

Componentes e Modos de Operação do Laboratório de Testes de uma Microrrede Autônoma Experimental

Mateus Lustosa Martins, Jose Nilo Rodrigues Silva Junior, Saulo Martins Campos e Marcos Aurélio I. Martins

Resumo – O presente artigo tem por objetivo principal descrever o Laboratório de Testes do projeto piloto de P&D Microrrede Inteligente, bem como suas tecnologias e modos de operação. O Laboratório de Testes, ou Showroom Microrrede Inteligente, possui as soluções de domótica e de geração distribuída presentes no projeto, além de simular os modos de operação da microrrede experimental. A microrrede em questão é um sistema em desenvolvimento pela Enel Distribuição Ceará, e que tem como principal característica o desenvolvimento de uma rede independente para a manutenção do fornecimento de energia elétrica a clientes residenciais em casos de falhas na rede de distribuição principal. O Laboratório de Testes da microrrede autônoma é aqui apresentado em seus aspectos relacionados a seus componentes e modos de operação.

Palavras-chave – O Automação Residencial, Geração Distribuída, Laboratório de Testes, Microrrede Autônoma, Modos de Operação.

I. INTRODUÇÃO

Na primeira metade do século XX a eletricidade se tornou a principal fonte de luz, calor e força utilizada no mundo moderno. Desde então, seu uso passou a ser intrínseco à sociedade, de modo que a grande dependência dessa fonte de energia impulsiona diversos avanços tecnológicos do setor elétrico.

Nos dias atuais, as empresas de geração e distribuição de energia elétrica esforçam-se para manter a qualidade em seus processos de fornecimento de energia, entretanto, apesar do trabalho interno para prever e corrigir possíveis falhas, as adversidades podem acontecer, causando prejuízos econômicos à distribuidoras e clientes. As perdas econômicas resultantes destas adversidades, fazem com que muitas empresas do setor elétrico trabalhem em prol do desenvolvimento de sistemas de amparo, que funcionem em paralelo

a rede de distribuição principal, e que possam suprir as demandas energéticas dos consumidores em casos de quedas do sistema primário.

É neste cenário que surgem as microrredes, as quais se apresentam como alternativas aos atuais modelos de geração e distribuição de energia elétrica. As microrredes são sistemas de geração, armazenamento e distribuição de energia elétrica, desenvolvidos para atender as mais diversas demandas da sociedade [1]. Estes sistemas podem ser utilizados para suprir cargas residenciais, industriais, hospitalares e prediais. Alguns modelos de microrrede também podem ser utilizados no fornecimento de energia para ilhas, e até para pequenas cidades.

O projeto de microrrede autônoma experimental em que este trabalho se baseia, traz inovação ao setor elétrico ao desenvolver um modelo de microrrede utilizando fontes renováveis de geração, com sistemas de acumulação e de gerenciamento energético independentes, para suprir as necessidades energéticas de unidades consumidoras em casos de falha da rede de distribuição principal.

O sistema piloto de microrrede autônoma descrito neste artigo, está sendo implantado em um condomínio cearense, e visa suprir as demandas energéticas de dez unidades consumidoras residenciais e cargas de uso comum. A microrrede atuará também no suprimento de energia às cargas do clube recreativo, de segurança, da portaria e da iluminação das vias internas. O condomínio utilizado para receber a microrrede, possui mais de 300 unidades consumidoras, divididas entre clientes grupos A e B [2]. As dez unidades escolhidas dentre o conjunto de consumidores do local, foram selecionadas de acordo com alguns critérios: consumo médio mensal a partir de 780 kWh/mês, baixa sazonalidade anual do consumo e a alta dispersão geográfica.

Estas dez unidades contam com soluções de gestão de demanda únicas, fazendo com que seus residentes tenham autonomia sobre o controle da energia de suas casas, podendo definir quais cargas são essenciais ou não, ou seja, definir quais cargas tem prioridade no fornecimento em eventos de contingência. O projeto piloto conta com sistemas de geração distribuída, de acumulação de energia e de automação, além de um software de controle central, desenvolvido unicamente para o projeto piloto. Este software, ainda em fase de desenvolvimento, monitorará praticamente todos os recursos da microrrede, além de controlar todo o evento de ilhamento e recomposição da rede principal.

Este trabalho está sendo desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (IX CITENEL), realizado na cidade de João Pessoa/PB, no período de 2 a 4 de agosto de 2017.

M. L. Martins e J. N. R. Silva Jr. trabalham na área de Pesquisa e Desenvolvimento da Enel Distribuição Ceará (e-mails: mateus.martins@enel.com, nilo.rodrigues@enel.com).

S. M. Campos trabalha na Enel Soluções (e-mails: saulo.campos@enel.com).

M. A. I. Martins trabalha na Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras – CERTI (e-mail: mlz@certi.org.br).

A microrrede piloto foi projetada para atuar em três modos operacionais distintos: modo conectado, modo ilhado e modo de manutenção. No modo conectado, a microrrede operará em paralelo à rede principal de distribuição, podendo haver intercâmbio de energia entre ambas. No modo ilhado, por sua vez, o sistema trabalhará de forma autônoma, desconectado do sistema de distribuição principal e conectando-se as fontes de energia da própria microrrede. Já no modo de manutenção, a microrrede não realiza tarefas de controle, estando desconectado da rede elétrica. Este modo atuará na ocorrência de falhas no ilhamento da microrrede, ou quando houver necessidade de manutenção na rede da distribuidora, ou no próprio sistema piloto.

O sistema de geração distribuída da microrrede autônoma utilizará fontes renováveis de energia, somando quase 54 kW de potência instalada. O parque de geração renovável conta com sistemas eólico e fotovoltaicos, dispersos entre as dez unidades residenciais e áreas comuns do condomínio.

Os sistemas de acumulação, por sua vez, são subdivididos em central e local. O sistema de armazenamento central é composto por um banco de baterias de Li-íon, dispondo de 111kWh de capacidade de armazenamento e 250 kW de potência de despacho. Por sua vez, os sistemas locais dispõem de armazenamento através de baterias do tipo chumbo-ácido, com capacidade de 220Ah, estando instaladas em cinco das dez residências já descritas.

Para o controle da microrrede, o software central coordena os dispositivos autônomos nas operações de ilhamento e reconexão com a rede principal de distribuição, além de controlar o fluxo de energia que será fornecido pelo sistema de acumulação central. Para a interface da microrrede com a rede de distribuição primária, será utilizado, como protótipo, um conversor *back-to-back*, que permite a conexão entre redes de distribuição de energia, controlando o fluxo de carga, e otimizando o controle de tensão [3].

A inteligência da microrrede piloto reflete-se na autonomia de coordenação entre os diversos dispositivos do sistema, permitindo o ilhamento e a reconexão de rede. A inovação do projeto se encontra em como as estratégias de controle são realizadas e implantadas no sistema, integrando diferentes geradores, baseados em fontes de energia renováveis, e acumuladores, distribuídos em uma arquitetura de processos centralizados e descentralizados. O projeto, portanto, se foca na inteligência da microrrede, visando a implementação de um sistema eficiente, confiável e econômico, que possa se caracterizar como uma solução atrativa para o setor elétrico.

Dada a complexidade da microrrede piloto, fez-se necessário o desenvolvimento de um laboratório de testes que servisse como campo de prova para as tecnologias inovadoras instaladas no sistema, bem como para os seus modos de operação. Dessa maneira, o laboratório de testes, denominado Showroom Microrrede Inteligente, foi projetado para simular uma das dez unidades consumidoras residenciais atendidas prioritariamente pelo projeto piloto, possuindo os dispositivos de automação residencial, de geração distribuída e de acumulação de energia presentes na microrrede.

O objetivo do presente artigo é apresentar o laboratório de testes do projeto piloto, bem como caracterizar seus compo-

nentes, modos de operação e correlação com o sistema da microrrede autônoma.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: Na seção II é apresentada uma descrição geral sobre o laboratório de testes. Os componentes, os modos de operação, as simulações de visitas, bem como a análise dos sistemas implementados e do viés pós-projeto são descritos na seção III. Por fim, a seção IV apresenta as principais conclusões do trabalho.

O projeto piloto, de título “Desenvolvimento de Aplicação Piloto de Microrrede de Distribuição de Energia com Geração Distribuída e Modelo de Operação Comercial” e código ANEEL PD-00039-0073/2014, está em execução pela Enel Distribuição Ceará.

II. DESCRIÇÃO GERAL DO LABORATÓRIO DE TESTES

O laboratório de testes, que está localizado na sede da Enel Distribuição Ceará, é utilizado como campo de testes para as diversas tecnologias presentes no projeto piloto, além de servir como um ambiente didático para apresentação da microrrede autônoma a pesquisadores, universidades, empresas de tecnologia e público geral.

O laboratório, apresentado na Figura 1, possui cerca de 100 m² de área, sendo 50 m² de área construída. O design externo foi projetado para assemelhar-se a uma residência, com uma rampa para acessibilidade na entrada.

Em conformidade com as práticas ambientais que devem ser assumidas por toda a sociedade, e seguindo as diretrizes de sustentabilidade do grupo Enel, a estrutura civil do *showroom* foi fabricada com materiais a base de polipropileno reciclado (PP), um material sustentável e que não gera resíduos poluentes em suas fases de produção e reciclagem. As portas e janelas do laboratório são em vidro, pois o material propicia um melhor isolamento térmico e acústico ao local, além de permitir a entrada da luz natural. O piso externo é composto por placas drenantes de concreto, que absorvem a água da chuva e a transportam ao solo, preservando o solo e contribuindo para a regulação térmica natural do local. Por sua vez, a instalação elétrica do laboratório foi feita a partir de uma conexão trifásica, advinda do quadro de distribuição do prédio administrativo central, na sede da Enel Distribuição Ceará. O quadro possui uma alimentação de 380 V, utilizando um disjuntor de proteção de 32 A. A parte externa é composta de jardim paisagístico, estacionamento de veículos e bicicletário. A parte interna do laboratório, é dividida em salão central e sala de equipamentos. No salão central, encontram-se o painel de simulação, um totem de controle e o cenário residencial, para simulação do uso das cargas. Na sala de equipamentos, por sua vez, encontram-se os dispositivos de controle do laboratório. Todos os equipamentos instalados internamente serão discutidos na próxima seção.

O laboratório possui os sistemas de geração distribuída e acumulação de energia presentes na microrrede piloto, porém em menor escala. Os sistemas de geração renovável possuem uma capacidade geradora total de 7kW, divididos em dois sistemas fotovoltaicos de 2kWp e 1,5kWp e um sistema eólico de 3,5kW.

Por sua vez, os sistemas de armazenamento de energia são divididos em dois tipos, ambos com baterias do tipo chumbo-ácido porém com sistemas de controle diferentes. A diferença básica entre os dois sistemas, é que o sistema de UPS (*Uninterruptible Power Supply*) não possui reversibilidade no fluxo de potência, e portanto não é possível conectar geração distribuída no lado da carga instalada.



Figura 1. Vista frontal do Laboratório de Testes.

III. COMPONENTES E MODOS DE OPERAÇÃO DO LABORATÓRIO DE TESTES.

A. Sistema de Geração Distribuída

O laboratório de testes do projeto conta com dois sistemas fotovoltaicos e um sistema eólico, de modo semelhante ao parque de geração renovável da microrrede. Um dos sistemas fotovoltaicos tem potência instalada de 2kWp e está instalado na parte superior do bicicletário, a estrutura metálica ao lado esquerdo do laboratório. O outro sistema, possui 1,5kWp de potência, e está instalado sob o teto do showroom.

Antes da implementação dos sistemas, foi realizada a simulação da geração de energia solar no local, utilizando o *software PVSyst*, que leva em consideração em seu modelo matemático as perdas do sistema devido à inclinação dos módulos fotovoltaicos, bem como sua orientação espacial, sombreamento, temperatura e resistência dos condutores.

Em (1) é possível ver o modelo matemático utilizado no *PVSyst*, onde: G é a geração mensal de energia, medida em kWh; P_i é a potência instalada, medida em kWp; I_{pm} é a irradiação por mês, medida em kWh/kWp/mês; N_i e P_s são a eficiência do inversor e as perdas do sistema, respectivamente, medidas em porcentagem.

$$G = \frac{(P_i \times I_{pm} \times N_i)}{(1 + P_s)} \quad (1)$$

De acordo com a simulação realizada para o sistema de geração fotovoltaico, a geração anual de energia no local é de 67,664 kWh/ano, e a geração de energia média mensal é de 5,6 kWh/mês.

Para o sistema de 1,5 kWp foram utilizados seis módulos fotovoltaicos, de modelo *JKM260P-60B*, configurados em

série e conectados a seu respectivos inversores de frequência. A Figura 2 ilustra o inversor *Fronius Galvo 2.0-1*, utilizado no sistema [4].



Figura 2 – Inversor fotovoltaico Fronius Galvo 2.0 do sistema fotovoltaico de potência 1,5kWp.

O sistema fotovoltaico de 2kWp por sua vez, utiliza módulos monocristalinos, de modelo *YL270C-30b*, e inversores modelo *Sunny Boy SB2100TL* [5] e modelo *Sunny Island 3.0M* [6]. Os inversores do sistema estão ilustrados na Figura 3.

O modelo *Sunny Boy SB2100-TL* é um inversor fotovoltaico que converte a corrente contínua do gerador fotovoltaico em corrente alternada, e a fornece à rede elétrica. Por sua vez, o *Sunny Island 3.0M* é um inversor bidirecional para sistemas isolados. O inversor alimenta os consumidores da rede isolada ou recarrega o banco de baterias local. A Figura 4 apresenta o diagrama unifilar do sistema fotovoltaico de 2kWp, juntamente com o sistema de armazenamento de chumbo-ácido do laboratório.



Figura 3 – Inversores Sunny Boy SB2100-TL (vermelho) e Sunny Island 3.0M (amarelo) do sistema fotovoltaicos de potência 2kWp.

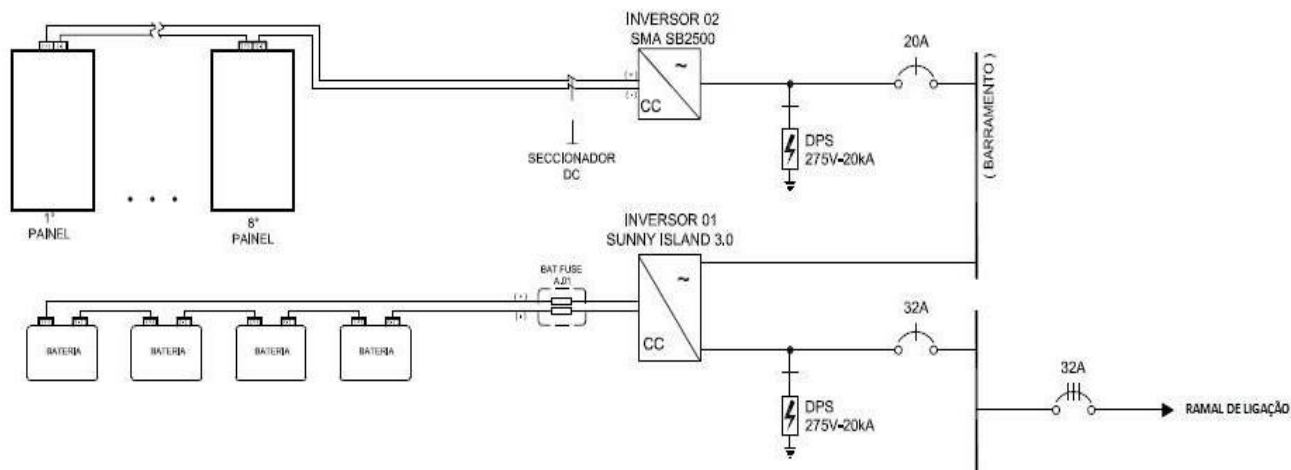


Figura 4 – Diagrama unifilar de ligação do sistema fotovoltaico de 2 kWp e do sistema de armazenamento em chumbo-ácido.

O sistema de geração eólica do laboratório, por sua vez, é composto por um aerogerador, uma resistência, um regulador eólico e um inversor de corrente. O aerogerador, de modelo *Enair 3.5*, está instalado na parte externa, à direita do laboratório. Este local foi escolhido por apresentar vantagens quanto a facilidade de instalação e por ser o local com melhor potencial de vento nas proximidades.

O aerogerador possui hélices em fibra de vidro com resina epóxi e é um modelo trifásico com uma ponte de retificação conectada a um inversor de frequência monofásico. A Figura 5 ilustra parte do sistema eólico do laboratório de testes. A resistência serve como carga artificial ou complementar, no caso de haver uma geração excessiva

O regulador eólico, por sua vez, possui a função de controlar a velocidade do aerogerador em caso de velocidade elevada do vento, o que resulta em uma velocidade excessiva do eixo do aerogerador, este regulador, portanto, tem a função de frear as pás. Outra função integrada a este dispositivo, é a de ponte retificadora trifásica, que transforma a geração trifásica em monofásica, desta forma, a saída disponível do sistema é em tensão monofásica de 220 V, 60 Hz. Além disso, o regulador eólico faz com que o gerador possa gerar energia a qualquer velocidade, desde que dentro da faixa de operação.

O inversor de corrente é responsável pela transformação da corrente CC (corrente contínua) em CA (corrente alternada), além de realizar o sincronismo do sistema com a rede de distribuição. O inversor também possui a função de proteção contra sobretensão. O modelo de inversor utilizado no sistema é o *Sunny Tripower 5000 TL* [7]. Previamente a implementação do sistema de geração eólico, foi realizado o cálculo de demanda para a instalação, com a potência média necessária para suprir a demanda das cargas instaladas. Após a realização dos cálculos, baseados no fator de carga médio e na energia consumida pelo local, chegou-se ao resultado de que o aerogerador suprirá cerca de 56,74% da energia demandada pelo showroom.

A ampla utilização de tecnologias de geração distribuída (GD) no sistema de geração da microrrede autônoma, e do laboratório de testes detalhados neste artigo, teve motivação nos avanços deste setor em todo o mundo e também no con-

ceito de sistemas de microrredes, que se baseiam em armazenamento, geração distribuída e demanda energética.



Figura 5 – Inversor Sunny Tripower 5000 TL (1), resistência de dissipação (2), regulador eólico MWPTech Enair (3) e chaveamento de freio (4).

As tecnologias de geração do setor de energias renováveis têm potencial de modificar toda a sociedade, devido, principalmente, ao objetivo de reduzir a poluição, e melhorar a qualidade de vida das pessoas e de trazer retornos econômicos as partes envolvidas. Um relatório produzido pela *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia) ressaltou que o uso global de energia renovável aumentou 5% em 2015, atingindo 8,1 milhões de pessoas. Mesmo com a desaceleração das vagas de emprego no setor energético em todo o mundo, o setor de energias renováveis continuou a crescer, em contraste com os mercados de trabalho deprimidos no setor energético mais amplo. Atualmente os países que mais abriram postos de trabalho para esse tipo de energia foram a China, Brasil, Estados Unidos, Índia, Japão e Alemanha [8].

Fontes como as biomassas, eólica e solar foram as que mais contribuíram para este crescimento, porém, de acordo com o relatório da agência, a energia fotovoltaica foi a que mais se destacou, criando cerca de 2,8 milhões de empregos

em todo o mundo, sendo assim um aumento de 11% em relação a 2014.

No Brasil, desde a regulamentação da Resolução N° 482 da ANEEL, em 2012, a qual estabeleceu o sistema de compensação de energia, o mercado de GD vem crescendo exponencialmente. Atualmente, os sistemas residenciais são os principais protagonistas no cenário brasileiro de GD, correspondendo a 79% do total. O setor comercial fica com 16% dos sistemas enquanto os outros 5% se dividem entre uso rural, industrial, poder público e outras unidades consumidoras. Por definição, no sistema de compensação brasileiro a energia gerada tem o mesmo valor da consumida. Desta forma, o retorno financeiro é melhor para aqueles que pagam tarifas mais elevadas, como os consumidores residenciais e comerciais de baixa tensão, porém essa viabilidade depende de outros fatores como o preço do kWp instalado, e do desempenho da geração de energia

As sociedades estão mudando e as energias renováveis são a pedra angular para que ocorram transformações positivas no meio ambiente. Nesse sentido, a utilização deste tipo de tecnologia de geração está de acordo com as políticas internacionais de conservação do meio ambiente, além de acompanhar o crescimento econômico de produtos advindos do setor de geração de energia.

A aplicação deste tipo de tecnologia em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), muitas vezes não tem por objetivo o retorno financeiro empregado, sendo comum o acoplamento desses sistemas em outras microrredes, já implementadas pelo mundo, como crédito a fundo perdido. Outro fator importante de ser ressaltado para o uso dessa tecnologia, é que é benéfico aos sistemas de grande demanda energética o uso de geração de energia próximo a carga que irá consumi-la, de modo a reduzir os custos, as perdas e outros problemas com distribuição. Sendo interessante ressaltar, que o desenvolvimento de produtos inovadores, baseados em geração renovável, e que atendam a uma ampla gama de usuários, se torna atrativo a investidores.

B. Sistema de Armazenamento de Energia

O laboratório de testes possui dois sistemas de acumulação de energia instalados. Ambos utilizam baterias do tipo chumbo ácido, porém um deles, utiliza um modelo de fonte de alimentação ininterrupta.

A corrente contínua que sai dos módulos fotovoltaicos do sistema de 2kWp, é enviada a um inversor CC-CA para que possa ser injetada no barramento de carga do laboratório. Esta corrente, agora alternada, é enviada também a um conversor CA-CC, para que possa ser injetada nos acumuladores do tipo chumbo ácido. O modelo de bateria utilizado é o *Clean Nano 220Ah – 12V – 12MF220*, que possui uma autonomia de 220 Ah.

O sistema fotovoltaico de 1,5kWp, por sua vez, possui um moderno sistema de armazenamento baseado em UPS. A UPS é uma fonte de alimentação ininterrupta, sendo considerado um sistema de alimentação secundário, que tem como objetivo fornecer energia estabilizada às cargas específicas quando há interrupção na rede primária.

A UPS possibilita o fornecimento instantâneo de energia quando ocorre um corte na rede. O dispositivo é alimentado por uma bateria, que se mantém ligada ao sistema de geração fotovoltaico. Além de fornecer energia em caso de interrupção, alguns modelos de UPS podem corrigir problemas de rede, como variações de tensão e instabilidade de frequência, ou distorção harmônica. É possível definir dois modelos de fontes de alimentação ininterruptas: o modelo *on-grid* e o modelo *off-grid*.

No modelo *on-grid*, ocorre a dupla conversão de energia, em que no primeiro estágio é feita a conversão da corrente CA em CC, e no segundo estágio, o inversor converte a corrente CC em CA, para a saída. Desta forma, a carga final possui amplitude, forma e frequência diferentes do sinal da entrada.

No modelo *off-grid*, o inversor fica ligado constantemente, e em casos de falhas na rede principal de distribuição, o circuito de monitoramento usa a energia do inversor para manter o fornecimento, garantindo uma alimentação estável. O modelo de UPS *off-grid* utilizado no laboratório é o UPS *SunBR-V4-3000VA*, ilustrado na Figura 6, e que fornece continuamente energia às cargas. Nesse sistema, o retificador converte a alimentação da fonte de entrada CA para CC, e fornece para o inversor, além de carregar a bateria de *backup* associada. A Tabela I apresenta os dados da UPS instalada no laboratório de testes [9].



Figura 6 – UPS de modelo SunBR V4-3000VA utilizado no laboratório de testes.

O inversor é o responsável por gerar a tensão CA para a carga, livre dos distúrbios e problemas existentes na rede de distribuição. Em caso de falha da rede de alimentação, o inversor passa a operar com a energia CC da bateria, e continua o fornecimento de energia CA para a carga, não havendo interrupção de energia durante a transição para este modo de operação. Após a restauração da rede de alimentação, a UPS retornará ao modo normal de operação automaticamente, sem necessidade de intervenção humana. Se a capacidade de sobrecarga do inversor é ultrapassada, ou se o inversor se tornar indisponível por qualquer motivo, a chave estática de transferência irá atuar, realizando uma transfe-

rência da carga alimentada pelo inversor para a fonte de *by-pass*, sem interrupção. O modelo utilizado possui um modo de *by-pass* manual, que está disponível para assegurar a continuidade do fornecimento de energia para a carga quando a UPS se torna indisponível, por exemplo, durante um procedimento de manutenção.

Tabela I. Dados da UPS instalada no laboratório de testes.

Dados	Valor
Modelo	<i>SunBR V4</i>
Tolerância na Tensão de Entrada	300 VAC / 160 VAC
Tolerância de Frequência	40 ~70 Hz
Fator de Potência	0.99 da voltagem normal
Tensão de Saída	208 ~240 VAC
Distorção Harmônica	2% carga linear
Tempo de Transferência	AC para DC: Zero Inverter para <i>By-pass</i> : 4 ms
Onda	Senóide pura
Sistema de proteção	Proteção contra fluxo reverso
By-pass	<i>By-pass</i> interno e controlável
Ligação	220 V FNT

C. Sistemas de Gestão de Demanda

Os dispositivos de gestão de demanda têm como principal objetivo monitorar e controlar o uso das cargas, além de armazenar os dados de parâmetros da energia elétrica, tais como potência ativa, potência reativa, fator de potência e valores efetivos, e de pico, das tensões e das correntes de circuitos, afim de reduzir o desperdício e os custos de consumo. Estes procedimentos permitem ao usuário adotar medidas de contenção e prevenção, para verificar eventos e, conseqüentemente, prevenir custos adicionais de consumo de energia elétrica, além de incentivar o seu uso consciente.

O laboratório possui quatro dispositivos de gestão de demanda instalados: o *Smart Quadro*, o Quadro Geral de Força e Dados, o medidor *Cronos 6021-A* com *Smart Base* e o sistema de automação residencial *WTI Home*. Os dispositivos presentes no laboratório são semelhantes aos instalados na microrrede piloto, com exceção do sistema *WTI Home*, que é exclusividade do laboratório.

O *Smart Quadro*, ou *SmartQ*, é um quadro elétrico inovador, que mantém as mesmas características de proteção e dimensionamento de um quadro elétrico convencional, porém é capaz de coletar informações elétricas de cada circuito instalado, além de permitir o acionamento remoto ou programado dos mesmos, garantindo o acompanhamento e controle do consumo elétrico das unidades. As funcionalidades do dispositivo são realizadas por meio de um firmware embarcado na CPU interna do quadro elétrico. A interface de uso permite que o usuário opere de maneira simplificada, utilizando computadores ou dispositivos móveis. A interface de visualização do produto, permite a configuração dos parâmetros de conexão, a visualização das informações de energia, o controle de corte e de religamento instantâneos de circuitos, além da programação para controle automático dos mesmos. O acesso a interface do dispositivo se dá por meio de comunicação WI-FI, via protocolo *Ethernet*.

O Quadro Geral de Força e Dados, ou Controlador Local,

é o principal agente de interface local da unidade participante da microrrede, pois é através dele que é feito a aquisição dos dados de geração e consumo, bem como o *report* dos *status* atuais dos equipamentos locais. A Figura 7 apresenta o Controlador Local, aqui descrito.



Figura 7 – Quadro Geral de Força e Dados instalado no Laboratório de Testes

O Controlador Local, também chamado de QGFD, possui dispositivos internos que são responsáveis desde as funções mais básicas de medição, até as mais complexas, como a computação dos dados para atuar na gerência de energia local. Foi desenvolvido um protótipo de aplicação para o laboratório, uma vez que os aplicativos móveis do projeto piloto ainda estão em desenvolvimento. Nessa aplicação são apresentados os dados de geração fotovoltaica e eólica, bem como os dados de consumo. Além disso, a aplicação é capaz de fornecer um balanço energético do showroom, conforme Figura 8. Uma outra funcionalidade é o controle dos circuitos prioritários.



Figura 8. Balanço energético do laboratório de testes por meio de aplicação WEB.

O sistema *WTI Home* é constituído por um conjunto de dispositivos de automação residencial, que possuem funcionalidades de controle de equipamentos através de sensores e atuadores conectados. Através de um *gateway*, chamado de

HomeCenter, que interliga os nós da aplicação, permitindo que todas as funcionalidades sejam acessadas de smartphones, tablets e notebooks. A solução promove também a interação com diversos tipos de sensores, proporcionando a sua integração com equipamentos de multimídia, climatização e iluminação. Esta última funcionalidade está bastante presente nas simulações de domótica feitas no laboratório, sendo discutidas na próxima subseção.

O medidor *Cronos 6021-A*, de fabricação da empresa *Eletra Energy Solutions*, foi instalado no laboratório junto a *SmartBase*, um dispositivo de controle e comunicação desenvolvido especialmente para o projeto piloto. O modelo de medidor, já comercializado pelo fornecedor, possui diversas vantagens, como a confiabilidade da medição, os dispositivos antifraude e os medidores com display LCD, que permanecem acesos durante a falta de energia. A *SmartBase* tem função de comunicação remota através do protocolo *Zigbee*, com o estabelecimento de uma rede *RF Mesh*. Porém, para a aplicação do laboratório, essa funcionalidade não é utilizada. A principal inovação desenvolvida foi a implementação de um relé de corte com acionamento do medidor desenergizado, para que em uma eventual falta de energia, o relé ainda possa atuar. A abertura do relé é executada automaticamente pela *SmartBase*, após a detecção de uma falta de energia de pelo menos 2 segundos. O fechamento do relé é executado após o envio de um comando via software, responsável pelo gerenciamento do medidor. Toda a rede de comunicação *RF Mesh* permanece configurada, mesmo na falta de energia, e é capaz de transmitir os comandos imediatamente após o retorno da energia.

D. Sistema de Simulação e Visitas

Em comunhão com os objetivos descritos anteriormente, foram implementados sistemas de simulação das tecnologias no laboratório de testes, de modo a expor o projeto piloto a pesquisadores, universidades, empresas e público geral.

Deste modo, foi implementado um painel de simulação exemplificando de forma lúdica todo o funcionamento da microrrede. O painel de simulação foi produzido para demonstrar os modos de operação da microrrede piloto. O painel, produzido em acrílico, fitas LED e controlado por uma plataforma em arduíno [10], possui uma interface interativa, que ilustra, ao visitante, o passo-a-passo na operação dos dispositivos de iluminação e reconexão, bem como o uso dos sistemas de geração renovável, e de acumulação central e local presentes no projeto piloto.

Nessa experiência, está previsto que o visitante, inicialmente, se dirija ao totem de controle, onde está instalado um computador com monitor *touchscreen*, ligado ao painel de simulação, e que comanda uma apresentação interativa mostrada no monitor. Nesta apresentação estão descritos, com detalhamento técnico, os componentes da microrrede e os modos de operação do projeto, e cada etapa da apresentação corresponde a um modo no painel de LED. A apresentação contempla as informações de geração de energia e de demanda energética obtidas dos dispositivos inteligentes, e organizados em gráficos através de uma aplicação WEB.

O uso de dispositivos móveis está previsto para essa etapa da visita, para que o participante possa testar as aplicações de domótica, geração e controle de energia do local.

Pensando em aplicar a visita de maneira mais lúdica, foi projetado um cenário que remetesse o interior de uma residência, para que o visitante tenha um entendimento melhor de como são as aplicações de automação e gestão de demanda em uma casa convencional. O visitante pode alterar, por intermédio dos aplicativos móveis presentes, a iluminação interna, além de conseguir ligar e desligar circuitos e programar a climatização do ambiente, tendo acesso aos dados de consumo de cada aparelho instalado. Após esta etapa da visita, é sugerido ao participante conhecer a sala de equipamentos do laboratório, onde estão instalados todos os dispositivos de controle de geração, e gestão de demanda do local.



Figura 9 – Sala central do Laboratório de Testes

O showroom tem recebido visitas com colaboradores internos da empresa e de empresas parceiras, bem como universidades e centros de pesquisa. Estas visitas têm por objetivo expor o projeto Microrrede Inteligente ao público externo, e estreitar laços com a comunidade acadêmica. A Figura 10 ilustra uma destas visitas, realizadas com discentes e docentes do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, o IFCE.



Figura 10 – Visita de turmas de docentes e discentes do IFCE ao Laboratório de Testes.

E. Laboratório de Testes e Microrrede Autônoma

A implementação de tecnologias inovadoras na microrrede de piloto, gera também a necessidade de resolver problemas práticos pouco vistos na literatura.

Devido a agregação de produtos únicos de domótica, geração distribuída e acumulação e controle de energia, podem surgir adversidades operacionais no entrosamento destes sistemas.

A título de exemplo, é possível citar uma das dificuldades técnicas encontradas após a implementação do sistema de geração eólica do laboratório. O inversor utilizado no sistema teve falhas em seu funcionamento, e não estava invertendo a energia CC em CA-60Hz, não completando o sincronismo com a rede. Um fato que vale ser ressaltado, é que, devido a este mal funcionamento, outras aplicações agregadas foram indiretamente afetadas como, por exemplo, a aplicação de gerenciamento da geração, que apresentou dados de valores irrelevantes nos gráficos.

Em outro caso, a aplicação WEB do sistema de gestão de demanda *SmartQuadro*, que está presente em todas as dez residências prioritárias do projeto piloto, não estava se comunicando com os dispositivos. Com isso, a aplicação de corte e religamento de circuitos ficou comprometida, não conseguindo realizar o corte remoto de cargas e nem atualizar os gráficos de geração e consumo. Este empecilho foi erradicado com a adição de um cabo ethernet, para uso em momentos de falta da rede WI-FI.

Um outro problema identificado foi devido a entrada de água da chuva no armário do banco de baterias do showroom, que fica em ambiente externo. Tendo em vista que as baterias estão ligadas a equipamentos elétricos, e que possuem ácido em sua composição, esse problema foi resolvido rapidamente com uma vedação mais adequada, para resistir em ambientes externos

Fica bastante visível, a partir do relato destes acontecimentos, a importância do laboratório de testes à microrrede autônoma, uma vez que os equipamentos testados serão instalados em residências de clientes da distribuidora.

F. Análise Pós-Projeto

Esta subseção trata da utilização futura do laboratório de testes em um período pós-projeto.

Visando manter o foco de P&D do laboratório de testes, e também, justificar o investimento para a criação do local, o ambiente servirá de laboratório para outros projetos de P&D da distribuidora, além de ser um ambiente voltado para o desenvolvimento da inovação na empresa.

Espera-se, também que, no futuro, fornecedores diversos proponham a Enel Distribuição Ceará, parcerias para testes de dispositivos de automação residencial, geração distribuída e acumulação de energia, de modo a tornar o empreendimento uma referência em testes de conceito de produtos inovadores, perpetuando a geração de conteúdo técnico e midiático a projetos de P&D.

Uma outra aplicação do laboratório será a integração com outros projetos de P&D nas linhas de mobilidade elétrica, Internet das Coisas, armazenamento de energia e outra tecnologia para cidades inteligentes.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os componentes e modos de operação do laboratório de testes de uma microrrede autônoma experimental, bem como o planejamento de sua utilização em um período pós-projeto.

O conhecimento aprofundado da interação entre elementos de geração, armazenamento de energia e dispositivos de gestão de demanda, possibilitam que a Enel Distribuição Ceará desenvolva novos produtos e serviços em um cenário de modernização do setor elétrico, visando soluções mais sustentáveis e inteligentes. O conhecimento adquirido, e os processos desenvolvidos a partir dos testes realizados no laboratório do projeto, contribuem para a utilização segura e eficiente do sistema de microrrede autônoma no projeto piloto, ao mesmo tempo em que podem-se compor novas estratégias comerciais para a distribuidora e seus parceiros.

A partir dos resultados das provas de conceito, as instituições responsáveis pelas tecnologias utilizadas no projeto piloto também se beneficiam, de modo a consolidar a base de conhecimento sobre seus produtos, possibilitando assim, contribuições em seus negócios futuros. Todos os equipamentos utilizados no laboratório de testes foram fabricados e ensaiados conforme as determinações das normas técnicas brasileiras e internacionais aplicáveis, para assegurar, na fase final do projeto, a correta implementação destas tecnologias na microrrede autônoma experimental.

É importante salientar que, tratando-se de um projeto de P&D, algumas das soluções propostas podem não ser aplicáveis a outros sistemas no curto prazo, em decorrência de questões regulatórias do setor elétrico brasileiro. No entanto, tais soluções são de grande valia para a proposição de alterações na legislação do setor elétrico, de modo a se introduzir o conceito de microrredes inteligentes no cenário elétrico nacional.

O desenvolvimento, implantação e operação do modelo de microrrede proposto, trarão à Enel Distribuição Ceará um vasto conhecimento técnico sobre o gerenciamento energético e econômico de redes de distribuição inteligentes, com a presença de diferentes fontes de geração distribuída, possibilitando assim, que a concessionária ofereça ao mercado uma gama de produtos e serviços diferenciados, com foco na qualidade e eficiência energética.

Conclui-se, que a aplicação do laboratório de testes é de grande valia para o projeto piloto, para que as pesquisas feitas até o momento sejam continuadas, e aprimoradas, garantindo à distribuidora, e parceiros, uma formação de sólidas competências na implementação de microrredes de distribuição inteligentes, abrangendo o desenvolvimento de sistemas inovadores de controle, supervisão, proteção, geração e acumulação de energia.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] L. P. Mendonça “Introdução às Microrredes e seus desafios” Monografia, Dept. de Eng. Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.
- [2] Resolução Normativa 414/2010, ANEEL, Setembro, 2010.
- [3] V. Maryama, V. S. Zeni, F. V. Jordan, C. Q. Pica, E. C. Finardi, Gabriel A. de Oliveira, “Gerenciamento Energético para Microrredes: Desenvolvimento e Implementação Piloto,” VIII Congresso de

Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL), Mata de São João (Costa do Sauípe) / BA, 2015.

- [4] Fronius Galvo (2011). *Fronius Galvo 1.5-1 / 2.0-1 2.5-1 / 3.0-1 / 3.1-1 Dummy* [Online]. Disponível: http://www.fronius.com/cps/rde/xbc/SID-BD821166-3C5F8CA8/fronius_china/42_0410_1984_298290_snapshot.pdf
- [5] SMA Solar Technology AG (2014), *Operating Manual SUNNY BOY 1300TL / 1600TL / 2100TL* [Online]. Disponível: <http://files.sma.de/dl/5684/SB13-21TL-BE-en-11.pdf>
- [6] SMA Solar Technology AG (2014), *Operating Manual SUNNY ISLAND 3.0M / 4.4M / 6.0H / 8.0H SUNNY REMOTE CONTROL* [Online]. Disponível: <http://files.sma.de/dl/17632/SI30M-44M-60H-80H-BE-en-33W.pdf>
- [7] [6] SMA Solar Technology AG (2014), *Operating Manual SUNNY TRIPower 5000TL/6000TL/7000TL/8000TL/9000TL/10000TL/12000TL* [Online]. Disponível: <http://files.sma.de/dl/17781/STP5-12TL-20-BE-en-14.pdf>
- [8] M.C. Freire, M. A. Izumida C. Q. Pica. S. Zeni, "Inventário dos locais mais adequados para usinas FV na área de concessão da Eletrosul" VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL), Mata de São João (Costa do Sauípe) / BA, 2015.
- [9] Nobreak (2017) Descrição do produto [Online] Disponível: <http://www.rta.com.br/especificacoes-ups-nobreak-modelos-monofasicos/>
- [10] Programa de Educação Tutorial – PET, (2013, Junho) " Introdução ao kit de desenvolvimento Arduíno (Versão: A2013M10D02)," UFF, Univ. Federal Fluminense, Escola de Engenharia.
- [11] H.M.A. Antunes, S.M. Silva and B.J.C. Filho, "Análise e Operação de uma Microrrede de Energia Elétrica," VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016.
- [12] M. A. I. Martins¹, C. Q. Pica, V. Maryama, B. Pacheco, M. L. Heldwein, J. N. Rodrigues "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A MICROGRID POWER MANAGEMENT UNIT USING A BACK-TO-BACK CONVERTER IN A RESIDENTIAL CONDOMINIUM CONNECTED AT MEDIUM VOLTAGE." Florianópolis, SC, 2015.