



## Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

### Minirrede UFPR: Um benchmark para pesquisas em geração distribuída e eficiência energética

**GUSTAVO HENRIQUE DA COSTA OLIVEIRA(1); ROMAN KUIAVA(1); GIDEON VILLAR LEANDRO(1); JOÃO AMÉRICO VILELA JÚNIOR(1); ROGERS DEMONTI(1); EDUARDO PARENTE RIBEIRO(1); JOÃO DA SILVA DIAS(1); ANDRÉ PEDRETTI(2); UFPR(1); COPEL DIS(2);**

#### RESUMO

Neste artigo, apresenta-se o estágio atual de implantação de uma minirrede com geração distribuída voltada para pesquisas em monitoramento (elétrico e ambiental), controle e desempenho do sistema elétrico. Esta minirrede está localizada no Campus Centro Politécnico (CP) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba e é parte de um projeto de P&D com apoio direto da Companhia Paranaense de Energia (Copel). A minirrede é constituída por 9 alimentadores em 13,8 kV, 3 fontes de geração distribuída e está conectada à rede sub-transmissão através da SE Capanema da COPEL Distribuidora. Além de sua configuração elétrica, são apresentados todos os componentes da minirrede, como a geração de energia, os medidores elétricos e ambientais, as  $\mu$ PMU e o ambiente computacional de monitoramento do sistema.

#### PALAVRAS-CHAVE

Geração Distribuída, Eficiência Energética, Fontes de Energia Renováveis, Monitoramento, PMU.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Com os avanços da geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis (por exemplo, solar e eólica) e o aumento do nível de sua inserção na rede elétrica, crescem os desafios para o controle da qualidade de energia, estabilidade e confiabilidade da operação, tanto da geração de energia renovável como do próprio sistema de distribuição e transmissão no qual ela está conectada. Boa parte destes desafios ocorre devido à natureza intermitente de grande parte das fontes de energias renováveis. Flutuações de potência gerada por painéis fotovoltaicos devido a variações climáticas podem, por exemplo, levar a flutuações de tensão e de frequência no ponto de interconexão com o sistema de distribuição. Tais flutuações de tensão podem causar problemas de estabilidade e qualidade de energia e geralmente requerem compensação reativa ou suporte de energia via equipamentos de armazenamento de energia.

Além destes desafios citados para a operação local, é de extrema importância a realização de estudos que avaliem os possíveis impactos na operação dos sistemas de distribuição e transmissão, após a conexão da minirrede, na rede de média tensão da distribuidora. Sob o ponto de vista do sistema elétrico, uma minirrede pode ser vista como geração distribuída (GD) que apresenta uma forte componente de geração não-inercial (fotovoltaica e por células a combustível), mas também de geração baseada em máquinas rotativas. Assim, dinâmicas de natureza tanto eletromagnéticas (associadas aos geradores fotovoltaicos), como eletromecânicas (associadas aos geradores rotativos) irão se manifestar na rede, exigindo o aprimoramento da capacidade de medição de sinais de interesse (como tensão e frequência), das técnicas de processamento de sinais para identificação destas dinâmicas de naturezas distintas. Também, do controle dos inversores utilizados na geração fotovoltaica, nas células combustível e nos elementos acumuladores de energia. A avaliação destas dinâmicas e o entendimento de como elas interagem entre si pode ser útil para a elaboração de estratégias de operação das

unidades geradoras e acumuladoras presentes na minirrede, com vista, por exemplo, à elevação da eficiência energética da rede e à melhoria da qualidade de energia entregue aos consumidores. Outros aspectos que devem ser levados em consideração para a operação eficiente e ambientalmente favorável de uma minirrede com geração híbrida de energia elétrica são: implantação de uma central de operação e monitoração da minirrede, projeto arquitetônico para a instalação dos painéis fotovoltaicos baseados em diferentes tecnologias que possibilite maximizar a produção de energia elétrica ao longo do dia, controle adequado das emissões de gases provenientes da queima de combustíveis de modo a minimizar o nível de contaminação ambiental provocado pelas emissões.

Esforços neste sentido estão sendo realizados em todo o mundo, como por exemplo, nos trabalhos [1] a [10].

Não menos relevante que a geração de energia elétrica baseada em energia solar e eólica, têm-se observado uma procura por novas fontes alternativas de geração de energia elétrica, como é o caso da geração de energia a partir de biodiesel, de células a combustível alimentadas a hidrogênio e do aproveitamento de resíduos sólidos urbanos e rurais (por exemplo, biomassa, resíduos agrossilvopastoris, embalagens, resíduos hospitalares, lodos orgânicos e restos de compostagem, entre outros). Este crescimento, presente principalmente em áreas rurais, faz com que o estudo da dinâmica do sistema elétrico com fontes renováveis e distribuídas seja de grande importância para o setor.

Neste artigo, apresenta-se o estágio atual de desenvolvimento de uma minirrede com geração distribuída voltada para pesquisas em monitoramento (elétrico e ambiental), controle e desempenho do sistema elétrico. Esta minirrede está localizada no Campus Centro Politécnico (CP) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba e é parte do projeto P&D com apoio direto da Companhia Paranaense de Energia (Copel). É constituída por 9 alimentadores em 13,8 kV e está conectada em um alimentador de 5 km de extensão até da SE Capanema da COPEL Distribuidora. A geração distribuída presente nesta minirrede consiste de duas plantas de geração solar fotovoltaicas (FV) e um gerador síncrono a biodiesel.

As duas plantas de geração solar FV estão sendo implantadas dentro do Campus da UFPR. A primeira possuirá potência instalada de aproximadamente 1100 kWp e a segunda possuirá potência instalada de aproximadamente 66 kWp. O término da instalação destas duas fontes está previsto para o segundo semestre de 2019. Dentre elas, a planta de menor porte em conjunto com dispositivos de acumulação de energia elétrica nela presentes formará uma microrrede que possibilitará estudos avançados de sistemas de controle para operação no modo conectado e ilhado. Finalmente, um gerador síncrono com turbina térmica alimentada por biodiesel de potência de 50 kW também estará presente.

Não menos importante, deve-se citar que dados elétricos e climáticos da minirrede estão sendo concentrados em uma central de monitoramento capaz de fornecer informações em tempo real de operação do sistema, compondo um banco de dados para estudos e ações de elaboração de novas políticas de operação para o sistema de distribuição, identificação de oportunidades de negócio para consumidores e concessionários, assim como de eficiência energética deste campus da universidade.

O artigo está estruturado como segue. Na Seção 2, tem-se uma descrição da minirrede com geração distribuída. Na Seção 3, descreve-se a microrrede implementada dentro da minirrede. Na Seção 4, a central de monitoramento de dados elétricos, aí incluindo a rede de  $\mu$ PMUs, e dados meteorológicos é apresentada. Na Seção 5, abordam-se algumas ações de eficiência energética relacionadas com a minirrede. Finalmente, na Seção 7, o artigo é concluído.

## 2.0 - MINIRREDE DA UFPR

### 2.1 Descrição

A minirrede do campus Centro Politécnico (CP) da UFPR, localizada na cidade de Curitiba/PR, é constituída por 9 alimentadores (compreendendo, aproximadamente, 3 km de cabos subterrâneos) em 13,8 kV conectados aos consumidores do campus através de 16 transformadores de 13,8/0,220 kV na configuração  $\Delta$ -Y. A interligação da minirrede com a rede de média tensão de 13,8 kV da COPEL Distribuição SA e o resto do sistema elétrico interligado é feita através de um alimentador de distribuição, denominado de Alimentador Prado (de aproximadamente 5 km de extensão), termina na Subestação Capanema de 69 kV. Na FIGURA - 1 é apresentado o diagrama unifilar do sistema em estudo.

### 2.2 Usinas Fotovoltaicas

Duas plantas de geração solar FV estão sendo implantadas no Campus Politécnico da UFPR. A primeira (planta FV-BIO), com potência instalada aproximada de 1100 kWp, será localizada no estacionamento do Setor de

(\*) Departamento de Eng. Elétrica, Centro Politécnico CP. 19011, UFPR. Curitiba/PR, 81531-980, (41)3361-3510. [gustavo@eletrica.ufpr.br](mailto:gustavo@eletrica.ufpr.br)

Ciências Biológicas e será conectada na barra 16 do diagrama unifilar da FIGURA - 11. A segunda (planta FV-DELT), com potência instalada aproximada de 66 kWp, será localizada no Departamento de Engenharia Elétrica (DELT) e será conectada na barra 23 do diagrama unifilar da FIGURA - 11. A planta FV-DELT constitui uma microrrede que possibilitará a operação no modo ilhado de parte do prédio do Departamento de Engenharia Elétrica.

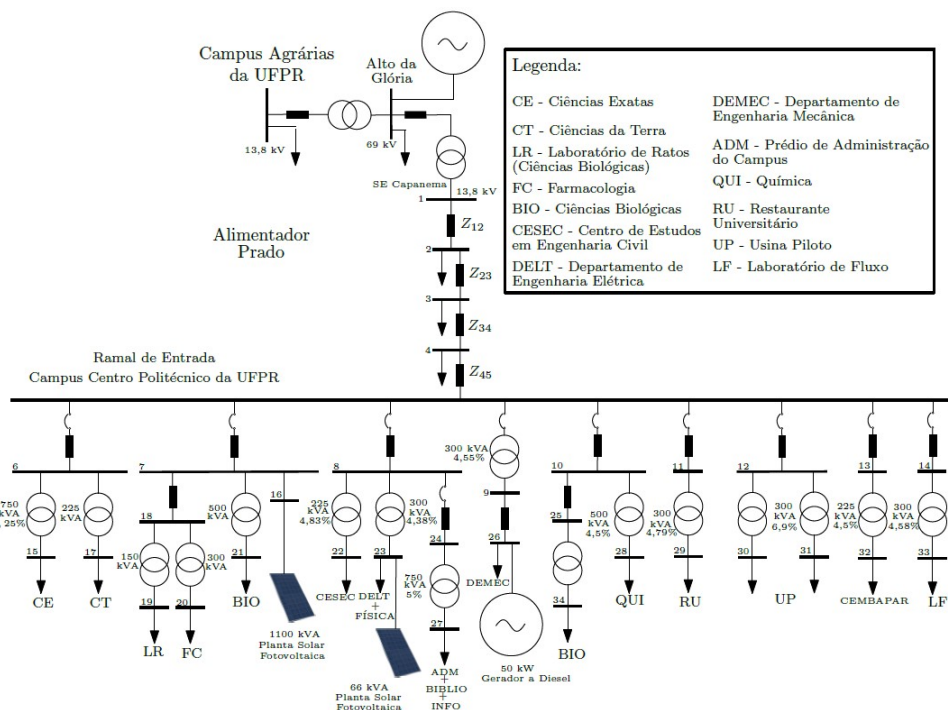


FIGURA - 1. Diagrama Unifilar da Minirrede do Campus Centro Politécnico (CP) da UFPR.

A Figura 2 (a) contém uma visão aérea da planta FV-BIO. Pode-se observar, perto do topo desta figura, o prédio do Setor de Ciências Biológicas da UFPR e, à sua direita, sobre o estacionamento, as futuras instalações da usina FV destacada em azul. Esta planta FV-BIO contará com um transformador 13,8/0,480 kV de 1800 kVA, 17 inversores de frequência CC/CA de 60 kW, cada um alimentado por 216 módulos fotovoltaicos de 315 Wp. Serão 12 Strings por inversor e 18 painéis por String. A Figura 2 (b) contém uma foto aérea via Google Maps do local da usina junto com um detalhe do projeto da usina FV. Cada uma das 17 cores na Figura 2 (b) representa o circuito de um inversor.

(\*) Departamento de Eng. Elétrica, Centro Politécnico CP. 19011, UFPR. Curitiba/PR, 81531-980, (41)3361-3510. gustavo@eletrica.ufpr.br

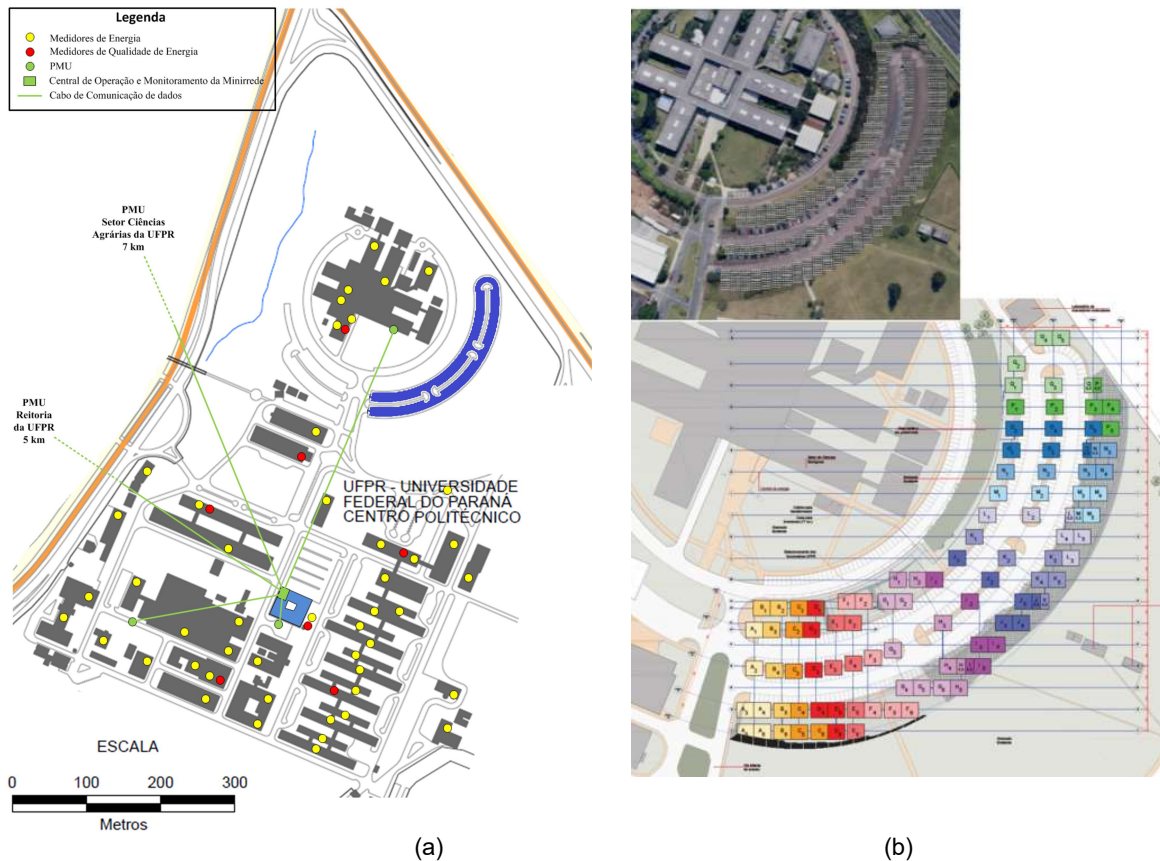


FIGURA 2. (a) Visão aérea do Campus com as placas destacadas em azul; (b) Detalhe da planta FV-Bio (acima a imagem de satélite do Google Maps e abaixo os grupos de painéis).

### 3.0 - MICRORREDE

As microrredes vêm ganhando destaque no ambiente urbano devido à diversificação dos tipos de recursos energéticos distribuídos, dada a extrema competitividade econômica de fontes de geração alternativas ou renováveis [11], e mais recente crescente disponibilidade de tipos de acumulação de energia economicamente competitivas [12]. Tratam-se de redes elétricas locais, que podem ser desconectadas do sistema central, e muitas vezes contam com o auxílio de baterias e outros elementos armazenadores. Sendo um forte motivador para o crescimento das microrredes, e a combinação de recursos energéticos distribuídos com armazenamento de energia [13].

A microrrede presente na minirrede descrita na Seção 2 pode ser visualizada no centro da Figura 2, no destaque em azul. A Figura 1 contém o diagrama unifilar na minirrede e a microrrede, com destaque para o ponto de conexão no resto do sistema elétrico pela barra 23. Na Figura 3 (e Figura 1) observa-se, a partir da rede de média tensão em 13,8 kV, existe um ramal proveniente de um transformador abaixador que alimenta o prédio do Departamento e outros prédios próximos com baixa tensão. Na Figura 3, tem-se os elementos da microrrede, incluindo os elementos armazenadores e cargas prioritárias, e que pode ser desconectada da rede de média tensão pela chave ilustrada no topo da figura. Nesta figura, nota-se a presença de dois conjuntos de fontes FV, um de 3,5 kWp (já instalado) conectado à microrrede em 220 V CA e outro de 60 kWp, a ser instalado em 2019, conectado à microrrede em 380 V CA. A microrrede possui 3 tecnologias de armazenamento, para estudos comparativos do sistema elétrico com ciclos de carga/descarga, vida útil e densidade de potência e energia diferentes.

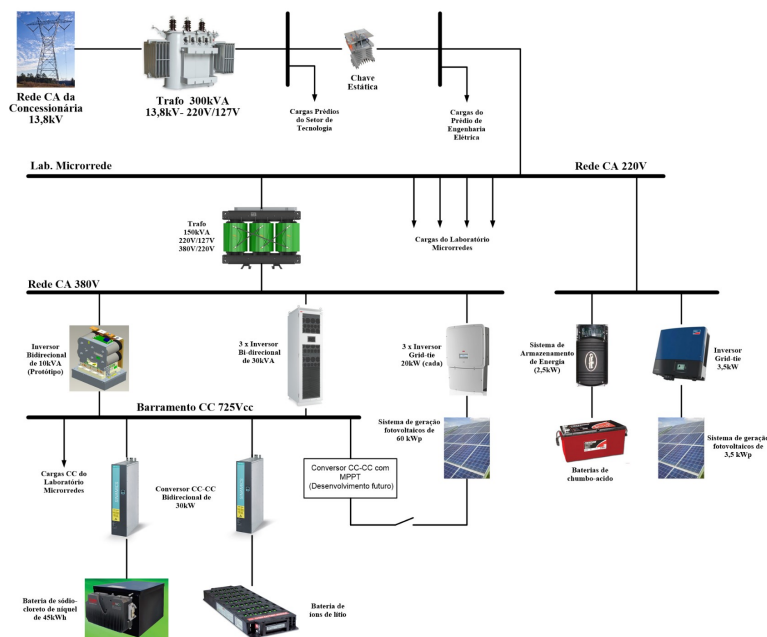


FIGURA 3 - Microrrede com barramentos, elementos armazenadores, cargas e elementos de interrupção.

De fato, a arquitetura da microrrede prevê que, em caso de falta da rede de distribuição ou decisão do controle, esta possa operar de forma autônoma. Através dos elementos armazenadores (bancos de baterias de lítio e níquel-sódio), dos conversores CC-CC e do conversor CC-CA, a microrrede pode armazenar energia e operar de forma isolada da rede de distribuição convencional. Os dois elementos armazenadores juntos fornecem uma capacidade de energia de 55 kWh e de potência, com taxa de 1C, de 22,5kW. A tensão do barramento CC é de 725 V. Quando da reconexão da microrrede da rede de média tensão, o sistema de supervisão e controle (Central de Controle) atua nos valores eficazes, na frequência e na fase da tensão interna do barramento principal, permitindo a reconexão na rede de distribuição sem necessidade de desligamento. Estudos práticos de projeto de sistemas de controle de redes ilhadas como também técnicas de reconexão poderão ser realizados.

O sistema de supervisão e controle é formado por um servidor com protocolo de comunicação modbus TCP, com controle supervisão SCADA. Os dispositivos são conectados com interface ethernet (nativa ou com conversor) em uma rede local virtual (VLAN) dedicada. Como os inversores fotovoltaicos permitem o controle da energia reativa [14] dentro dos limites nominais de potência aparente (de 0 a 1, indutivo e capacitivo), o sistema de supervisão e controle também atuará no sentido de controlar o fator de potência global da microrrede. Com auxílio do conversor CC-CA, cujo o fator de potência pode ser ajustado de 0,6 a 1 (indutivo e capacitivo), a microrrede, do mesmo modo, poderá produzir de forma otimizada energia reativa para a rede do prédio do DELT, melhorando os perfis de tensão da rede. Estudos práticos de projeto de sistemas de controle de tensão de redes com GD e fontes intermitentes poderão ser realizados.

#### 4.0 - CENTRAL DE MONITORAMENTO: MEDIDORES, REDE DE PMU E DADOS METEOROLÓGICOS

Uma Central de Operação e Monitoramento da Minirrede do Politécnico (COMMP) que está sendo projetada e construída na minirrede. Esta central está localizada no Laboratório de Geração Distribuída (LabGD) que, por sua vez, está localizado no Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR, referenciar-se pela Figura 2(a), detalhe em azul ao centro.

Esta central é responsável por receber, armazenar e disponibilizar os dados elétricos para visualização e análises em tempo real ou a partir dos registros. A central dispõe de três monitores de 49" para visualização e acompanhamento dos diversos sinais, conforme mostra a Figura 4. Nesta figura, à esquerda, pode-se observar os monitores para visualização dos dados, à direita, o rack com servidor físico e *switch* para interconexões, processamento e armazenamento de dados. Parte dos dados estará, entretanto, também disponível via WEB.

O processamento e armazenamento dos dados é realizado por servidores com fontes de alimentação redundantes, múltiplos discos rígidos que permitem operação com espelhamento (RAID 1) e troca quente em caso de falha, e múltiplos processadores. O sistema operacional utilizado é baseado em software livre (Debian

(\*) Departamento de Eng. Elétrica, Centro Politécnico CP. 19011, UFPR. Curitiba/PR, 81531-980, (41)3361-3510. gustavo@eletrica.ufpr.br



9.0) e a máquina física executa diversas máquinas virtuais. Desta forma pode-se ter múltiplos processamentos de forma isolada e segura.



FIGURA 4 – Visualização dos sinais em tempo real (à esquerda) e servidor da COMMP (à direita).

No que tange às grandezas elétricas para monitoramento em tempo real, estas são provenientes de três tipos de equipamentos diferentes: medidores de grandezas elétricas, medidores de qualidade de energia e  $\mu$ PMUs (Phasor Measurement Units). Estes equipamentos estão presentes nas seguintes quantidades: 100, 14 e 6, respectivamente. A localização dos medidores pode ser observada na Figura 2.

Devido à presença das plantas de geração solar fotovoltaicas, o projeto possui uma estação de monitoramento de dados meteorológicos, dados estes que afetam de forma direta e indireta a geração de energia. Estas informações, detalhadas na Seção 4.3, também são incorporadas à central de monitoramento. A rede de  $\mu$ PMUs está descrita também na Seção 4.2, a seguir.

Todos os dados provenientes do sistema de monitoramento são captados e levados pela rede para a COMMP para serem guardados para realização de estudos off-line e utilizados para tomadas de decisão de operação em tempo real. Dentre os estudos possíveis relacionados com a integração de GDs e fontes renováveis no sistema elétrico, destacam-se análise de qualidade de energia, de desempenho dinâmico e estimação de estados. Destaca-se também a detecção de assinaturas de transitórios e aspectos de comunicação e tráfego de dados. A estação de monitoramento de dados meteorológicos dá suporte aos estudos de eficiência energética em diversos aspectos, tais como a produção de energia das plantas de geração FV, degradação dos módulos e contribui para a composição de um histórico para estudos futuros.

O diagrama na Figura 5 ilustra as formas de conexões utilizadas. Algumas  $\mu$ PMUs são conectadas diretamente na central de monitoramento. Outras  $\mu$ PMUs e medidores são conectados fisicamente na infraestrutura de rede existente na universidade e podem participar da VLAN dedicada ao monitoramento ou simplesmente transmitir dados a partir de um endereço IP próprio. As  $\mu$ PMUs externas à universidade transmitem os dados pela própria internet com o protocolo UDP. Está prevista a utilização de VPN (Virtual Private Network) para alguns dispositivos de controle críticos, como ações de controle sobre os inversores.

#### 4.1 Estrutura de software

Vários softwares podem ser utilizados para o processamento, armazenamento e visualização de dados de grandezas elétricas. Na minirrede, está sendo utilizado o software openPDC (open source PMU data concentrator ou concentrador de dados de  $\mu$ PMU de código aberto) que recebe os fasores provenientes dos  $\mu$ PMU e armazena-os podendo também repassar a outros softwares ou concentradores. O padrão de encapsulamento e transferência dos dados utilizado é o IEEE Std C37.118.2-2011. A Figura 6 mostra uma das telas do openPDC [15].

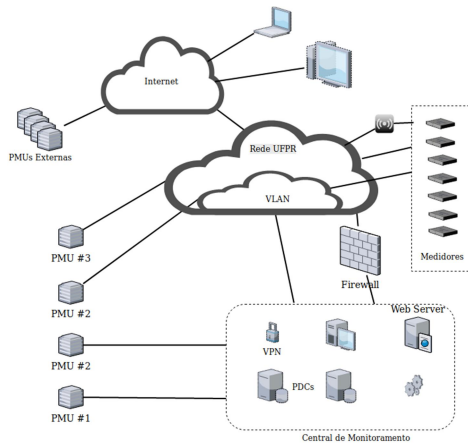


FIGURA 5 – Diagrama de conexões da central de monitoramento.

A central de monitoramento também utiliza um software livre para a função SCADA/EMS (supervisory data acquisition and control / energy management system).

O sistema de gerenciamento de conteúdo (CMS) de monitoramento de energia via web foi adaptado para o armazenamento e monitoramento dos sinais provenientes dos  $\mu$ PMUs em dois pontos. O primeiro diz respeito à taxa de amostragem e armazenamento. O sistema Emoncms [14] normalmente armazena dados de medidores enviados com baixa frequência, tipicamente um a cada minuto, com período mínimo para armazenamento de 1 segundo. O sistema foi modificado para período mínimo de 1 ms visando acomodar os dados enviados pelos  $\mu$ PMUs que possuem taxa de amostragem de 8,33 ms (ou 120 fasores/segundo). Foi criado um código dedicado (Python) para o constante recebimento dos fasores proveniente dos  $\mu$ PMUs para escrita diretamente no banco de dados, visando não sobrecarregar o processamento que é nativamente baseado no protocolo HTTP.

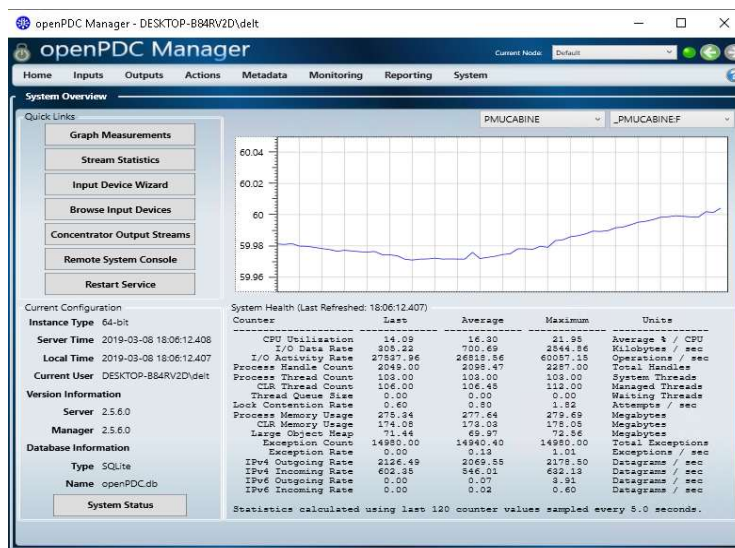


FIGURA 6 – Visualização do gráfico de frequência no openPDC Manager

A segunda modificação realizada diz respeito ao pré-processamento dos fasores (código Python) que visou interpretá-los como uma sequência positiva de fase (progressão no sentido horário). Isso teve como objetivo comparar os dados armazenados com dados de fasores proveniente de PMUs de outros fabricantes.

#### 4.2 A Rede de PMU

Conforme Seção 4.0, a microrrede possui de 6 unidades de  $\mu$ PMUs e está configurada para conexão a outras redes de PMUs. As  $\mu$ PMUs adquiridas são da empresa Power System Lab (PSL), cujo produto é uma parceria desta empresa com a *University of California at Berkley* (UCB) [16]. As  $\mu$ PMUs fornecem medidas ultra-precisas de magnitudes (da ordem de  $10^{-4}$  pu) e ângulos de fase (da ordem de  $0,01^\circ$ ) de tensões (ou sincrofasores). Os locais de instalação das  $\mu$ PMUs estão ilustrados na Figura 7(a). Observa-se, nesta figura, a presença de 4 unidades na cidade de Curitiba, todas localizadas em rede de distribuição da COPEL, sendo duas delas na rede

(\*) Departamento de Eng. Elétrica, Centro Politécnico CP. 19011, UFPR. Curitiba/PR, 81531-980, (41)3361-3510. gustavo@eletrica.ufpr.br

elétrica do Campus CP, conforme mostrado na Figura 1, barras 23 e 25. Outras duas  $\mu$ PMUs estão sendo instaladas nas cidades de Palotina (no campus da UFPR) e Faxinal (em subestação da COPEL), também no estado do Paraná. A Figura 7(b) mostra imagens de duas  $\mu$ PMUs instaladas nos Campus CP e das Agrárias da UFPR. As  $\mu$ PMUs instaladas na rede de distribuição poderão ser utilizadas para monitoramento do comportamento dinâmico da própria rede devido a, por exemplo, entrada e saída das plantas de geração solar FV previstas para serem instaladas no Campus CP da UFPR.

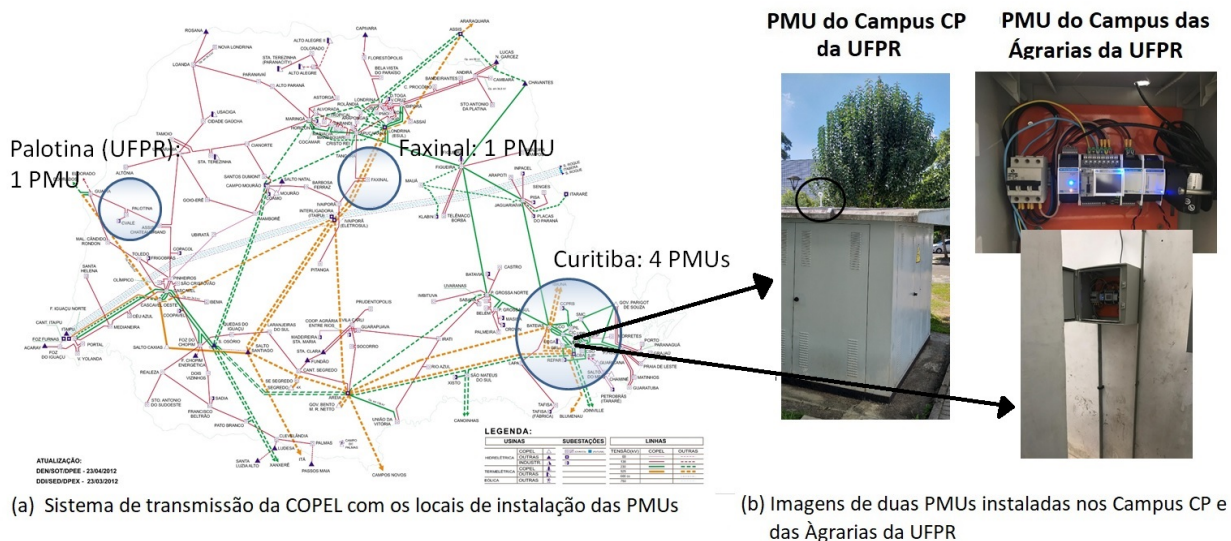


FIGURA 7 - Rede de  $\mu$ PMUs da Central de Monitoramento.

#### 4.3 Dados climáticos

Devido à presença das plantas de geração FV, a minirrede possui uma estação de monitoramento de dados meteorológicos, dados estes que afetam de forma direta e indireta a geração de energia. Assim, são medidas a radiação solar no plano horizontal e inclinado, temperatura do ar e dos módulos FV, a umidade do ar e dos módulos FV, a velocidade e direção do vento, a radiação ultravioleta incidente e o índice de precipitação pluviométrico. Ver Figura 8 para ilustração da apresentação WEB destes dados.

Um dos principais sensores presentes na estação de monitoramento de dados meteorológicos é o Piranômetro. Trata-se de um equipamento com capacidade de medir a radiação solar direta, no plano horizontal ou inclinado, radiação esta que está diretamente associada à produção de energia das plantas de geração FV. Os modelos utilizados (são dois sensores) possuem classe de precisão *secondary standard*, com uma faixa de medição entre 0 a 4.000 W/m<sup>2</sup> e uma faixa espectral de 285 nm a 3000 nm. Além disso o equipamento possui um sistema de aquecimento que proporciona uma compensação de temperatura nas medições do sensor. A estação conta ainda com um sensor de radiação UV com objetivo de medir a radiação ultravioleta e permitir avaliação da degradação dos materiais expostos ao sol.

#### 5.0 - AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Uma comissão de planejamento e controle do consumo de energia elétrica, parte integrante do Sistema de Gestão da Energia (SGE) da UFPR, foi criada e está consolidando métricas de acompanhamento e consumo de energia que serão integrados com os indicadores obtidos dos medidores de energia e qualidade da energia. Desta forma, será possível obter a situação do consumo em tempo real e tomar as decisões, bem como definir políticas de estímulo ao consumo eficiente de energia junto à comunidade universitária.

Com a implantação da política de monitoramento e do consumo consciente, espera-se obter uma grande redução no consumo, tendo em vista que já foi identificado em uma unidade, um consumo significativo em horários improváveis para esse consumo, como entre a meia noite e às seis horas da manhã. O MEC, reportou em 2017 que o consumo de energia elétrica representava o terceiro maior gasto das instituições de ensino superior federais. Portanto, representa um valor significativo e merece ser estudado com critérios claros e aplicáveis em outras instituições. Nesse trabalho, está sendo incorporado o processo de identificação dos edifícios segundo o Procel Edifica e sistema de gestão energética – ISO 50.001.

(\*) Departamento de Eng. Elétrica, Centro Politécnico CP. 19011, UFPR. Curitiba/PR, 81531-980, (41)3361-3510. gustavo@eletrica.ufpr.br



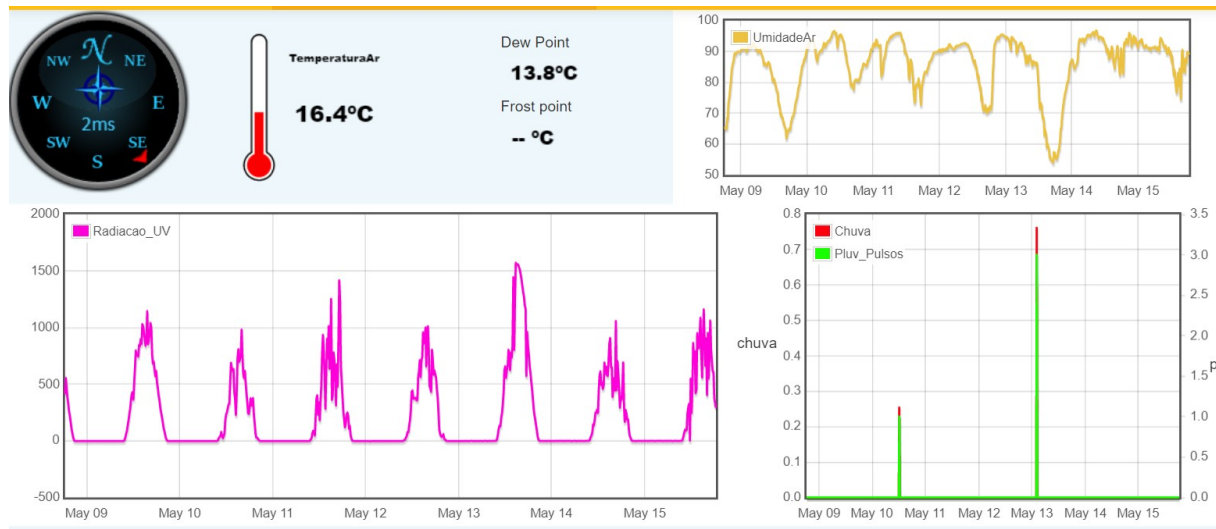


FIGURA 8 – Ilustração dos dados meteorológicos disponibilizados via estação da microrrede.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Neste artigo, as características da microrrede com geração distribuída voltada para pesquisas em monitoramento (elétrico e ambiental), controle e desempenho do sistema elétrico da UFPR foram apresentadas. O objetivo da microrrede é caracterizar um benchmark prático para pesquisas na área de conexão de GD com fontes renováveis na rede de média tensão e sub-transmissão da distribuidora.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (2) Khadkikar, V.; Kirtley, J. L. Interline Photovoltaic (I-Pv) Power System — A Novel Concept Of Power Flow Control And Management. IEEE Power And Energy Society General Meeting. 2011
- (3) Kouro, S. Et Al. Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview Of Recent Research And Emerging Pv Converter Technology. IEEE Industrial Electronics Magazine, V. 9, N. 1, P. 47–61, March 2015.
- (4) Liu, S.; Liu, P. X.; Wang, X. Stochastic Small-Signal Stability Analysis Of Grid-Connected Photovoltaic Systems. IEEE Transactions On Industrial Electronics, V. 63, N. 2, P. 1027–1038, Feb 2016
- (5) Moradi-Shahrbabak, Z.; Tabesh, A. Effects Of Front-End Converter And Dc-Link Of A Utility-Scale Pv Energy System On Dynamic Stability Of A Power System. IEEE Transactions On Industrial Electronics, V. 65, N. 1, P. 403–411, 2018.
- (6) Ningbo, W. The Key Technology Of The Control System Of Wind Farm And Photovoltaic Power Plant Cluster. International Conference On Power System Technology. 2014. P. 2833–2839.
- (7) Romero-Cadaval, E. Et Al. Grid-Connected Photovoltaic Plants: An Alternative Energy Source, Replacing Conventional Sources. IEEE Industrial Electronics Magazine, V. 9, N. 1, P. 18–32, March 2015.
- (8) Shayanfar, H. A.; Malek, S. Photovoltaic Microgrids Control By The Cooperative Control Of Multi-Agent Systems. 30th International Power System Conference (Psc). 2015. P. 287–293.
- (9) Varma, R. K.; Salehi, R. Ssr Mitigation With A New Control Of Pv Solar Farm As Statcom (Pv-Statcom). IEEE Transactions On Sustainable Energy, V. 8, N. 4, P. 1473–1483, Oct 2017.
- (10) Zhang, X.; Yang, L.; Zhu, X. Integrated Control Of Photovoltaic-Energy Storage System For Power Oscillation Damping Enhancement. IEEE 8th International Power Electronics And Motion Control Conference (Ipemc-Ecce Asia). 2016.
- (11) Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2019. Independent Statistics & Analysis. U.S. Energy Information Administration. Feb, 2019
- (12) Ran Fu, Timothy Remo, and Robert Margolis. 2018 U.S. Utility-Scale PhotovoltaicsPlus-Energy Storage System Costs Benchmark. Technical Report NREL/TP-6A20-71714 November 2018
- (13) EPRI Technical Report. Program on Technology Innovation: Microgrid Implementations: Literature Review, 2016
- (12) F.H.M. Rafi, M. J. Houssain, D. Leskarac, J. Lu. Reactive Power Management Of A Ac/Dc Microgrid System Using A Smart Pv Inverter. Power & Energy Society General Meeting, 2015.
- (14) Grid Protection Alliance, Openpdc Software, <https://Github.Com/Gridprotectionalliance/Openpdc>, 2018.
- (15) Openenergymonitor Project, Emoncms, <https://Github.Com/Emoncms/Emoncms>, 2018.
- (16) A. Von Meier, E. Stewart, A. Mceachern, M. Andersen And L. Mehrmanesh, Precision Micro-Synchrophasors For Distribution Systems: A Summary Of Applications. IEEE Transactions On Smart Grid, Vol. 8, No. 6, Pp. 2926-2936, Nov. 2017.

## 8.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro do Projeto PD - 2866-0470/2017, projeto este regulamentado pela ANEEL e desenvolvido no âmbito do programa de P&D da COPEL Distribuição.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Gustavo Henrique da Costa Oliveira** graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 1988, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 1992, Doutor em Engenharia pela Universidade de Nice Sophia-Antipolis, França, e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 1997. Atualmente, é Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Suas atividades de pesquisa incluem: identificação de sistemas, sistemas de controle em malha fechada, modelagem caixa-preta de equipamentos de alta-tensão, controle de carga/frequência na geração de energia elétrica, monitoramento de sistemas elétricos a pequenas perturbações.

**Roman Kuiava** possui Graduação em Engenharia Elétrica (2005) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Mestrado, Doutorado e Pós-doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP (obtidos em 2007, 2010 e 2011, respectivamente). Atualmente é Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná. Os seus trabalhos de pesquisa estão direcionados principalmente na área de estabilidade a grandes e pequenas perturbações em sistemas de geração e transmissão de energia elétrica e em redes de distribuição com geração distribuída.

**Gideon Villar Leandro** graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1989), Ilha Solteira, mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1992), Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2000). Atualmente, é Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Suas atividades de pesquisa incluem: identificação de sistemas, sistemas de controle, metaheurísticas e sistemas a eventos discretos.

**João Américo Vilela Jr** é graduado e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2000/2003) e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2007). É professor adjunto da Universidade Federal do Paraná desde 2011 e coordenador do Grupo de Pesquisa de Eletrônica de Potência e Eletromagnetismo (GEPEL) na UFPR. Participa do grupo temático CYTED / MEIHAPER (Microrredes elétricas inteligentes híbridas com alta penetração de energias renováveis). Tem atuado na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência e Máquinas Elétricas.

**Rogers Demonti** é engenheiro eletricitista (1996), mestre (1999) e doutor em Engenharia Elétrica (2003) pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná. Suas áreas de interesse são: conversores para módulos fotovoltaicos, conversores estáticos de energia, medição de energia e sistemas para carga e descarga de baterias para veículos elétricos.

**Eduardo Parente Ribeiro** é graduado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1990), obteve grau de mestre (1992) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Puc-Rio. Realizou pós-doutorado na University of British Columbia no Canadá (2006). Atualmente, é Professor Titular no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Tem atuado em diversas áreas da Engenharia Elétrica, com ênfase em Processamento Digital de Sinais, Instrumentação e Sistemas de Comunicação.

**André Pedretti**, nascido em 25/08/1981, em Juiz de Fora/MG, Engenheiro Eletricista (UFJF-2004). Atualmente Analista Técnico Sênior na Copel Distribuição S.A., atuando como gerente de projetos de prospecção e internalização tecnológica. Tendo experiência nas áreas de: análise de desempenho do sistema; planejamento de expansão da média tensão; manutenção de redes; manutenção de automação, controle e proteção de subestações; manutenção de subestações e linhas de sub-transmissão; engenharia de automação, controle e

(\*) Departamento de Eng. Elétrica, Centro Politécnico CP. 19011, UFPR. Curitiba/PR, 81531-980, (41)3361-3510. [gustavo@eletrica.ufpr.br](mailto:gustavo@eletrica.ufpr.br)

proteção; engenharia de subestações e linhas de sub-transmissão; utilização de energia e eficiência energética; e gestão de portfólio de pesquisa e desenvolvimento tecnológicos.