

## ESTUDO DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA COM ARMAZENAMENTO

**Antonia Sônia Alves Cardoso Diniz** – asacd@pucminas.br

**Suellen Caroline Silva Costa** – suellencscosta@gmail.com

**Ricardo Luis da Fonseca Batista** – ricardo\_lfb@hotmail.com

**Lauro de Vilhena Brandão Machado Neto** – lvilhena@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Instituto Politécnico, GREEN-IPUC

**Marcio Eli Moreira de Souza** – msouza@cemig.com.br

**Francisco Hering Alves de Freitas Souza** - fhering@cemig.com.br

Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG-D

**Wilton de Castro Padrão** – Wpadrao@engetron.com.br

**Flávio Marcos Coelho Michel** – fmichel@engetron.com.br

Engetron Ltda

**Olga Moraes Toledo** – toledo@ufv.br

**Delly Oliveira Filho** – delly@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa

**Resumo.** *Esse artigo apresenta os estudos realizados na primeira fase de implantação do projeto P&D CEMIG/ANEEL D308, que instalará um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, com sistema de armazenamento, no estádio de futebol Arena do Jacaré, localizado em Sete Lagoas, Minas Gerais. O objetivo deste projeto é avaliar o benefício da inserção do sistema de armazenamento a um sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica, visando injetar na rede a energia armazenada, aplainando a curva de carga no horário de ponta do alimentador. Inicialmente, foram realizados estudos para definição das características do gerador fotovoltaico, incluindo levantamentos de dados característicos da região e da estrutura onde será instalado o sistema fotovoltaico, incluindo avaliação do sombreamento. Visando propor medidas que possam contribuir com a melhoria do desempenho deste sistema, foi feita uma simulação utilizando os softwares SketchUp e Energy Plus, no intuito de eliminar qualquer projeção de sombra sobre os módulos fotovoltaicos e definir a melhor configuração do gerador, considerando a limitação da área construída. Na avaliação dos resultados obtidos na simulação, observou-se uma redução de aproximadamente 17% da incidência da radiação solar sobre um gerador sombreado e um gerador sem sombreamento, o que caracteriza uma perda considerável visto que a radiação solar influencia diretamente os parâmetros dos módulos fotovoltaicos. Para atender ao conceito do projeto, foi desenvolvido uma unidade de controle, conversão e conexão, denominado Conversor Bidirecional conectado à rede com armazenamento, que controlará o armazenamento de energia, oriunda do gerador fotovoltaico ou da rede elétrica em um banco de baterias. Para o projeto da Unidade de Controle e Conexão foi adotada uma topologia, onde o inversor e o Conversor Seguidor de Potência Máxima (Boost SPM) são dois conversores separados. Na conclusão do projeto terá sido instalado um protótipo em escala reduzida no GREEN-IPUC, na PUCMINAS, e um protótipo de um sistema fotovoltaico conectado a rede, com armazenamento, com os equipamentos desenvolvidos no projeto, no Estádio Arena do Jacaré.*

**Palavras-chave:** Sistema Fotovoltaico, Sistema de Armazenamento, Sombreamento, Conversor de Energia.

### 1. INTRODUÇÃO

A matriz elétrica do país é bastante complexa e extremamente interligada, com geração centralizada, geralmente localizada distante dos centros de consumo, tendo como consequência o aumento das perdas e dos custos para a produção de energia elétrica.

Ela é composta principalmente de geração proveniente da hidroeletricidade, que representam 71,4% do total de geração, e por 29% de geração térmica oriunda de combustíveis fósseis (BEN, 2013).

Contrapondo esta realidade, a geração distribuída tem surgido como uma alternativa. Ela é caracterizada pela geração de eletricidade localizada próxima aos centros de carga, independente da tecnologia, conectada ao sistema de distribuição de pequeno porte e não despachada pelo ONS e em geral com capacidade instalada até 30MW. No entanto, há divergência sobre o tamanho dessa geração e, a princípio, também não se podem excluir os pequenos geradores que utilizam combustíveis fósseis desse conceito mais amplo.

Os sistemas de geração distribuída são uma opção para minimizar as perdas provenientes do transporte da energia gerada, devido à proximidade da geração ao consumidor, além de reduzir e postergar investimentos, em expansão do sistema elétrico. Outras vantagens são baixo impacto ambiental, menor tempo de implantação, redução no carregamento das redes e das perdas em linhas de transmissão e distribuição, melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada, provimento de serviços auxiliares, como a geração de energia reativa, aumento da confiabilidade do atendimento, pois pode permitir a operação ilhada das cargas em caso de falhas nos sistemas de distribuição, diversificação da matriz energética, desenvolvimento local e liberdade do consumidor quando comparado ao sistema centralizado.

Apesar de tantas vantagens importantes, a geração traz muitos desafios também, tais como aumento da complexidade de operação da rede de distribuição, que passará a ter fluxo bidirecional de energia; necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes; aumento da dificuldade para controlar o nível de tensão da rede no período de carga leve, dos níveis de curto-circuito e distorção harmônica na rede.

A Lei nº 10.848/2004 regulamentou a utilização também da geração distribuída, como uma das possíveis fontes de geração de energia. O detalhamento da utilização da geração distribuída pelo Decreto nº 5.163/2004, possibilitou uma nova visão as empresas distribuidoras, quanto ao uso destas tecnologias (ANEEL 2004). Atualmente, as distribuidoras de energia elétrica brasileiras estão promovendo grandes esforços para conhecer as tecnologias de geração distribuída, e se adaptarem a regulamentação estabelecida pela ANEEL, através da Resolução Normativa nº 482/2012. Esta resolução tem como objetivo a redução das barreiras regulatórias para a micro e mini geração distribuída ( $\leq 1\text{MW}$ ), visando assegurar a qualidade de energia elétrica fornecida por estes sistemas, dentre as quais os sistemas fotovoltaicos. Para que a conexão seja a mais confiável possível são necessários testes e análises de diversos parâmetros que visam garantir a qualidade de energia, segurança da instalação, quanto do fornecimento de uma energia confiável e limpa. (ANEEL, 2012)

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica são classificados como geração distribuída, pois podem ser instalados próximos aos centros consumidores, e em sua maioria possuem capacidade instalada inferior a 30 MW. No entanto, as plantas fotovoltaicas com valores superiores a 30MW, tem apresentado crescimento significativo nos últimos anos. Um sistema fotovoltaico conectado à rede é composto por um gerador fotovoltaico, que é formado por um conjunto de módulos ligados em série ou em paralelo e por um subsistema de condicionamento de potência representado por um inversor. Os módulos fotovoltaicos são responsáveis por converter a radiação solar incidente sobre estes em energia elétrica. A função do inversor é converter a energia elétrica proveniente do gerador fotovoltaico de corrente contínua para corrente alternada, possibilitando que esta energia gerada seja injetada na rede, com controle da conexão a rede elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos instalados ao redor do mundo superaram 100GWp, em 2012, segundo IEA, sendo que os sistemas interligados a rede elétrica representam hoje, mais de 80% do mercado desta tecnologia no mundo (IEA, 2012).

A intermitência da geração fotovoltaica é uma grande desvantagem, que pode ser minimizada pela utilização de sistemas de armazenamento de energia (Toledo e outros, 2010). Os sistemas de armazenamento são classificados como fontes distribuídas de energia (Toledo e outros, 2010), podendo ser utilizados para minimizar a intermitência dos sistemas fotovoltaicos ou de outras fontes renováveis, podendo também reduzir o pico de demanda no horário de ponta do sistema elétrico. As tecnologias de armazenamento de energia cobrem um grande espectro de aplicações em sistemas de potência, que requerem descargas de energia de frações de segundos em aplicações de alta potência, as horas em aplicações de alta energia. Atualmente, existem várias tecnologias para aplicação de sistemas de armazenamento de energia. (Sorensen, 2007; Divya e Ostergaard, 2009). Nourai (2002) fez um estudo comparativo de várias tecnologias para aplicações em armazenamento de energia, como supercapacitores (capacitores eletroquímicos), *flow batteries* (ZnBr, VRB e PSB), baterias sódio-enxofre (NaS), baterias de íon-lítio (Li-íon), baterias de níquel cádmio (Ni-Cd), baterias de chumbo-ácido, baterias metal-ar, água pressurizada, sistemas de armazenamento de energia a ar comprimido (CAES - compressed air energy storage), volantes de inércia para alta energia (flywheels).

As aplicações do lado de alta potência em um espectro que inclui qualidade de energia e a continuidade do suprimento de potência requerem tecnologias de armazenamento, como supercapacitores, *flywheels*, entre outras, que são utilizadas em frações de segundos para garantir a confiabilidade do sistema. Em aplicações de alta energia em um espectro que inclui o gerenciamento de energia (gerenciamento do lado da oferta e da demanda), balanceamento da curva de carga, redução do horário de pico (*peak shaving*) utilizam-se tecnologias de armazenamento com ciclos de carga-descarga diários para assegurar ganhos econômicos, como baterias, supercapacitores, entre outras (Toledo, Oliveira, Diniz, 2010).

A utilização de sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica com armazenamento ainda é pouco utilizada. O primeiro sistema instalado nos USA foi realizado pela *Sandia National Laboratory*, visando conhecer os requisitos de armazenamento de energia necessários para aplicação com sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. O sistema de 10 MVA foi instalado na rede de distribuição da AEP, em Albuquerque, com tensão de 480 V, trifásico, com descarga das baterias de 4 a 10 horas, dependendo do carregamento dos alimentadores (Nourai, 2007). A *S&C Electric Company* instalou em São Francisco um sistema fotovoltaico com baterias NAS, para controle de ponta e normalização da curva de carga do alimentador a que o sistema está conectado (S&C, 2012).

Esses sistemas também estão sendo utilizados no sul do Japão, sendo a principal planta solar com armazenamento instalado em Miyako-jima, para normalização da curva de carga, retirando a intermitência da geração fotovoltaica (Toshiba, 2012).

Os sistemas acima descritos atendem aos requisitos técnicos, mas ainda possuem custos elevados, devidos as baterias especiais e a complexidade da unidade de controle e conexão a rede elétrica, mas já se viabilizam em situações de escassez de energia elétrica, como no caso das ilhas no sul do Japão.

Visando estudar sistemas fotovoltaicos com armazenamento, interligados a rede elétrica, foi criado o projeto de P&D CEMIG/ANEEL D308, intitulado proposta para realização do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico Cemig D - Aneel, ano 2009, intitulado “D308 – Desenvolvimento de sistema integrado de geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia interligados à rede elétrica de distribuição”, pelas equipes da PUCMINAS (através do GREEN-IPUC), UFV e ENGETRON Ltda. em parceria com a Cemig Distribuição S/A, (Diniz, 2010). Este artigo descreve os resultados obtidos na primeira fase do projeto, isto é, no desenvolvimento do protótipo em escala reduzida, e simulações abrangendo o gerador fotovoltaico para dar suporte à especificação técnica do gerador fotovoltaico do sistema que será instalado no Estádio Arena do Jacaré.

## **2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE E COM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO - PROJETO P&D CEMIG-ANEEL D308**

O projeto é uma oportunidade de atendimento às necessidades do setor elétrico e possibilitará desenvolver uma nova alternativa energética para efficientização do sistema de distribuição pelo lado da oferta, utilizando fontes renováveis com armazenamento de energia, visando aplainar pontas de carga diurna e noturna do sistema de distribuição.

Os objetivos do Projeto são: desenvolver um protótipo funcional de um sistema integrado para redução de demanda no horário de ponta, diurno e noturno, em alimentadores de distribuição, utilizando geração distribuída com energia solar fotovoltaica integrada com unidades de armazenamento de energia; desenvolver um sistema de controle integrado para interligação de unidade de armazenamento e fontes alternativas à rede elétrica.

Adicionalmente, o projeto tem como objetivos desenvolver metodologia para avaliação e seleção de pontos ótimos de conexão no sistema elétrico da CEMIG; realizar análise técnica dos protótipos dos equipamentos, que serão submetidos a testes elétricos, análise dos algoritmos implementados e análise térmica por meio de termografia. Os protótipos serão monitorados em laboratório para a verificação da eficiência do equipamento e análise da qualidade de energia - distorção harmônica total e na influência na conexão com o sistema elétrico de distribuição (Diniz et. al, 2010).

Este projeto possibilitará a avaliação real dos problemas técnicos da utilização da geração distribuída no sistema elétrico, utilizando tecnologias de armazenamento de energia associado a sistemas fotovoltaicos, economizando investimentos em geração, transmissão e distribuição, reduzindo as perdas elétricas e melhorando a qualidade do serviço de energia elétrica além de possibilitar a postergação de investimento em aumento de capacidade de alimentadores e subestações. O escopo do projeto D308 será executado em três fases.

Na primeira fase foi desenvolvido um protótipo em escala reduzida de um sistema integrado de geração distribuída composta por gerador fotovoltaico de 5kWp, uma unidade de armazenamento de energia (10kW), e um sistema de controle integrado para interligação da unidade de armazenamento e sistema fotovoltaico à rede elétrica de distribuição, nas instalações do GREEN-IPUC, PUCMINAS.

Através deste modelo de escala reduzida serão feitos todos os testes e ensaios necessários para aprimoramento da unidade de controle e conexão do sistema piloto.

Na segunda fase do projeto será instalado um sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica, no Estádio Arena do Jacaré, composto por um gerador fotovoltaico gerador fotovoltaico de 50kWp e por dois inversores de 25kW, para avaliação do desempenho do gerador fotovoltaico, através de simulações e monitoramento local. Concomitantemente, será desenvolvida a unidade de controle e conexão piloto, que será implantada no estádio na próxima fase, bem como a aquisição e adequação dos dois módulos de armazenamento de 50 kW, compostos por baterias.

Na terceira fase serão retirados os inversores da fase 2, e instalada a unidade piloto da unidade de controle e conexão. Portanto, o sistema fotovoltaico conectado a rede com armazenamento, piloto, da Arena do Jacaré, será composto pelo gerador fotovoltaico de 50 kWp, pelo sistema de armazenamento de energia de 100 kW, com duas unidades modulares (módulos de 50kW), e a unidade piloto de controle e conexão, incluindo o inversor (micro controlador com algoritmos seguidor de potência máxima, de modulação e gerenciamento da conexão).

O objetivo da unidade de controle e conexão é gerenciar a inserção do sistema de armazenamento, o período em que a energia será armazenada e posteriormente injetada na rede, visando reduzir o impacto da demanda no horário de ponta, além de viabilizar o carregamento do sistema de armazenamento pela rede, quando a energia apresentar um valor relativamente baixo, como ocorre nos horários de carga leve.

Portanto, os resultados do projeto incluem além do desenvolvimento de um protótipo de unidade de controle para conexão à rede elétrica com interligação da unidade de armazenamento e sistemas fotovoltaicos, em escala reduzida e piloto, o procedimento para ensaio de controlador de carga, retificadores e inversores interligados à rede elétrica validados em bancadas de ensaios montadas pelo projeto, procedimento de monitoramento de unidades geradoras fotovoltaicas com armazenamento integrado, e desenvolvimento de metodologia para avaliação e seleção de pontos ótimos de conexão no sistema elétrico, com aplicação no sistema elétrico da CEMIG, para inserção de tecnologias de geração distribuída com fontes renováveis com armazenamento.

### 3. METODOLOGIA

A avaliação do gerador fotovoltaico para implantação do sistema fotovoltaico proposto pelo projeto P&D CEMIG/ANEEL D308 foi iniciada avaliando-se o local para instalação, bem como os efeitos do sombreamento em relação à incidência da radiação solar, através de resultados oriundos de simulações realizadas no software EnergyPlus.

Para a realização da simulação foi necessário à utilização de quatro programas, todos são disponíveis gratuitamente pelos seus fornecedores, e podem ser instalados facilmente. Esses softwares foram utilizados de forma integrada, sendo cada um específico para as etapas como destacado a seguir:

- O SketchUp8 é a interface onde se utiliza ferramentas de desenho para construção do modelo 3D da cobertura da arquibancada da Arena do Jacaré.
- OpenStudio: A versão utilizada foi a 0.9.4.10252, este programa trabalha junto ao SketchUp8 e sua função é determinar as faces que serão analisadas na simulação de sombreamento. Com as faces determinadas para sombreamento é necessário salvar e exportar o arquivo para o formato legível do programa EnergyPlus.
- EnergyPlus: A versão utilizada foi a 7.2.0.006, este programa tem a função de calcular (simular) a área sombreada com dados já disponíveis no programa, como, radiação local, latitude, comportamento do sol em relação à terra, etc. Após o cálculo, é gerado uma série de arquivos de difícil interpretação.
- ResultsViewer: Um programa do pacote do OpenStudio que tem a função de mostrar os resultados dos cálculos do EnergyPlus de forma compreensível.

Todos os desenhos desenvolvidos no modelo 3D foram realizados com base na planta de AUTOCAD, desenvolvidos pela Arquiteta Renata Pietra (Pietra, 2012).

Para o desenvolvimento do módulo de conversão e da unidade de controle e conexão foram realizadas simulações no software Matlab e Spice. Os projetos das unidades foram feitos seguindo os requisitos estabelecidos nas normas abaixo:

- ABNT/CB-03 – 2º Projeto 03.082.01-001 – Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. (Agosto 2012)
- ABNT NBR IEC 62116:2012 - Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. (Edição 1.0b – publicada em 06/03/2012, válida a partir de 06/04/2012).

### 4. RESULTADOS – SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERLIGADO A REDE ELÉTRICA COM ARMAZENAMENTO

Para viabilização financeira do projeto D308, bem como devido à área disponível no estádio Arena do Jacaré, o gerador fotovoltaico foi pré-definido de 50 kWp, pela CEMIG, bem como o sistema de armazenamento de 100 kW. No intuito de otimizar a geração deste sistema, devem ser identificados e avaliados os fatores que influenciam o desempenho do mesmo.

Para uma melhor compreensão do princípio de operação de um sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica, com armazenamento, é importante introduzir uma visão geral dos principais fluxos de energia existentes no sistema. A Fig. 1 demonstra esses blocos e como ocorrerá a ligação entre eles, de modo a deixar claro todas as direções de fluxo de potência existentes.

O fluxo horário diurno indica a saída de energia gerada pelo gerador fotovoltaico, podendo esta ser injetada na rede elétrica, ou carregar o sistema de armazenamento. Neste caso, a energia gerada será injetada na rede quando houver excedente após carregamento do sistema de armazenamento, ou para atender a demanda no horário de ponta, no período em que haja radiação solar.

O fluxo horário de ponta apresenta o descarregamento do sistema de armazenamento para aplainar a curva de carga no horário de ponta.

O fluxo horário noturno refere-se ao carregamento do sistema de armazenamento pela rede elétrica. O sistema de armazenamento pode ser carregado pela rede no horário de carga leve do sistema elétrico de potência.

#### 4.1 Levantamentos das características do local de implantação do sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica com armazenamento

O sistema fotovoltaico proposto será instalado nas coberturas das arquibancadas do estádio de futebol, Arena do Jacaré, localizado na cidade de Sete Lagoas, no Estado de Minas Gerais. Esta região está localizada geograficamente nas coordenadas 19,47° ao sul e 44,22° a oeste.

As coberturas possuem uma área total de aproximadamente 1.146 m<sup>2</sup>, com orientação deslocada de 14° a esquerda do Norte Solar, e são afastadas de obstáculos que possam promover a projeção de sombras sobre o gerador fotovoltaico, Fig. 2.

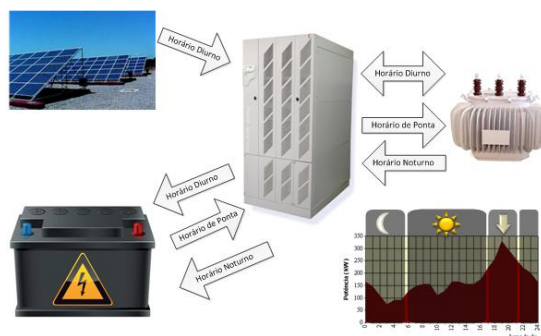


Figura 1 – Fluxos de funcionamento do sistema fotovoltaico conectado a rede e com armazenamento.

#### 4.2 Definições do Gerador Fotovoltaico

Nesta fase foram feitas as simulações de sombreamento, para definição da melhor posição dos módulos fotovoltaicos, na edificação existente da Arena do Jacaré, em Sete Lagoas. Estas análises permitiram definir projeto arquitetônico (Pietra, 2012), e elétrico do gerador fotovoltaico, que fundamentaram a especificação técnica da CEMIG D (CEMIG, 2013) de aquisição do gerador fotovoltaico de 50 kWp que será instalado no Estádio Joaquim Henrique Nogueira - Arena do Jacaré.

##### *Análise do sombreamento do gerador fotovoltaico do Estádio Arena do Jacaré*

Neste item será mostrada a avaliação dos efeitos relativos ao sombreamento sobre o gerador fotovoltaico, fator este que causa impactos consideráveis no desempenho do sistema, podendo reduzir a geração de energia e a vida útil dos módulos fotovoltaicos.



Figura 2 – Localização geográfica do Estádio Arena do Jacaré  
Fonte: Google

Por não haver obstáculos, como árvores ou edificações, nas proximidades das arquibancadas foi considerado neste estudo apenas o efeito do auto sombreamento. O auto sombreamento em geradores de sistemas fotovoltaicos ocorre quando dois *strings* são instalados em uma distância inadequada, promovendo sombreamento de um *string* em relação ao outro.

A cobertura da Arena do Jacaré apresenta um design diferenciado, constituída por desníveis, conforme Fig. 3. Este design deve ser considerado na análise do sombreamento, a fim de identificar a distância apropriada do *string* de módulos em relação ao desnível da estrutura.

Utilizando os softwares indicados na metodologia foi simulado o efeito do sombreamento de um dos desníveis da estrutura da cobertura sobre um *string* de módulos fotovoltaicos, Fig. 3.

A simulação foi realizada considerando os dados meteorológicos do dia 21 de junho, dia este compreendido no período de inverno do hemisfério sul, e que apresenta um menor ângulo de altitude solar, e consequentemente maior projeção de sombra.

Considerando o sombreamento da estrutura sobre o *string* pode ser observado que a radiação solar incidente variou de 450 a 700 W/m<sup>2</sup>, conforme mostrado na Fig. 4.

A Fig. 5 apresenta a mesma simulação, porém sem o efeito do sombreamento, ou seja, com a distância adequada em relação ao desnível da estrutura e o *string*. Nesta simulação observou-se que a radiação solar incidente sobre o *string* variou de 600 a 850 W/m<sup>2</sup>.

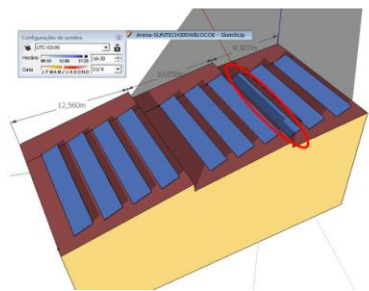


Figura 3 – Modelo 3D do Sketchup com sombreamento provocado pela estrutura

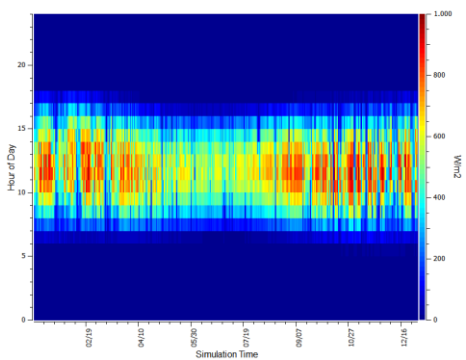


Figura 4 – Radiação incidente no string sombreado

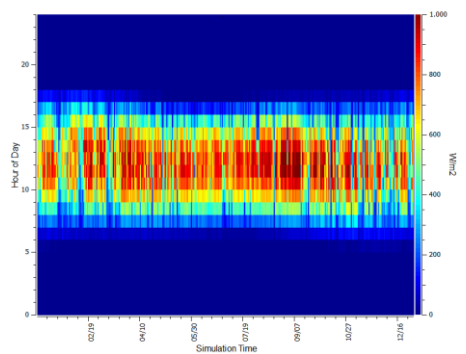


Figura 5 – Radiação incidente no string sem influencia do sombreamento

Para definir a configuração do gerador fotovoltaico e a distância ideal entre os *strings*, visando eliminar as possibilidades deste tipo de sombreamento, foram realizadas simulações considerando dois modelos de módulos fotovoltaicos, o KD 315 e o GEPVp 210. Estes módulos foram escolhidos aleatoriamente, porém seguindo as orientações definidas na Especificação Técnica do gerador fotovoltaico para o sistema a ser instalado na Arena do Jacaré, de que os módulos devem ser de silício cristalino e a potência superior a 200 Wp.

A Fig. 6 mostra a alocação ideal dos módulos fotovoltaicos sobre a cobertura do Estádio, e a Tab. 1 apresenta o dimensionamento do gerador fotovoltaico, com base nas características dos módulos KD 315 e GEPVp 210, considerando a distância adequada entre *strings* e em relação aos desníveis da estrutura.

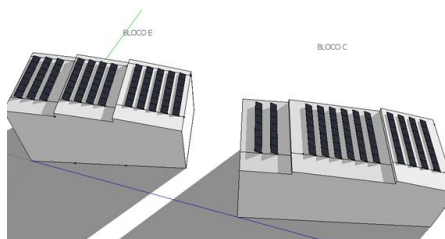


Figura 6 – Modelo 3D da alocação dos módulos fotovoltaicos

A Tab. 1 apresenta as características do gerador fotovoltaico que estão sendo adquiridos pela CEMIG D, para o projeto, e que é objeto da especificação técnica 02.111. ET/TD/AT 89A (CEMIG D, 2013).

Tabela 1 – Configuração do gerador fotovoltaico para os módulos KD 315 e GEPVp 210

Modulo Kd315			Modulo GEPVp210		
Bloco	C	E	Bloco	C	E
Potência do módulo (W)	315		Potência do módulo (W)	210	
Número de módulos/string	7	7	Número de módulos/string	10	10
Número de string	12	12	Número de string	12	12
Dimensões do módulos (mm)	1662;1320;46		Dimensões (mm)	1485;981;35	
Potência do gerador (kW)	26,46	26,46	Potência do gerador (kW)	25,2	25,2
Potência total (kW)	52,92		Potência total (kW)	50,4	

### 4.3 Unidades de Controle e Conexão do Sistema

Para atender ao conceito do projeto, será desenvolvido um equipamento (Conversor Bidirecional conectado à rede com armazenamento), que terá como responsabilidade armazenar a energia, oriunda dos módulos ou, quando esta for insuficiente, da própria rede elétrica em um banco de baterias. Quando for de interesse, esse equipamento realizará a conversão da corrente contínua em corrente alternada para que esta seja entregue à rede de distribuição de energia elétrica operada pela concessionária CEMIG. Para o projeto da Unidade de Controle e Conexão foi adotada uma topologia, onde o inversor e o Conversor Seguidor de Potência Máxima (Boost SPM) são dois conversores separados. Desta forma só não é injetada energia do sistema fotovoltaico, quando as baterias já estão totalmente carregadas e por algum motivo não se pode injetar energia na rede.

Para uma melhor compreensão dos estados possíveis de operação é importante introduzir uma visão geral dos principais blocos que compõem o sistema e saber que o horário de ponta não é fixo e pode ser programado pelo operador do sistema. A Fig. 7 tem como objetivo mostrar esses blocos, e a ligação entre eles de modo a deixar claro todas as direções de fluxo de potência existentes, denominados de A a E.

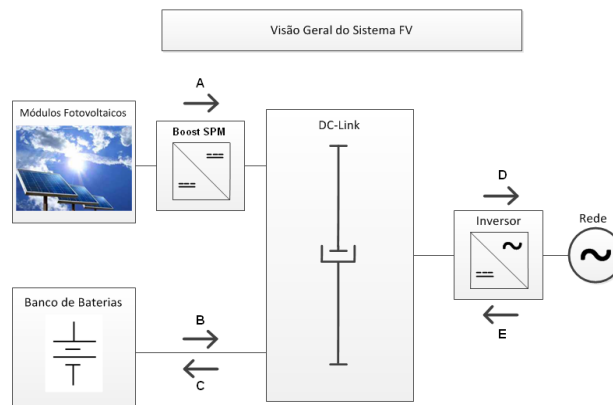


Figura 7 – Visão geral dos principais blocos do sistema e a indicação do fluxo de potência entre os mesmos.

Os estados possíveis do sistema estão compreendidos em três grupos distintos nomeados como Carga de Bateria Diurna, Geração na Ponta e Carga de Bateria Noturna, cada um desses grupos possui outras subdivisões de modo a caracterizar todas as possibilidades de estado. A Figura 4 mostra um diagrama contendo todas essas divisões. Elas serão detalhadas no texto que se segue. Os estados possíveis de operação do sistema controle estão compreendidos em três grupos distintos, nomeados como Carga de Bateria Diurna, Geração na Ponta e Carga de Bateria Noturna, cada um desses grupos possui outras subdivisões de modo a caracterizar todas as possibilidades de estado de controle. Esses estados são os mostrados na Fig. 8, abaixo, seguida de uma breve descrição destes estados.

- Carga de Bateria Diurna: Período do dia em que o principal objetivo de controle é a carga de baterias, composto por:
  - ✓ Carga Via Sistema Fotovoltaico (SF): estado que representa uma situação hipotética que pode ser visto como uma condição de contorno em que a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos é exatamente igual à direcionada para o banco de baterias, sem a necessidade do auxílio da rede e sem geração de energia excedente. Carga de Bateria Diurna; Período do dia em que o principal objetivo de controle é a carga de baterias, composto por:
    - ✓ Carga Via Sistema Fotovoltaico (SF): estado que representa uma situação hipotética que pode ser visto como uma condição de contorno em que a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos é exatamente igual



à direcionada para o banco de baterias, sem a necessidade do auxílio da rede e sem geração de energia excedente.

- ✓ Carga Via Rede: refere-se a situações de dias nublados ou com irradiação solar praticamente nula de modo que a carga diurna do banco de baterias é realizada integralmente pela rede, uma vez que a geração fotovoltaica é desprezível nesse estado. Fica a cargo do operador do sistema decidir pelo uso ou não da rede para tal função.
- ✓ Carga Via SF e Rede: refere-se a situações de dias com pouca irradiação solar e fora do horário de ponta pré-definido. A carga diurna do banco de baterias é realizada pela energia proveniente tanto dos módulos fotovoltaicos como da rede. Em outras palavras, a rede funciona como auxílio no carregamento das baterias. Esta é uma das situações que se espera que mais ocorra dentre as situações previstas na carga diurna de baterias.
- ✓ Carga Via SF e Geração Excedente: refere-se a situações de dias com grande intensidade solar e fora do horário de ponta pré-definido. A potência que flui dos módulos fotovoltaicos é superior à necessária para o carregamento dos bancos de baterias. Dessa forma, o excesso de energia será detectado pelo controle do inversor, que irá direcioná-lo a rede, injetando corrente na mesma. Esta é a outra situação que se espera maior ocorrência.
- ✓ Carga sem Rede: refere-se a uma situação em que independente de qualquer fator, a rede não deve ser utilizada no auxílio da carga dos bancos de baterias. Em outras palavras, o operador do sistema determinou que a energia não pode ser retirada da rede naquele horário. Dessa forma, se houver sol as baterias continuam a ser carregadas, se não, a recarga é interrompida.
- Geração na Ponta: Período correspondente ao horário de ponta pré-definido pelo operador do sistema, tendo como principal objetivo o controle de injeção da potência programada na rede de distribuição de energia elétrica.
  - ✓ Geração via SF: estado que representa a uma situação hipotética que pode ser vista como uma condição de contorno em que durante um horário de ponta pré-definido (em um período com sol) a potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos é exatamente igual à programada para ser injetada na rede, ou seja, não é necessário o uso das baterias.
  - ✓ Geração via Baterias: refere-se a situações de horários de ponta sem irradiação solar. Dessa forma, toda a injeção de potência programada na rede é proveniente do banco de baterias, uma vez que os módulos não estão gerando energia ou esta é desprezível. Esta é a situação esperada normalmente.
  - ✓ Geração via SF e Baterias: refere-se a situações de horários de ponta com irradiação solar. Dessa forma, a injeção de potência programada na rede é proveniente tanto do banco de baterias, como também dos módulos fotovoltaicos.
- Carga de Bateria Noturna: Período de carregamento programado das baterias durante a noite.
  - ✓ Carga Programada via Rede: estado em que ocorre a retirada de energia da rede para realizar a carga das baterias do banco.

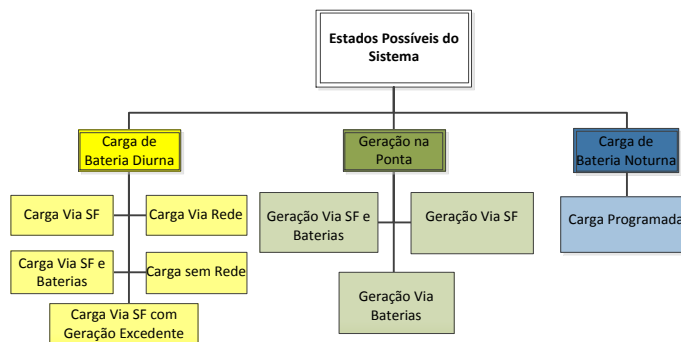


Figura 8 - Diagrama de bloco contendo os Estados Possíveis do Sistema.

O módulo de conversão de energia é composto por três circuitos de eletrônica de potência: Um conversor bidirecional em potência, um conversor boost e um circuito para controle de carga e descarga de baterias. O conversor bidirecional é a interface do equipamento com a rede elétrica, tendo dois modos principais de funcionamento, sendo um inversor e outro retificador. Quando operando como inversor, o conversor injeta potência na rede elétrica atuando como uma fonte de corrente. Quando operando como retificador, ele retira potência da rede para recarga do banco de baterias. O conversor boost é a interface entre o gerador fotovoltaico e o equipamento. A topologia boost eleva a tensão dos módulos fotovoltaicos para a tensão de barramento C.C., de forma a controlar a potência drenada dos módulos fotovoltaicos. Utilizando algoritmos MPPTs (Maximum Power Point Tracking) para determinar o chaveamento do conversor Boost, é possível fazer com que os módulos operem sempre no ponto de tensão e corrente que ofereçam a maior potência para aquelas condições de operação.



A topologia escolhida para o inversor conecta o neutro da rede ao ponto central do barramento C.C., vinculando assim a tensão do equipamento ao potencial de neutro e evitando que este fique flutuando em relação a terra. Foi definido que o banco de baterias utilizado no equipamento ficará em paralelo com o barramento C.C., isolando-as do ripple de tensão do barramento. Serão colocados, após o filtro do conversor bidirecional, um indutor e um sensor de corrente por fase para realizar a medição da componente C.C. de corrente na saída. A Fig. 9 mostra o esquemático da topologia descrita acima.

A topologia geral da unidade de controle e conexão deverá ser composta por: Unidade de Potência, Interface entre usuário e controle, Unidade de Controle, Interface com o gerador Fotovoltaico, Interface com o banco de baterias e Interface com a Rede.

Para facilitar a conexão da unidade de controle, tanto com a rede quanto com o banco de baterias, e também para possibilitar um rearranjo dos módulos fotovoltaicos, foram previstos quadros elétricos de conexão nas três portas do equipamento, a saber, a porta de Sistema Fotovoltaico, a porta de Banco de Baterias e a porta da Unidade de Conexão com a Rede.

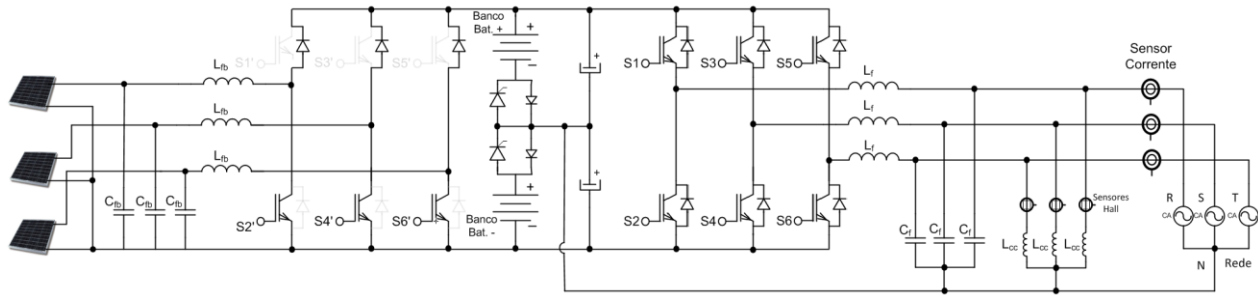


Figura 9 - Esquemático do módulo de conversão de energia.

As variáveis a serem medidas no Boost são: tensão, corrente e potência do gerador fotovoltaico, energia gerada e temperatura. As variáveis a serem medidas no Barramento são: tensão barramento C.C., corrente (carga e descarga) e autonomia do banco de bateria. Enquanto as variáveis a serem medidas no Inversor serão: Tensão, Corrente C.C. e C.A., Frequência, Fator de Potência, Energia, Sincronismo, Temperatura, Anti-Ilhamento, Tempo de geração.

Outro parâmetro importante são as variáveis de configuração, tais como: horário de geração, potência de geração, horário permitido para carga de bateria, referência de fator de potência, escolha de alarmes a receber notificação, bem como nível de notificação (1, 2, 3). Abaixo seguem listados os dados de entrada e saída do conversor, bem como os alarmes e medidas realizadas pelo mesmo.

Os dados de Entrada do Conversor são: Horário de Geração: Definição do Horário de Ponta; horários permitidos para Carga: Horários em que o sistema pode utilizar a rede para carga de baterias; Referência de Fator de Potência; Corrente a gerar no horário de ponta; Corrente máxima de carregamento das baterias; Escolha de Alarmes a receber notificação.

Os dados de Saída do Conversor são: Tensões, Correntes e Frequência; Temperaturas; Estado de Carga das Baterias; Potências Aparentes, Ativas e Reativas; Fator de Potência; Sincronismo; Anti-Ilhamento; Componente C.C. da corrente gerada; Energia Consumida da rede em um espaço de tempo; Energia Gerada pelos módulos em um espaço de tempo; Energia Injetada na rede em horário de ponta; Energia Injetada na rede fora do horário de ponta; Saldo total em Energia (Sem validade para compensação de energia com a CEMIG-D).

O Conversor também terá alarmes de tensão (subtensão de saída, sobretensão de saída, sobretensão na bateria); corrente: sobrecorrente e curto-circuito; sincronismo; temperatura; anti-Ilhamento; dentre outros.

## 5. CONCLUSÃO

Na simulação realizada foi observado que o sombreamento em apenas um *string*, pode causar redução de até 17% na radiação incidente sobre o gerador fotovoltaico sombreado, o que acarreta na redução do desempenho do sistema. Este resultado mostra a importância quanto ao levantamento das características do local onde será instalado o sistema fotovoltaico, no intuito de minimizar possíveis perdas.

Este projeto está em andamento, sendo que o conversor de energia desenvolvido será instalado no sistema em escala reduzida no GREEN-IPUC/PUC Minas. A próxima fase será a instalação do sistema, a realização de testes no conversor de energia, e o monitoramento do sistema, a fim de levantar dados necessários quanto ao seu funcionamento. Estes dados levantados serão primordiais para a instalação da planta piloto na Arena do Jacaré.

## REFERÊNCIAS

- National Renewable Energy Laboratory (NREL). OpenStudio. USA, 2012. Disponível em: <<http://openstudio.nrel.gov/>>. Acesso em 25 abr. 2012.
- U.S. Department of Energy (U.S. DOE). EnergyPlus Energy Simulation Software. USA, 2012. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em 25 abr. 2012.
- ABNT/CB-03 – 2º Projeto 03.082.01-001 – Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição; Agosto 2012.
- ABNT NBR IEC 62116:2012 - Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Edição 1.0b; publicada em 06/03/2012.
- CEMIG D; 02.111. ET/PD/AT 89 A; Especificação técnica “ Implementação Usina Solar Fotovoltaica Estádio Joaquim Henrique Nogueira – Arena do Jacaré – P&D CEMIG/ANEEL D308; 28/07/2013.
- Dalton, G. J., D. A. Lockington, et al. (2009). "Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel." *Renewable Energy* 34(4): 955-964.
- Divya, K. C. and J. Østergaard (2009). "Battery energy storage technology for power systems--An overview." *Electric Power Systems Research* 79(4): 511-520.
- Diniz, A.S.A.C., Machado Neto, L. V., Oliveira Filho, D. et. al.; P&D - Cemig D - Aneel, “D308 – Desenvolvimento de sistema integrado de geração fotovoltaica distribuída com armazenamento de energia interligados à rede elétrica de distribuição”; CEMIG D, PUCMINAS/SMC, UFV/FUNARBE, ENGETRON Ltda, 2009.
- Hadjipaschalis, I., A. Poullikkas, et al. (2009). "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6-7): 1513-1522.
- IEA (2010). *World Energy Outlook-2010*, International Energy Agency.
- Nourai, A. (2002). Large-scale electricity storage technologies for energy management. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE.
- Pereira, M. G., M. A. V. Freitas, et al. (2010). "Rural electrification and energy poverty: Empirical evidences from Brazil."
- Renata Pietra, Projeto arquitetônico do Joaquim Henrique Nogueira – Arena do Jacaré; 2012.
- Sørensen, B. (2007). *Battery storage. Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage*. Burlington, Academic Press: 288-294.
- Toledo, O. M., Oliveira D., Diniz, A. S.A.C, (2010). "Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 14(1): 506-511.
- S&C Electric Company, comunicação oral; São Francisco, USA; 2012.
- Toshiba; Visita técnica e comunicação oral, Miyako-jima, Japão, 2012. WADE (2006).

## IMPLEMENTATION STUDY OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM CONNECTED TO NETWORK WITH STORAGE SYSTEM

**Abstract.** *This paper presents the studies to implement a grid connected PV system with storage, proposed by the R&D project CEMIG/ANEEL D308 at the football stadium, Arena do Jacare, located in Sete Lagoas, Minas Gerais. The objective of this project is to evaluate the benefit of an insertion of a complementary storage system to do peak shaving in a feeder. Initially, surveys were conducted to identify the characteristic of the region and the structure where the PV system will be installed. To evaluate the PV system performance, a simulation was made to eliminate any shadow projection on the photovoltaic modules and define the configuration of the generator. The analysis of the simulation results has shown a reduction of approximately 17 % in incidence of solar radiation on the PV generator, which features a considerable loss as the solar radiation directly influences the power output of the photovoltaic modules. To meet the project objective, a unit named Bidirectional converter connected to the grid was developed, which will have the responsibility to control the flow of energy from the PV modules, battery bank and electric grid. For the design of this unit it was adopted a topology where the inverter and follower Converter Max Power (Boost SPM) are two separate converters. In the first phase of the project a prototype of the PV system with storage will be installed at GREEN-IPUC in PUCMinas. At the conclusion of the project a larger photovoltaic system connected to the grid with storage, and with equipment developed in the project, will be working at the Arena do Jacare Stadium.*

**Key words:** *Photovoltaic System grid connected, Storage System, Shading, Power Converter.*