorre o circuito formado por módulos fotovoltaicos e o inversor solar é exercido pela irradiação que varia entre o nascer e o pôr do sol.

A hipótese de conexão da saída do controlador de carga diretamente na saída do inversor solar foi desprezada devido à baixa velocidade do vento no local de instalação. Diversas marcas e modelos de inversores foram testados adicionando ao circuito um banco de 10 baterias estacionárias de 12Vcc, C100/73Ah (Figura 12). Inicialmente todas as baterias foram carregadas individualmente utilizando um carregador eletrônico alimentado pela rede de 220Vca. Com a ligação em série de todas as baterias a tensão nos terminais de saída foi de aproximadamente 126Vcc para a carga máxima. Uma parte do circuito série, formado por 4 baterias, foi ligada em paralelo com a saída em corrente contínua do controlador de carga (52,2Vcc – Figura 14). A Figura 13 mostra uma imagem termográfica da etapa de descarga das baterias. O circuito microprocessado do controlador de carga interpreta que a energia proveniente das baterias (acima de 48Vcc) é a energia excedente gerada pelo aerogerador e por isso aciona as resistências de descarga, desperdiçando a energia das baterias (Figura 15). Não foi possível identificar o retorno de parte da energia das baterias para a turbina eólica, de forma que a mesma desempenhasse o papel de um motor. A turbina geralmente fica girando dia e noite por causa da velocidade média do vento no local de 2,5m/s. Ainda mais crítico é o fato de que se nenhuma bateria estiver conectada ao controlador, este para de funcionar já que é a bateria externa que mantém o circuito funcionando.

A Figura 16 mostra o local de instalação do aerogerador GERAR 246 da marca Enersud e da Estação Meteorológica Davis Vantage Pro2 Agrosystem. A distância no solo entre os postes do gerador e da estação é de 4m. A medição da velocidade e da direção do vento ocorre na altura do cubo do aerogerador. Percebe-se que embora o aerogerador esteja 1m acima do telhado das edificações, estas são uma fonte de perturbação para o vento. Aerogeradores de eixo horizontal tem sua máxima eficiência com vento não perturbado (rotor a barlavento com leme).

A Figura 17 mostra a composição do sistema elétrico de proteção empregado. Na esquerda os dois disjuntores de cor azul exercem a função também de freio eletromagnético (circuito ca). No lado esquerdo um dos disjuntores vermelhos atua como proteção e seccionamento para o sistema a 48Vcc de carga das baterias. O outro disjuntor em conjunto com fusíveis, DPSs (dispositivos supressores de surto) e chaves atua na conexão das baterias em série (10 baterias) com o inversor solar.

Caso o valor da tensão do banco de baterias esteja próximo do limite inferior de 80Vcc (seguimento do ponto de máxima potência), no caso do inversor phb, o efeito observado é mostrado nas Figuras 18 e 19. O modo de operação do inversor solar muda de normal (cód. 1) para o modo de espera (cód. 0). Quando ocorre a conexão com a rede a tensão nas baterias diminui e isso pode gerar o cód. 2 que representa falha. Os dados mostrados na Figura 18 se referem ao dia 23/08/2023 das 11:46:27 até as 13:26:29. O que se observou neste dia e horário foram rajadas de vento de até 12m/s, em um dia de céu limpo, sem nuvens conforme indicam os comportamentos dinâmicos das variáveis mostradas na Figura 19. Como nos dias

anteriores e posteriores a velocidade do vento sempre foi muito inferior a 12m/s o inversor permaneceu em modo de espera. As baterias se descarregam naturalmente pela resistência interna e não se percebeu mais situações em que a corrente elétrica cc ou ca e a potência ca fossem diferente de zero.



Figura 12. Banco de baterias estacionárias. 10 baterias de 12V, C100/73Ah (13/07/2023).

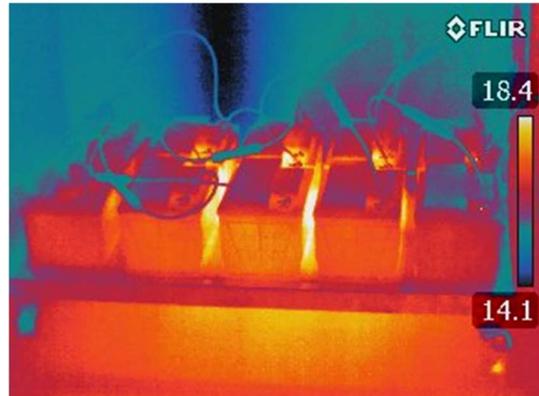


Figura 13. Imagem termográfica das baterias, após serem carregadas e conectadas ao controlador de carga e a um inversor solar fotovoltaico (13/07/2023).



Figura 14. Voltímetro do controlador de carga indicando a tensão equivalente da conexão em série de 4 baterias (13/07/2023).

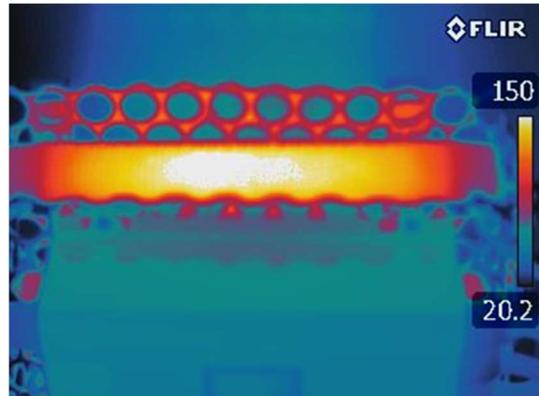


Figura 15. Imagem termográfica da resistência de descarga dissipando a potência das 4 baterias porque a tensão ultrapassa os 48Vcc nominais. Todas as 4 resistências estavam energizadas e na mesma temperatura de 150°C (13/07/2023).



Figura 16. Modo de instalação do aerogerador GERAR 246 da marca Enersud e localização da Estação Meteorológica Davis Vantage Pro2 Agrosystem (06/09/2023).



Figura 17. Sistema de proteção. Da esquerda para a direita: dispositivo supressor de surto (DPS) para o circuito ca do aerogerador, sistema de frenagem eletromagnética curto-circuitando as três fases, disjuntor cc na saída das baterias, fusíveis, DPS cc, chave seccionadora para a alimentação da *string* do inversor solar, disjuntor cc na saída do controlador para a alimentação das baterias (06/05/2024).

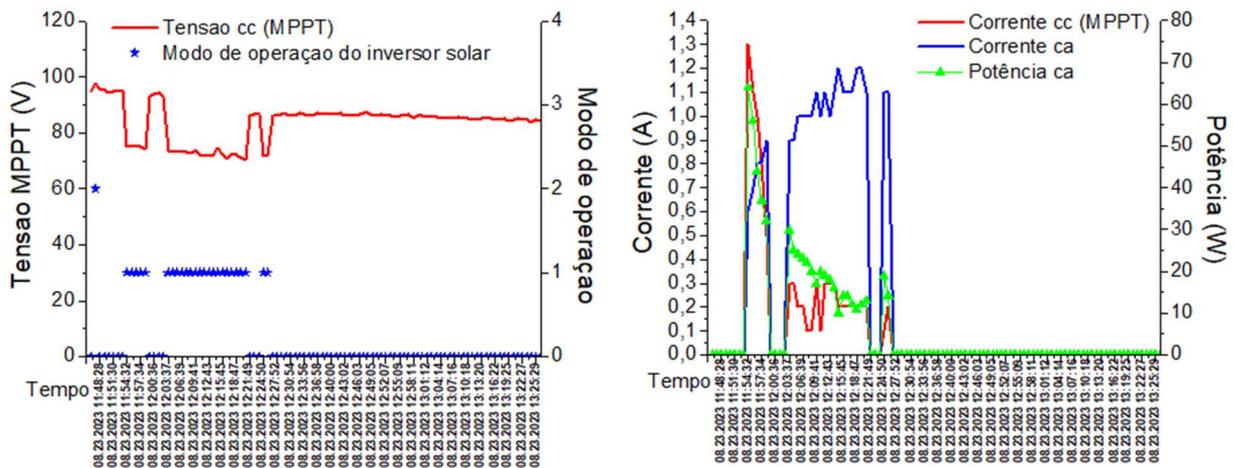


Figura 18. Dados obtidos a partir do software de monitoramento do inversor solar phb (SolarPortal). Conexão com o banco de baterias em 23/08/2023. Modo de operação: 0 = Wait; 1 = Normal; 2 = Fault.

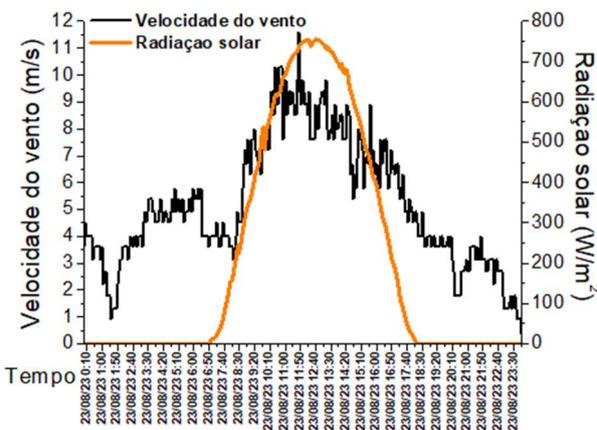


Figura 19. Comportamento dinâmico da velocidade do vento em 23/08/2023. Estação meteorológica instalada ao lado aerogerador, na altura do cubo do mesmo.

Ainda que se escolha um dos inversores que tem algum tipo de controle de corrente no lado cc, não é possível recarregar as baterias utilizando o aerogerador devido a baixa velocidade do vento e o valor da corrente elétrica drenada do gerador. Segundo a plataforma *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) a velocidade média do vento no local onde o aerogerador está instalado é de aproximadamente 8m/s para uma altura de torre de 200m. Por causa do custo é inviável construir uma torre de 200m para uma turbina eólica de 1200W.

Existem algumas empresas que vendem controladores *on grid* eólicos monofásicos: TESUP Wind Turbine Charge Controller (Figura 1); ENAIR regulador eólico – Esquemas E30 70PRO; Eólico VOLTACON *wind and solar off grid kit 5kW with lead acid batteries*.

Durante o período de realização da pesquisa o autor do presente trabalho visitou a fábrica da Bornay, em Alicante, Espanha (Figuras 20 e 21). Foi possível ter contato com os equipamentos: *Cuadros de control Wind+*; **Interface de Conexión a Red**; *Interface Wind 13+ Conexión Red; 220Vac; 50-350Vdc. Inc. Resistência frenado. Com. ModBus A 1.350,00€*. **Aerogerador Bornay Wind 13 + 2 palas, 13 m², Pot. Nom. 1kW - 12m/s, 220Vac A 4.100,00€**. **Anemómetro Wind+ para monitorización aerogerador A 200,00€**. **Inversor de conexión a red SMA monofásico; SB1.5-1 VL-40 Sunny Boy 1,5kW, sin transformador, monofásico 230Vca. 50Hz 3 S 960,00€**. Estes valores correspondem a: *Tarifa de Precios Agosto 2023* praticada pela Bornay. A empresa Bornay tem mais de 53 anos de atuação no mercado e sua unidade de produção dispõe do maquinário necessário para a fabricação e montagem de todas as partes que compõem o aerogerador, e combina esta tecnologia com os processos manuais necessários para obter o produto final que são pequenos aerogeradores com potências entre 600 e 6000W. Embora seja um produto de excelente qualidade não se observa aerogeradores Bornay em operação na península ibérica (Portugal, Espanha, Andorra e Gibraltar). Outro fato curioso é que a Bornay não vende somente equipamentos para a energia eólica. A atuação no mercado fotovoltaico é um indicio de que a *Interface de Conexión a Red* deve ter uma clientela bastante restrita.



Figura 20. Bornay Aerogeradores, Castalla, Alicante/España. Formato e dimensões das torres vendidas pela empresa (21/11/2023).

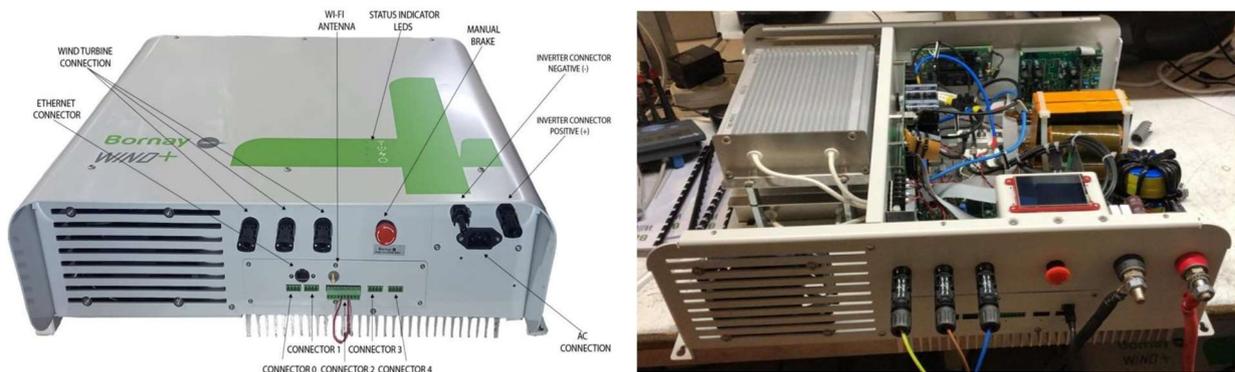


Figura 21. Esquema de ligação recomendada pelo fabricante Bornay, utilizando inversor da marca SMA.
 Fonte: <https://www.bornay.com/media/download/5184> (2023)
<https://www.bornay.com/media/download/5187> (2023)

Outra empresa que fabrica e vende equipamentos relacionados ao tema: uso de inversor solar aprovado pelo INMETRO na microgeração eólica distribuída, é a Voltsys, que ao contrário da Bornay vende equipamentos em separado. A menor potência de inversor solar para aplicação eólica é de 3,3 kW, normalmente da marca FIMER, pois na configuração eólica apresenta um tempo de resposta menor. A tensão em corrente contínua para a conexão à rede é de 90 até 120Vcc, ainda assim estes valores de tensão são muito altos para turbinas de pequeno porte segundo a Voltsys. O inversor solar FIMER permite um bom controle e dependendo do caso pode ser programado com uma curva de velocidade do vento. Não é possível usar deliberadamente qualquer inversor solar porque o *maximum power point tracking* (MPPT) normalmente não se ajusta à potência ideal e pode aplicar muita carga ao aerogerador, ocasionando o travamento ou danos ao gerador eólico. O aerogerador Gerar 246 utilizado nos experimentos produz uma tensão de 48Vcc. Os inversores recomendados pela Voltsys são, em sua maioria, para tensões mais altas, pelo menos 120Vcc para se conectar à rede e não produzem energia abaixo de 90Vcc.

O **Voltsys Small Wind & Hydro Controller** (Figura 22) foi orçado no valor de 1.237,50€ (controlador, *dump load* para 20A).

Visser (2022) utilizou um inversor solar ABB de 3,8 kW e outro de 6kW e dois Controladores Voltsys MPPT para alterar as configurações do MPPT em tempo real, com base na tensão ou frequência medida da turbina. Nos dois casos, de menor (controlador Voltsys mais antigo) e de maior potência, o autor encontrou dificuldade com o circuito de interrupção de falha de arco (*Arc Fault Circuit Interrupter* - AFCI) do inversor

solar. Foi determinado que toda vez que o sistema de freio PWM era acionado para desacelerar o rotor acima da saída de 3500W, o AFCI acionava e desligava o inversor e o desconectava da rede.

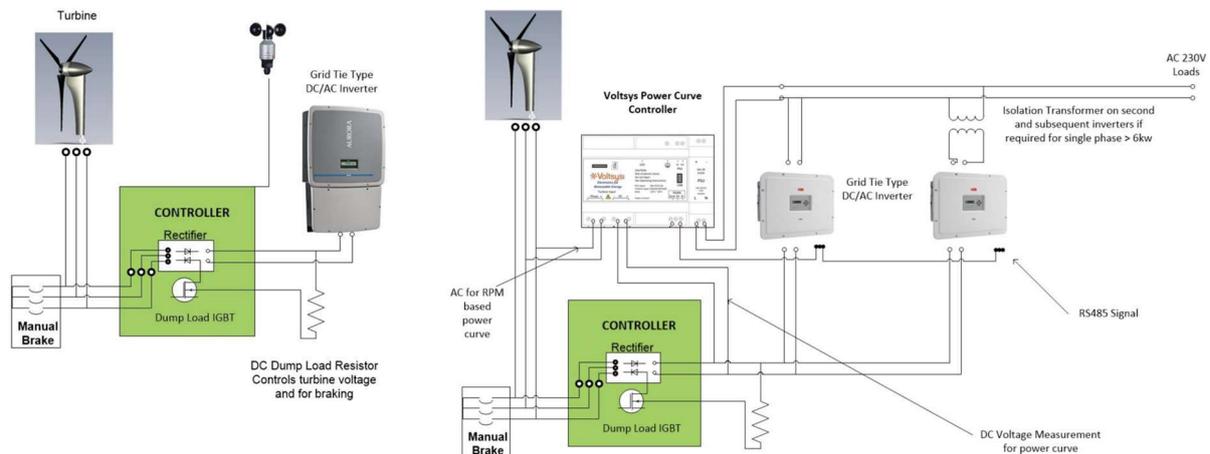


Figura 22. Control Unit Voltsys, anemometer input, turbine ac input, to dump load output, to inverter dc output, inverter RS485 protocol, grid supply to controller, earth.
Fonte:Voltsys (2023)

Os trabalhos de Eldridge (2011), Eckstein (2014), Borges (2018), Nguyen et al. (2017), Bufanio et al. (2022), Natsir et al. (2020) e Kotb et al. (2022), apresentam especificidades e dificuldades atreladas à conexão de pequenos aerogeradores à rede elétrica.

Os inversores dedicados a sistemas fotovoltaicos atingiram um elevado grau de sofisticação e a demanda elevada barateou os custos de produção tornando-os interessantes para empresas fornecedoras de equipamentos hidráulicos e mecânicos voltados à geração de energia. Foi este assunto que conduziu o autor do presente trabalho ao conceito de microturbinas (RAMOS et al., 2020) (motobombas funcionando como turbinas – *pump as turbines* (PAT)) (Figura 23).

Para regiões onde a velocidade do vento não é favorável a microgeração eólica, a substituição da variável de interesse é uma alternativa. A microgeração hídrica apresenta como vantagem o poder de controle sobre a fonte primária a água (altura da queda da água e vazão, por exemplo), com o vento é muito mais complicado. Os trabalhos de Ocana-Miguel et al. (2021), Ocana-Miguel et al. (2022), Simão e Ramos (2020) e Novara e McNabola (2021), apresentam os conceitos desta tecnologia (Figuras 24 e 25).

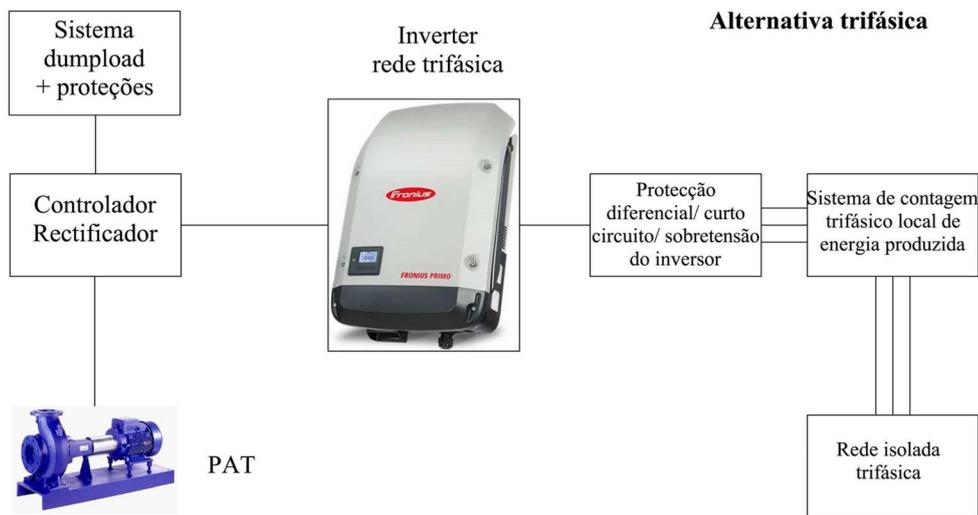


Figura 23. Microturbina hidráulica e inversor solar da marca Fronius. Esquema trifásico.
 Fonte: <https://igenergypower.com/Home.html> (2023)



Figura 24. Da esquerda para a direita: *turbine control unit* (Voltsys), Fronius solar inverter e sistema de proteção.
 Fonte: <https://igenergypower.com/Home.html> (2023)



Figura 25. Detalhe do quadro de medição e proteção.
 Fonte: <https://igenergypower.com/Home.html> (2023)

Em requisitos para a conexão de micro ou minigeradores de energia ao sistema elétrico da CELESC Distribuição encontra-se a seguinte informação válida somente aos locais atendidos por esta companhia: “5.7.3. Não será admitido o uso de inversores em sistemas de geração cuja fonte primária seja distinta daquela para a qual o inversor foi projetado, por exemplo o uso de inversores fotovoltaicos em geradores de corrente contínua acoplados a turbinas hidráulicas”. O documento intitulado “conexão de micro e minigeração distribuída sob sistema de compensação de energia elétrica” da CPFL Energia não apresenta esta restrição.

4 Conclusões

Apresentam-se duas das maiores problemáticas do uso de inversor solar em aplicações distintas daquelas para a qual ele foi desenvolvido. Além disso, são discutidas outras duas soluções para o desafio de engenharia, mostrando marcas e modelos comerciais, não obstante a proposta de um uso viável e financeiramente vantajoso.

Foram encontradas inúmeras dificuldades para a adaptação do inversor solar para o uso eólico. A principal delas foi o fato de que o circuito fotovoltaico possui naturalmente um controle sobre a corrente elétrica que percorre o circuito cc: a irradiação. Isso coloca em xeque o rastreamento de máxima potência.

Observou-se a necessidade de modificação da estratégia de MPPT do inversor solar. Efetuando a medição da velocidade do vento, da tensão cc (curva de potência), da tensão ca (relação rpm versus potência) para alimentar a estratégia embarcada no controlador instalado entre o gerador eólico e o inversor solar. A interpretação do comportamento dinâmico do sol que é diferente do vento.

Foram apresentados projetos de sucesso, envolvendo um inversor solar da marca SMA (empresa Bornay) e sistemas eólicos e da marca FIMER (empresa Voltsys) para sistemas eólicos e hídricos. Interfaces de controle sofisticadas (microcontroladas), testadas em várias partes do mundo e com a certificação dos

fabricantes de inversores. Partido do controlador de carga da marca Enersud o salto de conhecimento necessário exigiria muito tempo e investimento monetário para atingir o mesmo grau de eficiência. Enersud, Bornay e Voltsys indicam em seus manuais a necessidade de ventos da ordem de 13m/s.

Finalmente, foi discutida uma alternativa para superar a necessidade de velocidade de ventos da ordem de 13m/s, transferindo a tecnologia do inversor solar para microturbinas hidráulicas. A principal vantagem dessa abordagem é que a vazão de água pode ser controlada e a disponibilidade hídrica do Brasil é abundante. Seguindo o raciocínio proposto este é o principal avanço do presente trabalho. Uma revisão bibliográfica detalhada, seguida de experimentos e de uma análise crítica sobre o problema de engenharia proposto.

Referências bibliográficas

Borges, VLF (2018). *Inversor para conexão com rede elétrica de aerogeradores de pequeno porte*. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Bufanio, R, Arribas, L, De La Cruz, J, Karlsson, T, Amadio, M, Zappa, AE and Marasco, D (2022). ‘An Update on the Electronic Connection Issues of Low Power SWTs in AC-Coupled Systems: A Review and Case Study’. *Energies*, v. 15, n. 6, p. 2082. <https://doi.org/10.3390/en15062082>

Cruz, DT (2015). *Micro e minigeração eólica e solar no Brasil: propostas para desenvolvimento do setor*, Dissertação Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Eckstein, RH (2014). *Sistema para conexão de pequenos aerogeradores com a rede elétrica: análise, projeto e experimentação*. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Eldridge, CS (2011). *Using super capacitors to interface a small wind turbine to a grid-tied micro-inverter*. Masters thesis, Kansas State University.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (2015). *Portaria nº 168 de 23 de março de 2015*. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 25/03/2015.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (2019). *Portaria nº 508 de 10 de março de 2019*. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 16/12/2019.

Kotb, KM, Elmorshedy, MF, Salama, HS and Dán, A (2022). ‘Enriching the stability of solar/wind DC microgrids using battery and superconducting magnetic energy storage based fuzzy logic control’. *Journal of Energy Storage*, v. 45, p.103751. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103751>

Maccarini, MC (2012). *Inversor monofásico sincronizado para a conexão de um gerador eólico à rede elétrica: estudo, projeto e implementação*. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Mo, Q, Wen, J, Liu, X and Wang, J (2016). The Brake System and Method of the Small Vertical Axis Wind Turbine. In: *5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE)*. Zhuhai, China, 2016, pp. 145-151. <https://doi.org/10.2991/iccahe-16.2016.25>

Natsir, A, Supriyatna, S, Ni Made, S, Adnyani, IAS and Nababan, S (2020). Performance Improvement of Grid Tie Inverter on Microgrid of Solar Photovoltaic. In: *Proceeding International Conference on Science (ICST)*, v. 1, n. 1, pp. 79-87.

Nguyen, TH, Al Hosani, K and Al Sayari, N (2017). ‘Grid integration improvement for single-phase inverters of small wind turbines under distorted voltage conditions’. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 87, pp.144-153. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.11.003>

Novara, D and McNabola, A (2021). ‘Design and year-long performance evaluation of a pump as turbine (Pat) pico-hydropower energy recovery device in a water network’. *Water*, v. 13, n. 21, p. 3014. <https://doi.org/10.3390/w13213014>

Ocana-Miguel, A, Andres-Diaz, JR, Navarrete-de Galvez, E and Gago-Calderon, A (2021). ‘Adaptation of an insulated centralized photovoltaic outdoor lighting installation with electronic control system to improve service guarantee in tropical latitudes’. *Sustainability*, v. 13, n. 4, p. 1925. <https://doi.org/10.3390/su13041925>

- Ocana-Miguel, A, Gago-Calderon, A and Andres-Diaz, JR (2022). 'Experimental outdoor public lighting installation powered by a hydraulic turbine installed in the municipal water supply network'. *Water*, v. 14, n. 5, p. 710. <https://doi.org/10.3390/w14050710>
- Ramos, HM, Simão, M, Sánchez, MP, Fernandes, JF, Branco, PJC and López-Jimenes, PA (2020). 'Caracterização do comportamento de bombas a funcionar como turbinas: análise numérica e experimental'. *Águas & Resíduos*, v. 4, n. 7, pp. 44-54. <https://doi.org/10.22181/aer.2020.0705>
- Rutz, MDR, Cleff, V, Silva, ET, Reisser Junior, C, Azevedo, RM and Santos, LHC (2014). Viabilidade técnica e econômica do uso de aerogeradores e células fotovoltaicas em propriedades rurais familiares do Rio Grande do Sul. In: *Simpósio Estadual De Agroenergia; Reunião Técnica De Agroenergia - RS, 5; Encontro De Energias Renováveis Na Agricultura Familiar, 2*, Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2014.
- Simão, M and Ramos, HM (2020). 'Hybrid pumped hydro storage energy solutions towards wind and PV integration: Improvement on flexibility, reliability and energy costs'. *Water*, v. 12, n. 9, p. 2457. <https://doi.org/10.3390/w12092457>
- TESUP (n.d). TESUP Eind Turine Charge Controller. [online] Disponível: <https://m.media-amazon.com/images/I/913Q5W2iVDL.pdf> (Acessado janeiro 2024).
- Tibola, G (2009). *Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência*. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Visser, KD (2022). 'Real-world development challenges of the Clarkson University 3 meter ducted wind turbine'. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 2265, n. 4, p. 042072. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/4/042072>
- Voltsys (2023). *Voltsys Small Wind & Hydro Controller*. [online]. Disponível: www.voltsys.com/voltsys-20a-wind-hydro-controller/ (Acessado dezembro 2023).