

Análise do Impacto da Geração Fotovoltaica na Universidade Federal de Goiás**Analysis of the Impact of Photovoltaic Generation at the Federal University of Goiás**

DOI:10.34115/basrv4n5-022

Recebimento dos originais:04/09/2020

Aceitação para publicação:09/10/2020

Marcelo Stehling de Castro

Doutor em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal de Goiás

Endereço: Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação -Av. Universitária, n.º 1488 -
quadra 86 - Setor Leste Universitário - CEP: 74605-010, Goiânia-GO

E-mail: mcastro@ufg.br

Fernando Nunes Belchior

Doutor em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal de Goiás

Endereço: Faculdade de Ciências e Tecnologia - R. Mucuri, s/n - St. Conde dos Arcos, Aparecida
de Goiânia - GO, 74968-755, Aparecida de Goiânia-GO

E-mail: fnbelchior@ufg.br

Gustavo Dias de Oliveira

Especialização em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal de Goiás

Endereço: Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação -Av. Universitária, n.º 1488 -
quadra 86 - Setor Leste Universitário- CEP: 74605-010, Goiânia-GO

E-mail: gustavodias@ufg.br

Josephy Dias Santos

Graduação em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal de Goiás

Endereço: Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - Av. Universitária, n.º 1488 -
quadra 86 - Setor Leste Universitário - CEP: 74605-010, Goiânia-GO

E-mail:josephyds@ufg.br

Sandrerley Ramos Pires

Graduação em Engenharia Elétrica

Instituição: Universidade Federal de Goiás

Endereço: Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação -Av. Universitária, n.º 1488 -
quadra 86 - Setor Leste Universitário -CEP: 74605-010,Goiânia-GO

E-mail:sandrerley@ufg.br

RESUMO

Este trabalho visa analisar a própria produção de electricidade de um sistema fotovoltaico ligado à rede (GCPS) instalado na Universidade Federal de Goiás (UFG). O GCPS foi instalado durante o projecto P&DI foi executado entre a UFG e a ENEL-GO. O projecto incluiu a instalação de 120 contadores de energia eléctrica e um sistema completo de monitorização para várias grandezas eléctricas. A análise da geração contemplada neste artigo aborda aspectos tais como: perfil de tensão, potência e perfil energético gerado, análise de distorção harmónica de tensão e corrente, retorno do investimento e poupança de emissões de CO₂. Este último aspecto é muito importante para o ambiente. No final, foram tiradas conclusões relativamente a estas análises. Este estudo é necessário, uma vez que o bom funcionamento do inversor e dos módulos fotovoltaicos está relacionado com o produto de energia eléctrica. Assim, a análise é fundamental para determinar se as condições operacionais e os projectos são adequados, bem como o retorno do investimento.

Palavras-Chaves: Monitorização do Sistema Eléctrico, Distorção Harmónica, Geração Fotovoltaica, Smart Grid.

ABSTRACT

This work aims to analyze the own electricity generation of a grid-connected photovoltaic system (GCPS) installed at the Federal University of Goiás (UFG). The GCPS was installed during the P&DI project was executed between UFG and ENEL-GO. The project included the installation of 120 electric energy meters and a complete monitoring system for several electrical quantities. The analysis of the generation contemplated in this article address aspects such as: voltage profile, power and energy profile generated, harmonic distortion analysis of voltage and current, investment payback and CO₂ emission savings. This last aspect is very important for the environment. In the end, conclusions were drawn regarding these analyzes. This study is necessary, since the proper functioning of the inverter and the photovoltaic modules is related to the electrical energy product. Thus, the analysis is fundamental to determine if the operational conditions and the projects are adequate, as well as the return on investment.

Keywords: Electrical System Monitoring, Harmonic Distortion, Photovoltaic Generation, Smart Grid.

1 INTRODUÇÃO

A chamada ANEEL N^o. 001/2016 [1], denominada de “Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior”, propiciou o contexto do projeto o qual este artigo aborda.

A Universidade Federal de Goiás (UFG) [2] e a Enel Goiás [3] participaram deste edital, tendo sido contempladas para a realização do projeto. A aprovação refere-se à realização de dois subprojetos, sendo o primeiro deles, um projeto de eficiência energética (EE) e o segundo um de pesquisa e desenvolvimento (P&D) que usufruirá da infraestrutura desenvolvida no primeiro.

Para demonstrar a importância dessa aprovação, ressalta-se que, de oitenta propostas de projetos apresentados à ANEEL, apenas onze propostas foram aprovadas, entre elas, a postulada pela Enel em parceria com a UFG e que resultou neste projeto. Os resultados do projeto levaram a UFG a economizar o equivalente a uma fatura mensal de energia eléctrica por ano.

August 10th, 2020. This work was supported by Enel Distribuição Goiás.

M S. de Castro, is with Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 74605-220, Brasil, (e-mail: mcastro@ufg.br).

F. N. Belchior, is with Universidade Federal de Goiás, Aparecida de Goiânia/GO, 74968-755, Brasil, (e-mail: fnbelchior@ufg.br).

G D. de Oliveira, is with Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 74605-220, Brasil, (e-mail: gustavodias@ufg.br).

J D. Santos, is with Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 74605-220, Brasil, (e-mail: josephyds@ufg.br).

S. R. Pires, is with Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 74605-220, Brasil, (e-mail: sandrerley@ufg.br).

O projeto de eficiência energética se propôs a atuar em duas frentes, a primeira a modernização do sistema de iluminação da universidade e a segunda na criação de uma estrutura de geração de energia elétrica na própria universidade.

A estrutura criada pelo projeto de eficiência energética foi o objeto de estudo que motivou e instrumentalizou os estudos realizados no projeto de P&D, o P&DI 656. Em parceria com a Enel Distribuição Goiás, foram instaladas 24.993 lâmpadas de tecnologia LED e 2.522 placas solares em unidades da Regional Goiânia da UFG. Além disso, foi realizado monitoramento em 120 pontos estratégicos da universidade e várias medidas estão disponíveis para impulsionar ações educativas e pesquisas sobre o tema.

A Deode Inovação & Eficiência [4] foi a empresa contratada pela Enel para adequar as instalações da UFG aos padrões da eficiência energética previstos pelo projeto. As lâmpadas LED foram instaladas em três prédios do Campus Samambaia e em um prédio do Colemar Natal e Silva. As placas solares foram instaladas em quatro pontos específicos da universidade, ficando a maior concentração delas no telhado do centro de eventos da Universidade. Um *software* foi desenvolvido com o intuito de monitorar os pontos de energia, tanto no que diz respeito ao consumo quanto à geração das miniusinas solares. Painéis instalados em alguns pontos da universidade mostram esse balanço energético, o que a UFG está economizando e o que está sendo salvo de gás carbônico.

O presente artigo técnico/científico visa mostrar os resultados atingidos com o projeto de P&D 656, bem como aspectos associados a custos envolvidos e análise de custo-benefício, baseado em medições já realizadas nas usinas fotovoltaicas instaladas e monitoradas. O diferencial do presente artigo, perante outros trabalhos publicados, se diz respeito ao sistema completo de monitoramento, compreendido por mais de 100 medidores instalados nos campi da UFG, criando uma rede de monitoramento online durante 24 horas por dia, 365 dias por ano.

2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Esta seção discorre sobre alguns aspectos teóricos fundamentais sobre geração fotovoltaica para uma melhor leitura do trabalho.

2.1 ENERGIA RENOVÁVEL

A demanda por energia no Brasil aumentou significativamente nas últimas décadas, principalmente na área industrial [5]. Tendo em vista à crescente demanda de eletricidade em conjunto com as preocupações ambientais, são essenciais novos investimentos em energias renováveis para atender essas demandas sem contribuir para o aumento do aquecimento global [6].

Dentre os principais entraves para a disseminação do uso da tecnologia de geração de energia através de fontes renováveis podem ser destacadas: o custo de instalação mais elevado que o custo das não renováveis, a falta de compatibilidade da rede de transmissão e energia, a descentralização da produção e a distribuição de energia. Além disso inexistência das instituições ao lidar com os incentivos para a instalação de sistemas de geração a partir de fontes renováveis [7].

O incentivo governamental é essencial para que o mercado de energia renovável se desenvolva. Byrnes [7] argumenta que entraves políticos acarretam em barreiras para novos entrantes no mercado de energia renovável, por tornar o investimento inviável do ponto de vista financeiro. Em [8] ressalta que, depois da fonte hidráulica, as alternativas renováveis mais utilizadas no Brasil são a energia fotovoltaica e a eólica. Como a demanda global por energia solar está em ascensão, associado ao interesse de sustentabilidade da sociedade, o desenvolvimento e a implantação de tecnologias usando painéis fotovoltaicos também está aumentando [9].

2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

As fontes de energia renovável vêm de recursos naturais que tendem a ser naturalmente reabastecidos, como o sol. Sua irradiação é considerada infinita e gratuita, além de ter um gigantesco potencial para crescimento. De acordo com [10], o Brasil vem se preparando para a energia solar, sendo atualmente subaproveitada e sua implantação ainda engatinha no país. Segundo [11], a popularidade de aparelhos inteligentes, além da democratização dos preços de energias renováveis, somados às incertezas dos preços no mercado de energia padrão, fazem com que mais e mais pessoas adotem o modelo de geração de energia solar fotovoltaica.

Como dito, um sistema fotovoltaico converte a radiação do sol em eletricidade utilizável. O efeito fotovoltaico foi registrado pela primeira vez graças ao físico francês Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, porém, a primeira célula fotovoltaica só viria a ser concebida 44 anos depois. Fato curioso é que o primeiro local de grande desempenho e aplicação prática onde células fotovoltaicas atuaram foi em missões espaciais para gerar energia para o consumo de estações espaciais, já que seu custo era bastante elevado, fator que felizmente vem se modificando ao longo dos anos graças a aplicabilidade crescente de energia fotovoltaica que acompanha o aumento de sua eficiência e queda dos seus custos.

Segundo [12], o sistema fotovoltaico consiste num sistema de energia composto por diversas placas solares que absorvem a irradiação solar e a converte em energia elétrica, logo, eles se localizam-se geralmente, para sua maior eficiência, nos telhados de residências ou em fazendas de arrendamento e usinas elétricas a céu aberto, contando com a presença de um conversor que alterna a corrente contínua para uma corrente alternada.

Portanto, existem diversas modalidades de sistemas fotovoltaicos, que servem às diversas necessidades, atendendo ao cidadão metropolitano, agregando-se à rede elétrica, assim como ao cidadão que vive no campo ou em regiões afastadas, nas quais o sistema fornece energia para eletrodomésticos, equipamentos e luz.

Segundo Nascimento, [12] ao redor da energia fotovoltaica ocorrem diversos ganhos, como uma diversificação da matriz energética que consiste na autossustentabilidade e preza por uma consciência socioambiental, além de uma redução das perdas e carregamento das redes, reduzindo os custos de produção de energia e encurtando o processo, assim como uma economia para o seu utilizador. A instalação de um sistema fotovoltaico pode caracterizar-se como um investimento e possui um grande potencial de retorno financeiro, já que o equipamento, em média, produz em energia o valor de seu custo em 3 anos e possui uma vida útil média maior que 20 anos.

Graças ao desenvolvimento contínuo e expressivo da energia fotovoltaica, os custos de seus sistemas tornam-se cada vez mais acessíveis ao longo dos anos, sendo que, a energia solar possui um potencial muito maior que fontes de energia como: geotérmica, hidráulica, biomassa e eólica, dessa forma, esta energia se pluraliza ao redor do mundo ao decorrer do tempo.

Na Fig. 1 é ilustrado um exemplo de um sistema fotovoltaico em uma residência. O sistema fotovoltaico pode ser formado por 4 componentes: o painel fotovoltaico, o controlador de carga, as baterias e o inversor de corrente. Os painéis fotovoltaicos fazem o papel de coração, “bombeando” a energia para o sistema. São equipamentos capazes de converter a energia presente na luz por meio dos fótons em energia elétrica. Isso ocorre, pois, os materiais que constituem esses componentes são semicondutores dopados com outros elementos [13]. A instalação pode ser composta por um ou mais painéis e são dimensionados de acordo com a energia necessária. Já o controlador de carga, funciona como válvulas para o sistema. Servem para evitar sobrecargas ou descargas exageradas na bateria, aumentando sua vida útil e desempenho. Já as baterias são utilizadas para armazenar a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado quando não há sol. Geralmente são utilizadas em sistemas isolados. Por fim, o inversor é o cérebro do sistema. Os inversores são dispositivos que têm a função de converter a corrente contínua proveniente dos painéis solares em corrente alternada para, assim, poder ser conectada com a rede elétrica [14]. No caso de sistemas conectados, também são responsáveis pela sincronia com a rede elétrica.

Fig. 1. Exemplo de um sistema fotovoltaico em uma residência [15].



Na mesma direção que este artigo, outros trabalhos [16, 17, 18, 19] mostram os resultados de sistemas fotovoltaicos em funcionamento, respectivamente na cidade de Quito/Equador, no estado do Piauí/Brasil, no Rio Grande do Norte-Brasil e na Argentina. A diferença que se percebe entre esses trabalhos e o presente artigo, como já dito, é a capacidade de monitoramento de diversas grandezas elétricas nas usinas fotovoltaicas e demais prédios dos campi da UFG, compreendendo 120 medidores espalhados pelos diversos barramentos dentro das instalações da instituição.

3 SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA INSTALADO NA UFG

Foram instalados 2.478 painéis solares na cobertura de 4 prédios da instituição, o que corresponde a uma capacidade instalada de 819,8 kWp de geração, conectados aos painéis de distribuição de baixa tensão da UFG.

Foram utilizados módulos de 330Wp, que foram conectados eletricamente, formando grupos em série e paralelo, a fim de se atingirem os requisitos de tensão e corrente de cada um dos inversores (Potência de 30kW cada). Considerando um painel solar típico com potência individual de 330 Wp e área de 1,94 m², determina-se uma densidade de potência de 170,7 W/m². Ao todo, o sistema terá uma capacidade média de geração de energia estimada de 1.212,91 MWh/ano, conforme Tabela 1.

Tabela I - Dados de geração Fotovoltaica na UFG

Local	Produção anual estimada (MWh)	Número de módulos	Potência instalada (kW)	Número de inversores
CE	562,30	1160	382,8	10
EMAC	242,70	490	161,7	4
BC	348,50	703	232,0	6
CAE	59,41	125	41,3	1
Total	1212,91	2478	817,8	21

Onde: CE – Centro de Eventos, EMAC – Escola de Música e Artes Cênicas, BC – Biblioteca Central, CAE – Centro de Aulas das Engenharias

A Fig. 2 mostra como ficaram dispostas as instalações das placas solares no Centro de Eventos, EMAC e Biblioteca Central da Universidade, no campus Samambaia.

Fig. 2. Visão geral das usinas solares do Campus Samambaia.



Conforme já mencionado, a unidade de conversão consiste no uso de um inversor de 30kW. A Fig. 3 apresenta uma foto do inversor utilizado, enquanto a Tabela II mostra as características do mesmo e a Tabela III mostra a distribuição de painéis fotovoltaicos para cada entrada do inversor.

Fig. 3. Inversor Huawei Sun2000 33KTL-A instalados nas usinas Fotovoltaicas da UFG



Tabela II- Características Técnicas do Inversor [20]

Fabricante:	HUAWEI
Modelo:	SUN2000 SUN2000-33KTL-A
Número de rastreadores:	4
Entrada para rastreador:	2
Características elétricas	
Potência nominal:	30 kW
Potência máxima:	33 kW
Potência máxima por rastreado	7,7 kW
Tensão nominal:	620 V
Tensão máxima:	1100 V
Tensão mínima por rastreador:	200 V
Tensão máxima por rastreador:	1000 V
Tensão máxima de saída:	400 Vac
Corrente nominal:	88 A

Corrente máxima:	88 A
Corrente máxima por rastreador:	22 A
Rendimento:	0,98

Tabela III- Outras Características gerais do inversor.

Inversor	MPPT 1	MPPT 2	MPPT 3	MPPT 4
Módulos em série:	20	20	20	20
Conjunto de módulos em paralelos:	2	2	1	1
Exposições:	1	1	1 (2)	1 (2)
Tensão MPPT (STC):	728 V	728 V	728 V	728 V
Número de módulos:	40	40	20	20

4 SISTEMA DE MEDIÇÃO INSTALADO NA UFG

A infraestrutura da rede de medidores da Universidade Federal de Goiás foi montada com o intuito de permitir o monitoramento do consumo energético em vários níveis, desde uma medição geral, de maneira semelhante ao que é feito pela concessionária de energia, passando por uma medição em cada QDC de cada prédio, até a medição de um equipamento específico como, por exemplo, o sistema de ar condicionado de um centro de aulas. Além disso, essa infraestrutura deve contemplar o monitoramento da Potência Gerada pelas plantas fotovoltaicas instaladas na Universidade, tal como analisado em [21].

Cada medidor em cada um desses pontos é um escravo da rede Modbus [22] de medição e possui um identificador próprio que o separa dos demais, portanto deve-se ter um elemento mestre para gerenciar a estrutura, permitindo requisitar os dados de medição, cadastrar novos medidores, alterar endereçamento IP, identificar o status atual de cada medidor.

Na sequência, será descrito cada tipo de ponto de medição e após isso, será exposto um diagrama esquemático da rede. Todos os dispositivos utilizados na rede de medição são da marca CCK [23], incluindo o *software* de monitoramento que cria o mestre da rede para fazer o gerenciamento dos escravos.

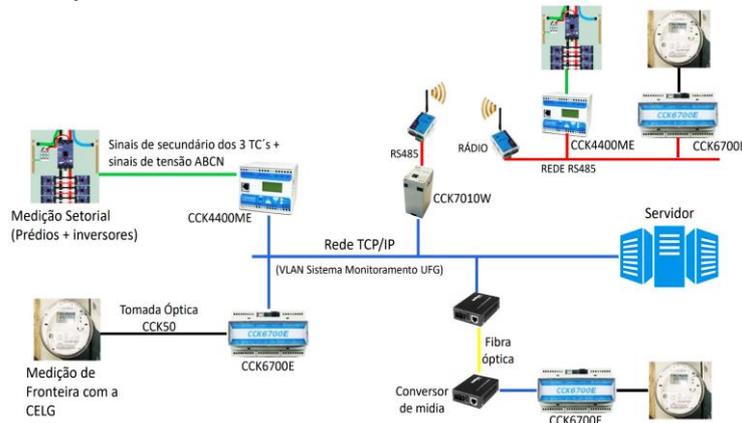
4.1 MEDIÇÃO DE FRONTEIRA

Na medição de fronteira, foi instalado o dispositivo CCK 6700E, que é responsável por fazer a medição das fases, onde através de uma tomada de isolamento ótica CCK 50, ele se conecta ao medidor da concessionária, fazendo assim, a leitura dos dados e armazenando-os em uma memória de massa

medição é feita através de conexão com a saída do inversor do sistema gerador, enviando os dados para o mestre da rede através dos três tipos de comunicação disponíveis.

Descrito os modos de medição e comunicação dos diferentes pontos da rede, pode-se resumir todos os modos de conexão utilizados para os vários cenários da rede de medições através do diagrama esquemático da Fig. 5.

Fig. 5. Diagrama Esquemático Rede Modbus de Monitoramento da Universidade Federal de Goiás



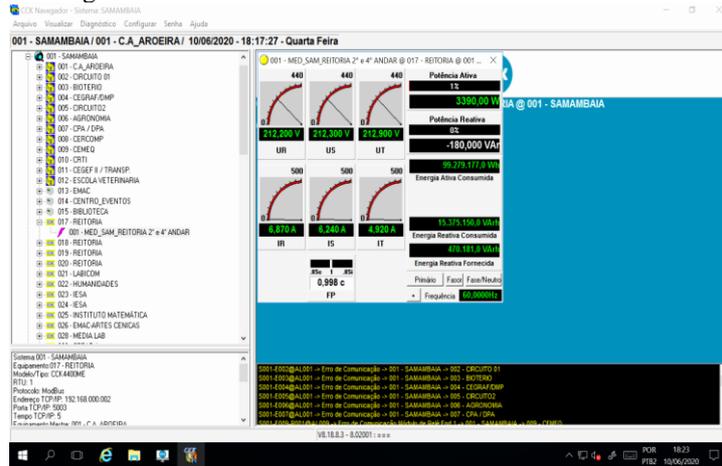
4.3 O SISTEMA CCK – GERENTE

Parte integrante do SISTEMA CCK, disponível para o Sistema Operacional Windows, com recursos de utilização através de rede de microcomputadores, este programa é uma poderosa ferramenta para o gerenciamento do consumo de energia elétrica e utilidades, onde, além da capacidade de aquisição, armazenamento e processamento dos dados medidos pelos equipamentos CCK, permite a monitoração em tempo real dos diversos pontos conectados ao SISTEMA CCK.

O programa possibilita que os dados coletados nos equipamentos CCK sejam compartilhados na rede local da UFG, protegida de acesso externo por políticas de firewall e acessos via *Virtual Private Network* (VPN), para impedir acessos indevidos. Permite a obtenção exata da relação CUSTO/CONSUMO/PRODUÇÃO, com emissão de relatórios precisos e objetivos de todo o gerenciamento de energia e utilidades, de forma global ou por centro de custo.

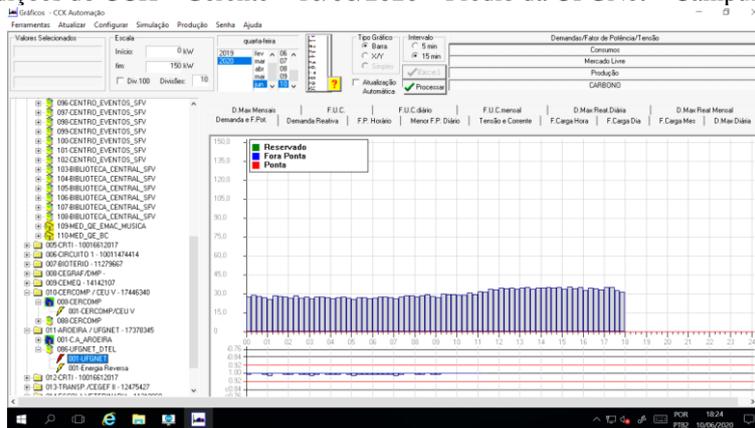
A Fig. 6 mostra a tela de acesso as medições do dia 10 de junho de 2020, referentes parte do consumo (medidor do 2º e 4º andares) do prédio da Reitoria da Universidade Federal de Goiás, situada no Campus Samambaia.

Fig. 6. Telas do Sistema de CCK – Gerente – 10/06/2020



A Fig. 7 apresenta o gráfico gerado pelo Sistema CCK – Gerente com o consumo do prédio da UFGNet, que abriga parte dos equipamentos da rede de dados e o Sistema de Vigilância, que funcionam 24 por 7, 365 dias do ano.

Fig. 7. Medições do CCK – Gerente – 10/06/2020 – Prédio da UFGNet – Campus Samambaia.



4.4 O SISTEMA WEBCCK

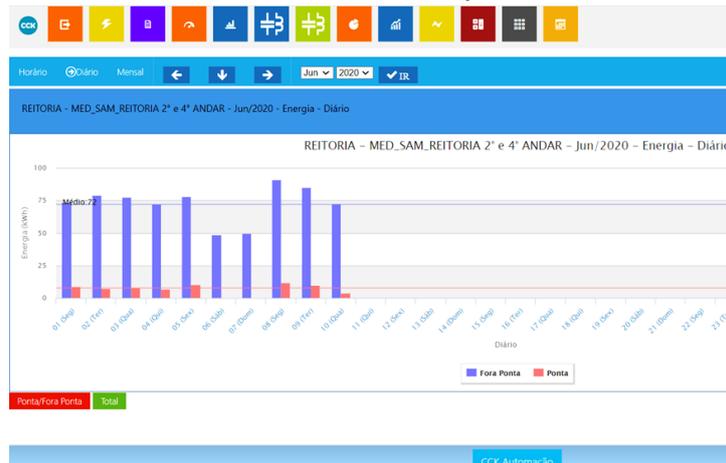
O WEBCCK é uma versão Sistema de Gerenciamento CCK para intranet utilizando o navegador de internet como interface. Por ser uma aplicação web, é possível ter o acesso as principais informações do Sistema CCK – Gerente, de qualquer ponto da rede interna e externa (Internet), desde que liberado pelo departamento de T.I. da empresa. O WEBCCK é integrado ao Sistema CCK Gerente já existente, permitindo acesso rápido e simples as grandezas monitoradas.

O ambiente operacional instalado para o projeto de P&D 656 permite, via WEBCCK, acesso às leituras das grandezas obtidas das diversas fontes de geração solar instaladas na universidade, bem como a visualização de forma consolidada. O processo de navegação da aplicação é simples e pode ser acessado através de link que é atendido pelo servidor do projeto.

Para cada uma das unidades de geração pode-se efetuar a leitura de gráficos, planilhas e relatórios reportando, no tempo, as informações geradas pelo processo de leitura.

A Fig. 8 mostra algumas das informações que podem ser obtidas a partir do WEBCCCK, para o prédio da Reitoria da Universidade Federal de Goiás, situada no Campus Samambaia, com informações graficamente diferentes das mostradas na Fig. 6, retirada do Sistema CCK – Gerente.

Fig. 8. Perfil de demanda obtido em mostrado pelo WEBCCCK – 10/06/2020.



5 ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS INSTALADOS

Os resultados referentes a energia gerada com a produção de energia por fonte alternativa, foram analisados quanto aos aspectos dos parâmetros de qualidade de energia nos sistemas instalados.

Diante das especificações dos medidores CCK instalados nos sistemas fotovoltaicos da UFG e nos barramentos destas usinas fotovoltaicas, neste item são apresentadas as análises realizadas para diferentes grandezas, sendo elas:

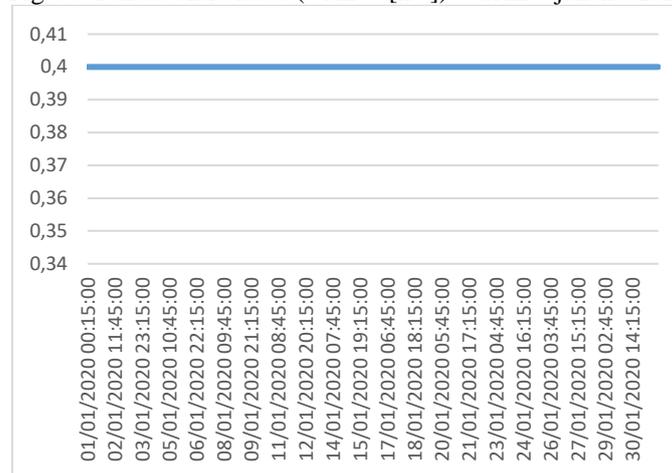
- Tensão entre fases (kV);
- Potência ativa (kW);
- Energia ativa (kWh);
- Distorção harmônica de tensão (%);
- Distorção harmônica de corrente (%).

Apesar de ser possível verificar essas grandezas em todas as usinas de geração fotovoltaica instaladas, para este artigo serão mostrados os resultados obtidos no Centro de Aulas das Engenharias (CAE), no mês de janeiro de 2020.

5.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO DO CAE

A Fig. 9 apresenta o perfil da tensão entre fases (AB), no mês de janeiro de 2020. Ela se apresentou com um nível constante ao longo deste mês de medição, próximo aos 380V, conforme esperado [24].

Fig. 9. Tensão entre fases (VAB – [kV]) – CAE – janeiro/2020



A Fig. 10 mostra o perfil da potência ativa [kW] referente a janeiro de 2020. A partir dela é possível ver o aumento da potência gerada ao longo de cada dia de geração, tendo valores nulos nos períodos noturnos, conforme esperado.

A Fig. 11 mostra o perfil da energia ativa [kWh] em janeiro de 2020. É possível observar que a energia gerada é similar à potência mostrada, para o mesmo mês de análise. Fazendo a somatória mensal, chega-se a 4.459,80 kWh gerados, o que revela uma média de 143,86 kWh diários gerados.

A Fig. 12 apresenta a distorção harmônica total de tensão em percentual (DHTv) em cada fase. O limite máximo permitido para a distorção harmônica total de tensão, segundo [19], é de 10%. Assim sendo, tem-se que em nenhuma das tensões o limite foi excedido. Mais ainda, é possível observar que a distorção harmônica total ficou abaixo de 3% para todas as tensões.

A Fig. 13 apresenta a distorção harmônica total de corrente em percentual (DHTi%) das fases 1, 2 e 3, respectivamente. Em todas as fases percebe-se o mesmo comportamento: há um pico de distorção harmônica no começo do dia (quando o SFV inicia a geração de potência), durante o dia a distorção cai até um valor mínimo e depois volta a subir até quando ocorre picos de maior valor ao final do dia (momento em que o SFV diminui a geração) e vai a zero nos momentos que o SFV cessa a geração de potência, devido à falta de irradiação solar (períodos durante a noite e na madrugada até início da manhã do dia seguinte). A Fig. 14 detalha a 1ª semana de janeiro de 2020, a fim de facilitar as análises e visualização.

Fig. 10. Potência ativa [kW] – CAE – janeiro/2020

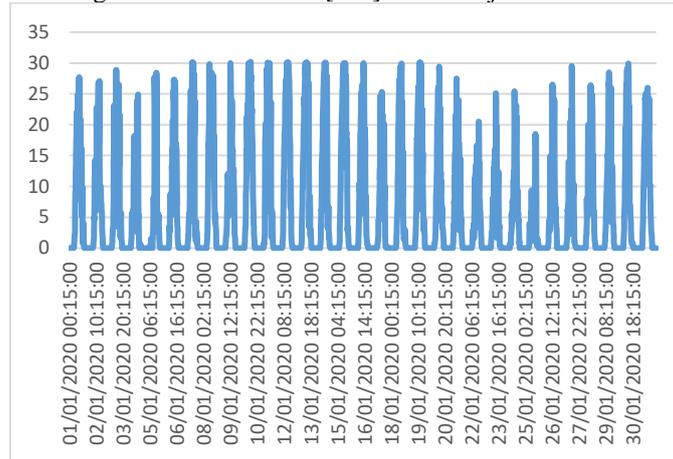


Fig. 11. Energia ativa [kWh] – CAE – janeiro/2020

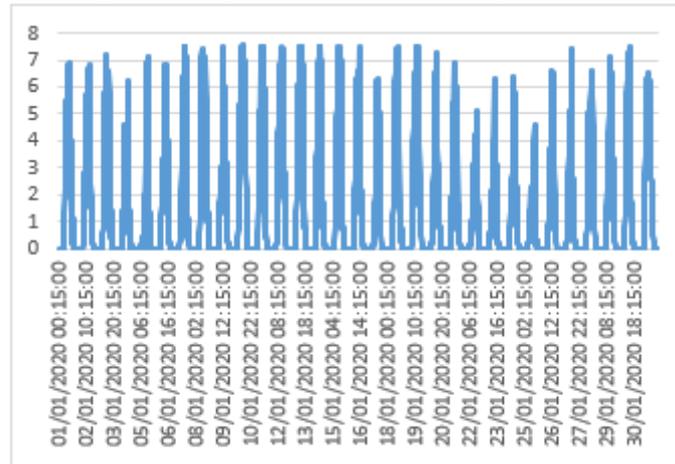


Fig. 12. Distorção harmônica total de tensão (DHTv) [%] – CAE – janeiro/2020

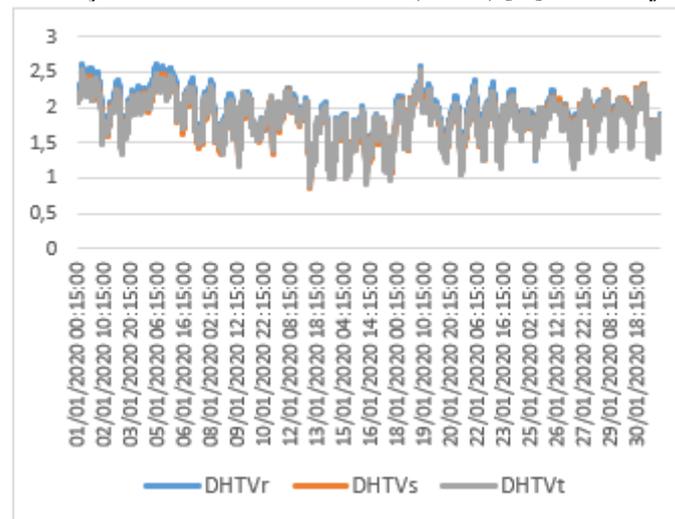


Fig. 13. 1 Distorção harmônica total de corrente (DHTi [%]) – CAE – janeiro/2020

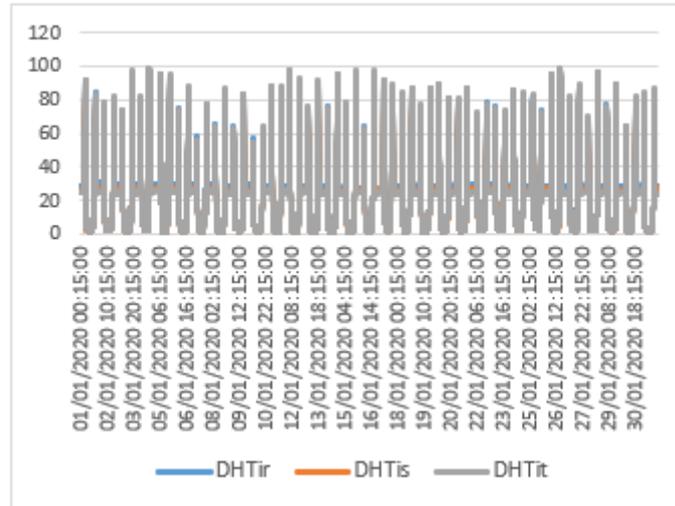
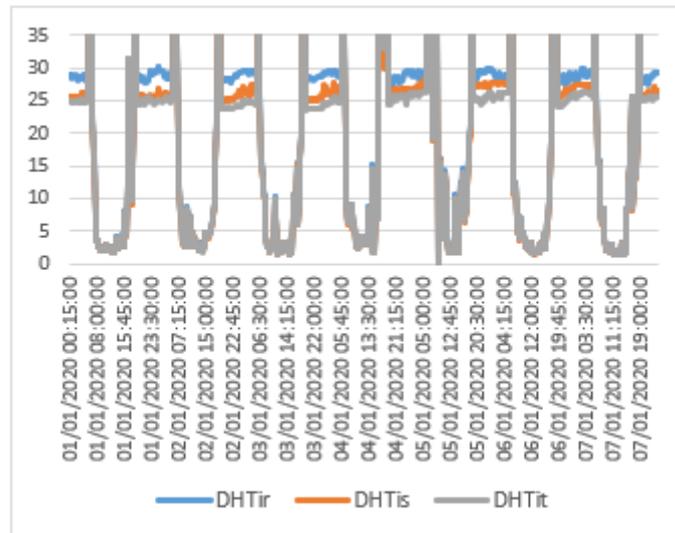


Fig. 14. Distorção harmônica total de corrente (DHTi [%]) – CAE – 1ª semana de janeiro/2020

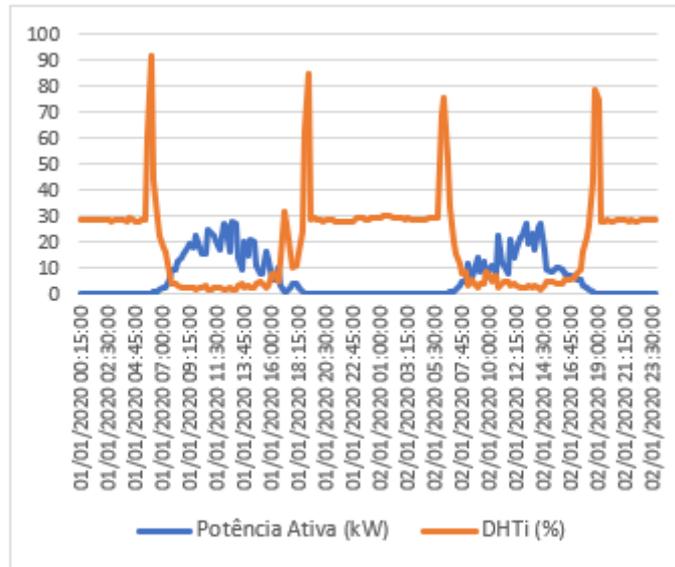


É possível observar que para todas as fases a $DHTi\%$ ao longo do dia ficou menor que 5%, que era o período de geração de potência pelo sistema fotovoltaico. No início e no fim da geração de potência ao longo dos dias (momentos que ocorreram os picos de distorções harmônicas) os valores registrados ficaram próximos a 80%. Como os valores das correntes no início e término de geração fotovoltaica são muito pequenos, estes percentuais não causam problemas no sistema elétrico local.

A Fig. 15 apresenta uma comparação entre os perfis da potência ativa (kW) e a distorção harmônica total de corrente para os dias 01/01/2020 e 02/01/2020. O primeiro detalhe a ser observado é que quanto mais potência se gera, menor tende a ser a distorção harmônica. Isso é verdade já que o percentual de distorção harmônica é calculado pela razão entre o valor do componente harmônico pela corrente fundamental. Percebe-se uma variação grande de potência ativa, ocorrida,

provavelmente, pela ocorrência de nuvens durante o dia, fazendo com que a irradiação solar variasse, e, portanto, variando também a geração de energia do sistema fotovoltaico.

Fig. 15. Análise do perfil da potência ativa versus a distorção harmônica percentual total de corrente – CAE - 01/01/2020 e 02/01/2020



5.2 ANÁLISE DE RETORNO DO INVESTIMENTO

A fim de facilitar as análises comparativas de geração das usinas fotovoltaicas em operação nos prédios da UFG, a Tabela traz um resumo do que foi mostrado, acrescido do valor do [kWh] coletados das faturas de energia elétrica da Enel Distribuidora Goiás para correspondentes meses analisados, para todas as usinas fotovoltaicas da UFG.

Tabela IV comparativo de geração das usinas fotovoltaicas da UFG

Usina	Período analisado	Energia gerada diária (kWh)	Energia gerada mensal (kWh)	Tarifa FP – Enel (R\$)	Economia mensal (R\$)
CAE	Jan./20	143,86	4.459,80	0,49639	2.213,80
EMAC	Jan./20	629,31	19.508,60	0,49639	9.683,87
BC	Jan./20	917,51	28.442,80	0,49639	14.118,72
CE	Dez./19	1.428,13	44.272,00	0,48084	21.287,75

A Tabela IV apresenta um estudo realizado na usina instalada no Centro de Aulas das Engenharias (CAE), por ser a usina com maior tempo de funcionamento e cujos dados permitem uma análise de geração no período de 10 meses completos (não se tem dados completos do mês de fevereiro de 2020). O valor da tarifa da ENEL [3] foi de R\$ 0,49639/kWh para o mês de janeiro de 2020 e para os demais meses, de R\$ 0,48084/kWh.

Tabela V - Comparação de geração na usina do CAE

Ano	Mês	Energia Total medida (kWh)	Economia (R\$)	Fator de Emissão Médio (tCO ₂ /MWh) - MENSAL	Redução Anual na Emissão de CO ₂ (t)
2019	Abr.	4.325,80	2.080,02	0,5095	2.204,00
2019	Mai	2.941,50	1.414,39	0,4794	1.410,16
2019	Jun.	4.151,56	1.996,24	0,4175	1.733,28
2019	Jul.	4.349,36	2.091,35	0,5914	2.572,21
2019	Ago.	4.354,96	2.094,04	0,5312	2.313,35
2019	Set.	4.567,34	2.196,16	0,5606	2.560,45
2019	Out.	5.040,43	2.423,64	0,5370	2.706,71
2019	Nov.	4.559,55	2.192,42	0,5720	2.608,07
2019	Dez.	4.849,28	2.331,73	0,5997	2.908,11
2020	Jan.	4.464,77	2.216,27	0,5181	2.313,20
Total (10 meses)		43.604,57	21.036,25		23.329,54
Média (10 meses)		4.360,46	2.103,62		

A tabela V apresenta os cálculos da redução anual de emissão de CO₂ com base na geração média medida da usina do CAE. Este chegou aproximadamente a 28 toneladas por ano.

Tabela VI- Retorno do Investimento

Material (R\$)	Execução (R\$)	Total (R\$)	Redução Anual na Emissão de CO ₂ (kg)	Tempo de ROI (anos)
90.511,85	73.567,42	164.079,27	27.995,44	6,50

A tabela VI apresenta também os cálculos de tempo para o retorno do investimento, com base na média dos 10 meses de medições realizadas na usina do CAE, com previsão de 6,5 anos, valor este compatível com os apresentados em projetos similares.

6 CONCLUSÕES

Os resultados do projeto estratégico, do ponto de vista do valor econômico, foram de fundamental valor para a universidade, permitindo um redirecionamento significativo dos gastos antes efetuados com pagamento de energia elétrica. O aprendizado obtido com o projeto permitirá que a UFG aumente mais ainda o uso dessa forma de geração de energia, bem como na disseminação de equipamentos com menor consumo de energia.

O projeto de P&DI 656 está ainda em andamento a fim de atingir outras metas estabelecidas para ele. Porém, a estrutura de monitoramento, que é um de seus principais objetivos está concluída. Embora em constante aprimoramento, principalmente dos *softwares* de armazenamento e recuperação de dados da base histórica, a estrutura de monitoramento já oferece uma base histórica capaz de subsidiar de forma importante a realização de pesquisas.

Mais desenvolvimento ainda se faz necessário principalmente para tornar mais ágil o processo de recuperação de informações da base histórica de medições.

Verificou-se que, para todas as 4 usinas de geração fotovoltaica, os níveis de tensão estão conforme a normatização, bem como as distorções harmônicas de tensão. Quanto à geração de energia, ela se encontra dentro dos valores esperados, de acordo com as potências instaladas, fazendo com que o *payback* e diminuição dos níveis de CO₂ emitidos no meio ambiente estejam bem coerentes com a literatura.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido dentro das pesquisas realizadas no Projeto de P&D número PD-06072-0656-2017, da Chamada Aneel 001/2016, financiado pela Enel Distribuidora.

REFERÊNCIAS

- [1] Chamada ANEEL N°. 001/2016, Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: “Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior”, <http://www.aneel.gov.br/documents/656831/15136291/Chamada+Priorit%C3%A1rio+e+Estrat%C3%A9gico+001++2016++V10+%28revis%C3%A3o+do+edital%29.pdf/41ea76fd-a85a-fc98-4921-96ea4b4a4048>, Acesso em : agosto de 2020.
- [2] Universidade Federal de Goiás (UFG), <https://www.ufg.br/>, Acesso em: agosto de 2020.
- [3] Enel Goiás, <https://www.enel.com.br/pt-goias.html>, Acesso em: agosto de 2020.
- [4] Deode Inovação & Eficiência, <https://www.deodenergia.com/>, Acesso em: agosto de 2020.
- [5] Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Nota Técnica DEA: Estudos da eficiência energética - Consumo de energia no Brasil: Análises setoriais, 116pp, Rio de Janeiro, 2014.
- [6] A. R. Queiroz, L. M. M. Lima, J. W. M. Lima, B. C. Silva, L. A. Sciannic, “Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system”. *Renewable energy*, v. 99, p. 379-389, 2016.
- [7] L. Byrnes, C. Brown, J. Foster, L. Wagner, “Australian renewable energy policy: Barriers and challenges”. *Renewable Energy*, v. 60, p. 711-721, 2013.
- [8] D. Malagueta, A. Szklo, B. S. M. CesarBorba, R. Soria, R. Aragão, R. Schaeffer, R. Dutra, “Assessing incentive policies for integrating centralized solar power generation in the Brazilian electric power system”. *Energy Policy*, v. 59, p. 198-212, 2013.
- [9] E. F. Mallory, K. S. Matthew, W. P. Ara, S. B. Dmitriy, K. M. Jenna, Y. Luke. “Climate impacts on the cost of solar energy”. *Energy Policy*, v. 94, p. 264-273, 2016.
- [10] A. Upadhyay, “Brazil Announces Huge 350 MW Floating Solar Power Plant”. April 6th, 2015.
- [11] C. Lacchini, J. C. V. Santos, “Photovoltaic energy generation in Brazil – Cost analysis using coal-fired power plants as comparison”. *Renewable Energy*, v.52, p.183-189, 2013.
- [12] C. A. Nascimento, “Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica”. M.S. thesis, Universidade Federal de Lavras, 2004.
- [13] C. Cabral, “Energia Fotovoltaica”. Universidade Federal de Viçosa. MG – Brasil, 2001.
- [14] F. Pereira, M. Oliveira, “Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica”. Porto: Publindústria, 2011.
- [15] Portal Solar. Passo a passo da fabricação do painel solar. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>> Acesso em: agosto de 2020.

- [16] P. Benalcázar, J. Lara, M. Samper, "Distributed Photovoltaic Generation in Ecuador: Economic Analysis and Incentives Mechanisms," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 03, pp. 564-572, March 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082728.
- [17] F. Morais, A., Moraes, F. Barbosa, "Technical-economic analysis of the first mini-generation photovoltaic system of Piauí, Brazil," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 10, pp. 1706-1714, October 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8986449.
- [18] R. Vieira, M. I. Guerra, S. Bandeira, "Analysis of the Power Quality of a Grid-Connected Photovoltaic System," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 04, pp. 714-721, April 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082214.
- [19] G. Coria, F. Penizzotto, R. Pringles, "Economic Analysis of Rooftop Solar PV Systems in Argentina," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 01, pp. 32-42, January 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9049459.
- [20] Manual do usuário do SUN2000-(29.9KTL, 33KTL-A,36KTL, 42KTL), <https://support.huawei.com/enterprise/br/doc/EDOC1100024501>, Acesso em: agosto de 2020.
- [21] M. L. Pereira, J. R. B. Sousa, "Monitoring Systems Used in Photovoltaic Microgeneration: A Review," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 9, pp. 1671-1676, 2017, doi: 10.1109/TLA.2017.8015051.
- [22] Modicon Modbus Protocol Reference Guide, 1996 https://www.modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf, Acesso em: agosto de 2020.
- [23] CCK Automação, <https://www.cckautomacao.com.br>, Acesso em: agosto de 2020.
- [24] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST- Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 10, 2018.