

Capítulo VI

Desenvolvimento de microrredes com energia renovável

A micro e a minigeração de energia oferecem grandes oportunidades da expansão de energia da matriz energética brasileira, com a capacidade instalada apresentando elevado crescimento, saindo de 6 MW em 2014 para 4,77 GW em 2021 (EPE, 2021). Este avanço na geração de eletricidade pelos chamados Recursos Energéticos Renováveis (RER – Renewable Energy Resources), como a energia solar e a eólica, trazem novos desafios de pesquisa e estudos em temas como estabilidade, controle, confiabilidade, operação, qualidade de energia, tanto para geração de energia renovável quanto para o sistema de distribuição ou transmissão ao qual está conectado [Canizares and Reilly, 2019]. De modo a contribuir com pesquisas e soluções em geração distribuída, a Universidade Federal do Paraná (UFPR) construiu uma infraestrutura composta por usinas fotovoltaicas e laboratórios para a realização de estudos na área, focada em pesquisas sobre monitoramento (elétrico e ambiental), controle e desempenho do sistema elétrico. O projeto foi viabilizado por meio do Programa de Eficiência Energética e do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento regulado pela Aneel, com recursos da Copel.

A infraestrutura de pesquisas em microrredes da UFPR é composta por duas usinas fotovoltaicas, um laboratório de geração distribuída, um laboratório de microrredes, um laboratório de monitoramento de sistemas elétricos, uma rede de monitoramento de consumo de energia, uma rede de PMUs (phasor measurement units) e monitoramento climático. Esta microrrede está localizada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Curitiba, Brasil. É composta por nove alimentadores em 13,8 kV e seu POI é conectado a uma subestação de 69 kV da concessionária estadual de distribuição de energia por um alimentador de 5 km de comprimento.

A Geração Distribuída (GD) incluída nesta microrrede consiste de duas usinas de geração solar fotovoltaica (PV) e um gerador síncrono de biodiesel. A primeira usina de geração solar fotovoltaica possui uma potência instalada de cerca de 1100 kWp e a segunda de 110 kWp. Entre elas, a planta menor, devido à presença de sistemas de acumulação de energia (baterias), compõe o laboratório de microrrede que permite estudos avançados de sistemas de controle para operação nos modos conectado e ilhado.

A avaliação destas dinâmicas e a compreensão de como elas interagem contribuem para a elaboração de estratégias operacionais das unidades geradoras e acumuladoras presentes na microrrede, visando o aumento da eficiência energética da rede e a melhoria da qualidade da energia fornecida aos consumidores.

Neste artigo é apresentada a infraestrutura e as pesquisas em microrredes de geração distribuída de energia da UFPR. Inicialmente apresenta-se a microrrede da UFPR e as usinas fotovoltaicas que compõem o sistema, o Laboratório de Monitoramento de Sistemas Elétricos, onde são agregados e onde são processadas as informações das diversas redes como os medidores de energia, a rede PMU e os dados meteorológicos provenientes de uma estação própria do projeto.

A MICRORREDE UFPR

A microrrede do campus Centro Politécnico da UFPR, Microrrede UFPR [Oliveira et al 2019, Oliveira et al 2020], está localizada na cidade de Curitiba (PR), Brasil (localização GPS 25.4508S, 49.2312W) e consiste de 9 alimentadores (compreendendo aproximadamente 3 km de cabos subterrâneos) a 13,8 kV conectados aos consumidores do campus através

de 16 transformadores 13,8 / 0,220 kV. A Figura 1 mostra seu diagrama unifilar. O ponto de acoplamento da microrrede (POI) é o barramento 5 e está conectado à concessionária de distribuição de energia (COPEL, Companhia Paranaense de Energia). Deste ponto, segue um alimentador de distribuição em 13,8 kV, com aproximadamente 5 km de comprimento (denominado Prado), até uma subestação de 69 kV (subestação Capanema).

Da perspectiva do sistema elétrico, conforme definido em [Canizares and Reilly, 2019], uma microrrede é definida como um grupo de Recursos Distribuídos de Energia (“Distributed Energy Resource – DER”), incluindo RER e SAE, além de cargas que operam localmente como uma única entidade controlável [B. Lasseter, 2001] [Olivares et al, 2014]. Neste contexto, a microrrede UFPR possui duas fontes de energia renovável, representadas por duas usinas solares fotovoltaicas presentes no sistema, conectadas nas barras 16 e 23. Além disso, existe um gerador síncrono de biodiesel no barramento 26. A carga total do campus é de cerca de 1,75 kVA.

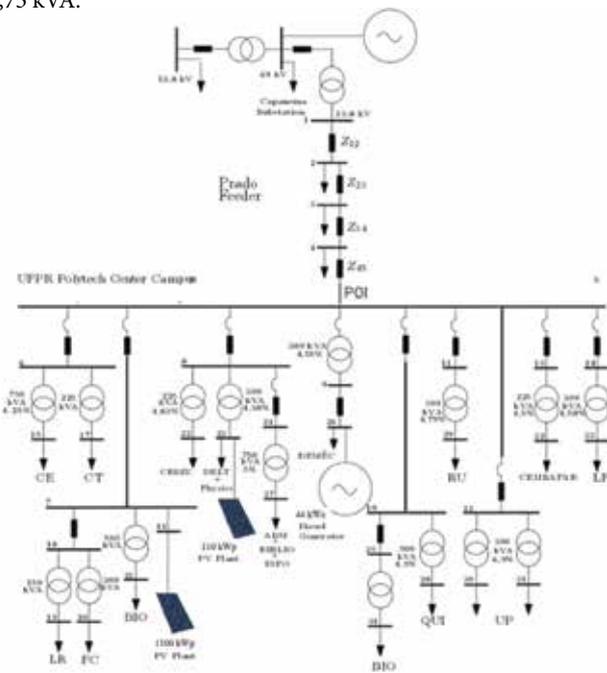


Figura 1 – Diagrama unifilar da Microrrede UFPR.

DISPOSITIVOS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS: USINAS FOTOLTAICAS

A primeira é a usina FV-BIO, com uma potência instalada aproximada de 1100 kWp, está localizada no estacionamento do setor de Ciências Biológicas e conectada ao barramento 16 do diagrama da Figura 1. Uma vista aérea é mostrada nas Figuras 2 e 3. A usina FV-BIO conta com um transformador de 1,2 MVA 13,8 / 0,8 kV, 6 (seis) inversores de frequência de 175 kW CC / CA, alimentado por 464 módulos fotovoltaicos, 400 Wp cada.



Figura 2 – Vista aérea da usina FV-BIO.



Figura 3 – Vista aérea 2 da usina FV-BIO.

A segunda usina FV, denominada FV-DELTA, com 110 kWp de potência instalada, está localizada no Departamento de Engenharia Elétrica (DELTA) e está conectada ao barramento 23 do diagrama unifilar na Figura 1. Na verdade, dentro da Microrrede da UFPR, é possível encontrar uma microrrede menor que pode permitir a operação em modo ilhado do DELTA, uma vez que é alimentada pela usina FV-DELTA e por diversos elementos de armazenamento.

A localização dessa segunda microrrede elétrica é representada no barramento 23 na Figura 1. Uma foto aérea desta instalação está na Figura 4. A Figura 5 descreve os principais dispositivos do laboratório de microrredes, incluindo os equipamentos de armazenamento de energia e as cargas prioritárias, que podem ser desconectados da rede de baixa tensão pelo interruptor mostrado na parte superior da figura. Nesta figura, pode-se notar a presença de três conjuntos de fontes fotovoltaicas: 3,5 kWp conectados a uma rede de 220V CA; 10 kWp conectados a uma rede de 725V CC e 95 kWp conectados a uma rede de 400 V CA incluída na microrrede DELTA. Como pode ser visto na Figura 5, a microrrede possui 3 tecnologias de armazenamento para estudos comparativos do sistema elétrico com diferentes ciclos de carga / descarga, vida útil e densidade de potência diferentes.



Figura 4 – Vista aérea da usina FV-DELT.

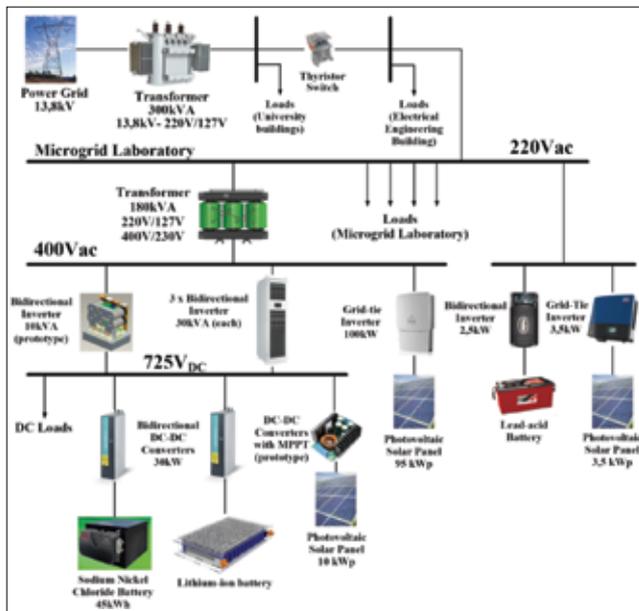


Figura 5 – Elementos da microrrede DELT.

A arquitetura da microrrede DELT prevê que, em caso de queda de energia ou decisão de controle, ela possa operar de forma autônoma. Através dos elementos de armazenamento, os conversores CC-CC e o conversor CC-CA, essa microrrede pode armazenar energia e operar ilhada do restante da microrrede UFPR. Os elementos de armazenamento juntos fornecem uma capacidade de 75 kWh e uma potência nominal de 42 kW. Ao reconectar o restante da rede, o sistema de supervisão e controle (Centro de Controle) atua sobre os valores efetivos, frequência e fase da tensão interna do barramento principal, permitindo reconectar sem desligar.

O sistema de supervisão e controle consiste em um servidor com protocolo de comunicação TCP Modbus, com controle supervisão SCADA. Os dispositivos são conectados à interface Ethernet em uma rede local virtual dedicada (VLAN). Como os

inversores fotovoltaicos permitem o controle da energia reativa, dentro dos limites nominais de potência aparente (0 a 1, indutivo e capacitivo), o sistema de supervisão e controle também pode atuar no controle do fator de potência geral da microrrede.

CENTRO DE OPERAÇÃO E MONITORAMENTO: MEDIDORES, PMU E DADOS METEOROLÓGICOS

Um Centro de Operação e Monitoramento (COM) foi projetado e construído na Microrrede UFPR. É responsável por receber, processar, armazenar e disponibilizar os dados elétricos para visualização e análise em tempo real. Entre os possíveis estudos relacionadas à integração de fontes renováveis no sistema elétrico, podem ser destacadas a análise da qualidade da energia, desempenho dinâmico e estimativa de estado. A detecção de transientes, assinaturas e aspectos de comunicação e tráfego de dados também são focos de pesquisa.

O painel de controle possui três monitores (ver Figura 6) para visualizar os vários sinais disponíveis. Dados sistematizados e resumidos são também disponibilizados na página energi.eletrica.ufpr.br.

O processamento e o armazenamento de dados são realizados por servidores com fontes de alimentação redundantes, discos rígidos que permitem espelhamento (RAID 1) e hot swap em caso de falha e múltiplos processadores e núcleos. O sistema operacional adotado é baseado em software livre (Debian 9.0) e a máquina física executa várias máquinas virtuais. Desta forma, é possível ter vários processos rodando de forma independente e em segurança.



Figura 6 – Monitores da Central de Operação e Monitoramento – COM.

Em relação aos dados elétricos para monitoramento em tempo real, eles são provenientes de diferentes equipamentos de medição: 100 medidores de energia, 6 analisadores de qualidade de energia, 6 unidades de medição fasorial ou PMUs, 7 inversores da geração fotovoltaica, além dos sensores da estação meteorológica. A localização de alguns desses equipamentos de medição pode ser vista na Figura 7.

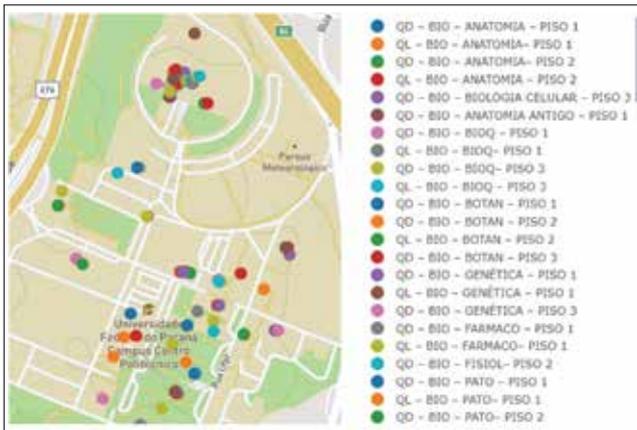


Figura 7 – Localização dos medidores de energia e qualidade de energia.

A Figura 8 mostra um diagrama ilustrando as diversas formas de comunicação. Quando possível, os medidores são alocados em uma VLAN (Virtual LAN) dedicada para medição, por questão de segurança e facilidade na operação. Em alguns casos são utilizadas outras VLANs internas à universidade, onde os equipamentos são configurados em sub-rede de intranet, com endereço privado não roteável para o exterior da universidade. Também podem ser utilizados equipamentos de medição em sub-rede de outros campi com endereço IP público, ou privado (neste caso, em sub-rede conectada por roteador NAT – Network Address Translation). Para equipamentos que tenham função de controle, onde o aspecto da segurança é mais crítico, está prevista a utilização de criptografia para garantir a proteção dos dados, através de VPN (Virtual Private Network). Os dados concentrados podem ser retransmitidos a outras centrais de monitoramento, na função tipicamente realizada por um PDC (Phasor Data Concentrator). Os dados recebidos podem ser processados em tempo real através de comunicação utilizando soquete UDP com o mesmo protocolo das PMUs. A transferência de dados é realizada de acordo com a norma IEEE C37.118.2, Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems [IEEEC37-2011]. Os dados armazenados podem ser visualizados pelos pesquisadores através de interface web e podem ser exportados para análises e processamentos diversos através de uma API (do tipo REST utilizando HTTP ou via soquete TCP encriptado para transmissões de dados em redes não seguras), ou simplesmente arquivo em formato planilha (CSV).

As PMUs são do fabricante Power System Lab (PSL), cujo produto é uma parceria desta empresa com a Universidade da Califórnia em Berkley (UCB). São chamadas de uPMUs pois fornecem 120 fasores por segundo com medições ultra-precisas de magnitudes (da ordem de 10^{-4} pu) e ângulos de fase (da ordem de $0,01^\circ$) do fasores. Os locais das uPMU estão ilustrados na Figura 9 (a). Esta figura mostra a presença de 4 unidades na cidade de Curitiba, todas localizadas na rede de distribuição de energia

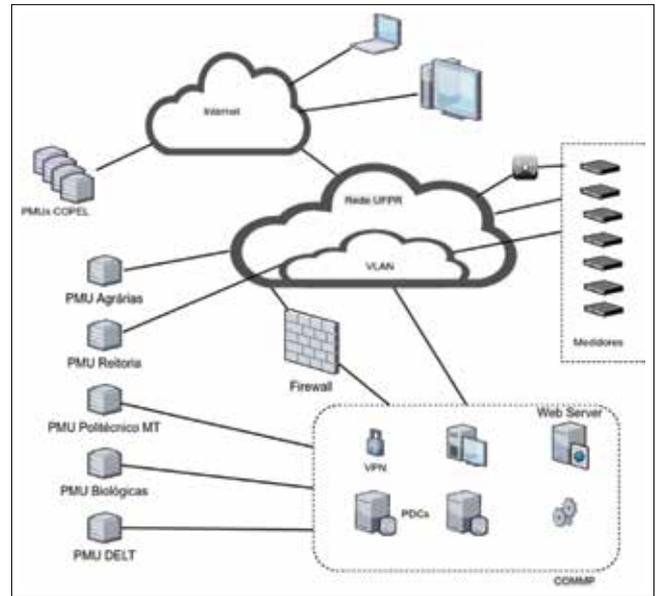


Figura 8 – Diagrama conceitual da central de operação de monitoramento da minirrede do politécnico.

(Copel - Companhia Paranaense de Energia). Três deles estão no Centro Politécnico, especificamente na barra 16 (uma unidade) e 23 (duas unidades) (veja a Figura 1) e uma unidade em outro campus da UFPR, o Campus Agrárias. Outras duas uPMUs estão instaladas nas cidades de Palotina (em outro campus da UFPR) e, futuramente, em Faxinal do Céu 34,5 kV (uma subestação da Copel), também no estado do Paraná. A Figura 9 (b) mostra imagens de dois uPMUs instaladas no campus do centro politécnico e no campus da UFPR Agrárias. As uPMUs instaladas na rede de distribuição podem ser usadas para monitorar o comportamento dinâmico da própria rede devido, por exemplo, à entrada e saída de usinas de geração solar fotovoltaica na UFPR.

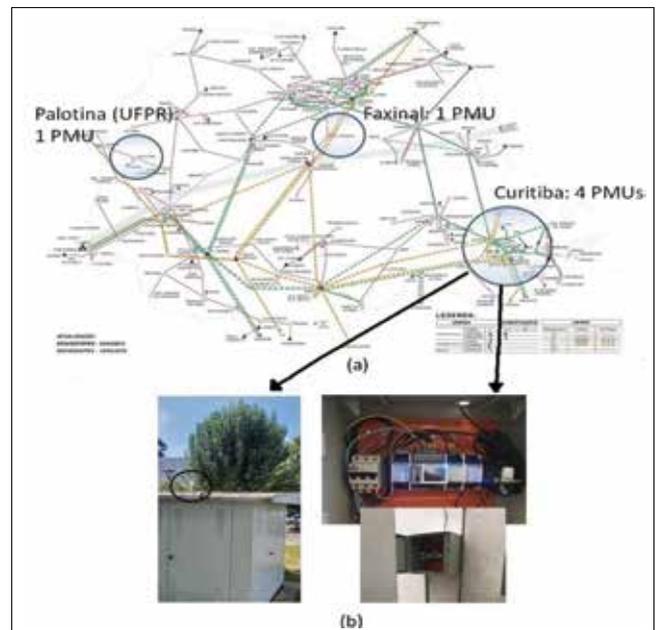


Figura 9 – Localização dos uPMUs da COM.

A Figura 10 mostra os gráficos para a mesma sequência de dados amostrada tanto a cada segundo (esquerda) quanto a 120 fps (direita). É interessante observar que muitos detalhes não são visíveis quando os dados são amostrados a cada segundo e são facilmente visualizados quando os dados são amostrados a 120 fps. Esse comportamento é importante para a análise e detecção de muitos eventos na rede.

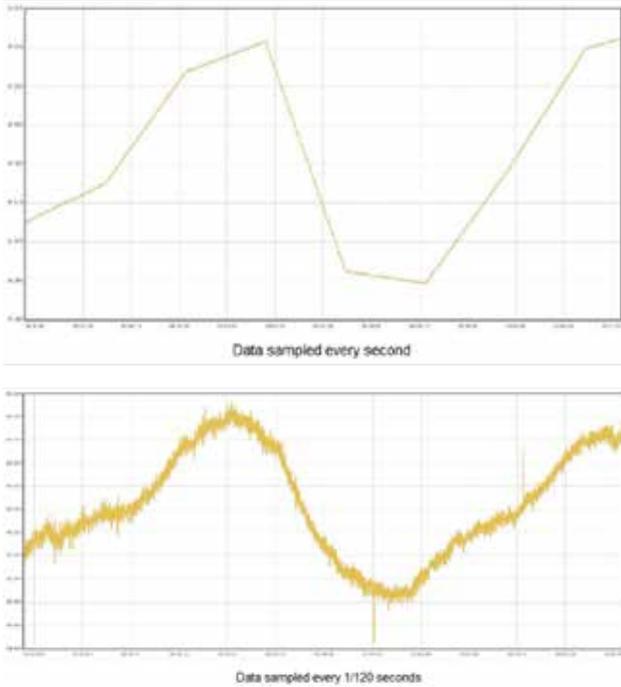


Figura 10 – Valores adquiridos a cada segundo (esquerda) e com 120 faixos por segundo.

Painéis (dashboards) são criados combinando-se diferentes gráficos temporais, widgets e diagramas fasoriais. É possível criar gráficos dinâmicos para visualização em tempo real como mostrado na Figura 11.

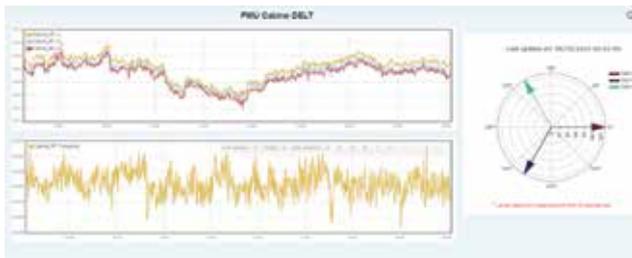


Figura 11 – Exemplo de painel para visualização de gráficos.

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

Também faz parte do projeto uma estação de monitoramento de dados meteorológicos. A estação está instalada no prédio PK do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR e pode ser vista na Figura 12. Ela inclui uma estação solarimétrica para monitoramento

de variáveis solares de geração de energia solar fotovoltaica tais como a irradiância solar no plano horizontal e no plano inclinado e a temperatura da superfície do painel solar. Além destas informações, são coletadas outras grandezas climáticas que afetam indiretamente a geração de energia pela planta fotovoltaica e a vida útil dos módulos fotovoltaicos, que são a radiação ultravioleta, temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento e quantidade de chuvas. A medição da radiação UV também serve, por exemplo, para avaliar a degradação dos materiais expostos ao sol.

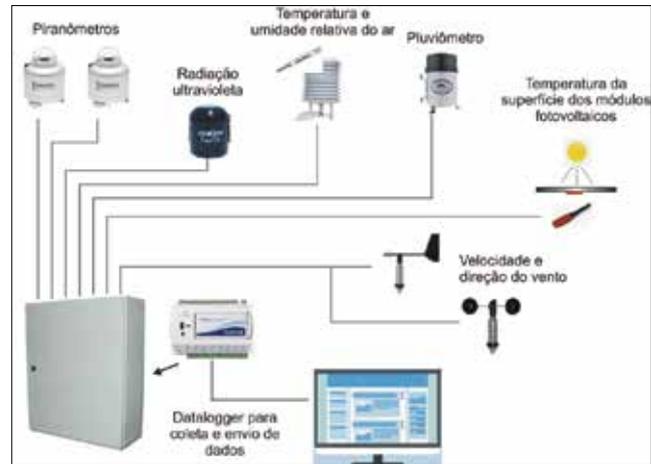


Figura 12 – Diagrama de sensores da estação.

Um dos principais sensores presentes na estação é o piranômetro (ver detalhe da Figura 13), capaz de medir radiação solar direta incidente, grandeza diretamente associada à produção de energia das usinas de geração fotovoltaica. Os dois equipamentos usados têm alta classe de precisão (padrão secundário – na hierarquia dos padrões de medição, um padrão secundário é aquele criado através de uma calibração com referência a um padrão primário), monitorando a faixa de potência de 0 a 4.000 W/m², no espectro de 285 nm a



Figura 13 – Estação de monitoramento de dados meteorológicos instalada no DELT.

3000 nm. Possuem um sistema de aquecimento que fornece compensação de temperatura para manter a precisão nas medições em diferentes condições climáticas. As informações fornecidas pela estação são muito úteis, no sentido de que, com a presença da planta solar fotovoltaica, pode-se utilizar os dados para avaliar o desempenho de operação e a quantidade de energia que deve estar sendo produzida.

Mas a estação também tem o objetivo de criar um histórico de dados de medição solar, temperatura, velocidade e direção dos ventos predominantes e disponibilizar ao Departamento de Engenharia Elétrica e para a universidade as informações de todos os sensores, através do servidor na central de monitoramento. Na Figura 14 é apresentado o painel de visualização dos dados disponibilizados pela estação.

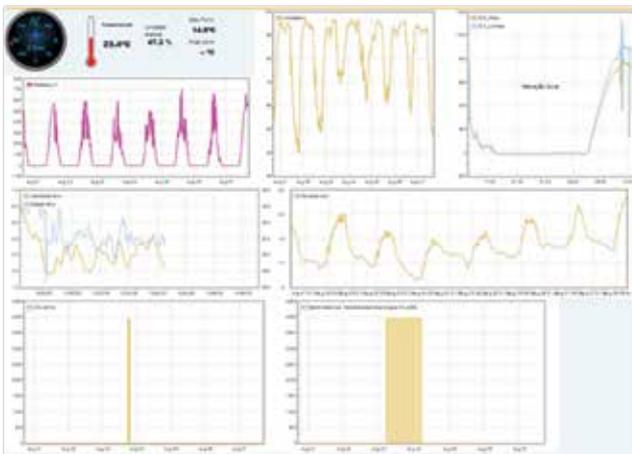


Figura 14 – Página web com as informações disponibilizadas.

CONCLUSÃO

Esforços no desenvolvimento e entendimento das microrredes estão sendo feitos em todo o mundo, destacando-se as aplicações no ambiente urbano devido à diversificação de tipos de recursos energéticos distribuídos, dada a extrema competitividade econômica de fontes alternativas ou renováveis de geração [US.EIA, 2019] e a recente disponibilidade crescente de tipos de acumulação de energia economicamente competitivos.

Esta nova modalidade de geração é uma das que mais se expande no sistema elétrico brasileiro, trazendo desafios em pesquisas abordando qualidade da energia, monitoramento,

controle, eficiência, estabilidade do sistema, compensação reativa e inserção de sistemas de armazenamento de energia. Neste contexto, o Departamento de Engenharia Elétrica contribui para as pesquisas na área pela implementação de infraestrutura de pesquisa composta por usinas fotovoltaicas e laboratórios dedicados a estudos em microrredes vinculados ao programa de pós-graduação em engenharia elétrica. Deste modo, a UFPR consolida-se como uma referência prática para pesquisas na área de conexão de fontes renováveis na rede de média tensão da rede de distribuição do sistema elétrico, contribuindo na formação de profissionais e na disponibilização de tecnologias e soluções para a construção de microrredes de alta qualidade.

REFERÊNCIAS

- [B. Lasseter, 2001] B. Lasseter, "Microgrids [distributed power generation]", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001.
- [Canizares and Reilly, 2019] C. A. Canizares and J. Reilly, "Microgrid Stability Definitions Analysis and Examples", IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1-17, April 2019.
- [Olivares et al., 2014] D. E. Olivares et al., Trends in Microgrid Control IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, 2014.
- [Oliveira et al, 2019] G. H. C. Oliveira; R. Kuiava; G. V. Leandro; J. A. Vilela Jr; R. Demonti; E. P. Ribeiro; J. S. Dias; A. Pedretti "Minirrede UFPR: Um benchmark para pesquisas em geração distribuída e eficiência energética", XXV SNPTEE, Belo Horizonte, 2019.
- [Oliveira et al, 2019] G. H. C. Oliveira; R. Kuiava; G. V. Leandro; J. A. Vilela Jr; R. Demonti; E. P. Ribeiro; J. S. Dias; A. Pedretti "UFPR Microgrid: A Benchmark for Distributed Generation and Energy Efficiency Research" IEEE ISGT NA Conference, Washington, USA, 2020.

*Gustavo Henrique Da Costa Oliveira, João Américo Vilela Júnior, James Alexandre Baraniuk, Eduardo Parente Ribeiro, Roman Kuiava, Gideon Villar Leandro, Rogers Demonti e João Da Silva Dias são engenheiros, com doutorado em Engenharia Elétrica. São professores e pesquisadores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná (UFPR). André Pedretti é engenheiro eletricitista e gerente de projetos na Copel Área DIS/SSG.