

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

João Felipe Amaral Santiago

**PROPOSTA DE EXECUÇÃO DE UM MÉTODO DE GERENCIAMENTO
DE DEMANDA ATRAVÉS DO CONTROLE EXTERNO DE INVERSOR
FOTOVOLTAICO COM BATERIA**

Santa Maria, RS.

2022
João Felipe Amaral Santiago

**PROPOSTA DE EXECUÇÃO DE UM MÉTODO DE GERENCIAMENTO DE
DEMANDA ATRAVÉS DO CONTROLE EXTERNO DE INVERSOR
FOTOVOLTAICO COM BATERIA**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Curso de Engenharia de
Computação, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Vizzotto Bellinaso

Santa Maria, RS.
2022

João Felipe Amaral Santiago

**PROPOSTA DE EXECUÇÃO DE UM MÉTODO DE GERENCIAMENTO DE
DEMANDA ATRAVÉS DO CONTROLE EXTERNO DE INVERSOR
FOTOVOLTAICO COM BATERIA**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Curso de Engenharia de
Computação, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro de Computação.

Aprovado em (dia) de (mês) de (ano):

Lucas Vizzotto Bellinaso
(Presidente/Orientador)

Mauricio Sperandio (coorientador)

Ricardo Jochann Franceschi Bortolini

Santa Maria, RS.
2022

AGRADECIMENTOS

A meus pais que jamais mediram um milímetro de seus esforços para me apoiarem em tudo. Sem seu amor, empenho, sacrifícios e conselhos esse momento seria inimaginável.

Ao meu irmão, Pedro Henrique. Foi com ele que conheci a riqueza que é compartilhar alegrias com alguém.

Ao meu colega de laboratório Andrei, que sempre se pôs à disposição para me ajudar. Seu auxílio foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Profissionalmente, sou grato aos professores Lucas e Mauricio por terem me proporcionado a oportunidade de desenvolver este trabalho.

RESUMO

PROPOSTA DE EXECUÇÃO DE UM MÉTODO DE GERENCIAMENTO DE DEMANDA ATRAVÉS DO CONTROLE EXTERNO DE INVERSOR FOTOVOLTAICO COM BATERIA

AUTOR: João Felipe Amaral Santiago
ORIENTADOR: Lucas Vizzotto Bellinaso

Os constantes avanços na área de energia solar permitem que haja a ampliação da viabilidade econômica, as quais incentivam o aumento de agentes com sistemas de geração de energia doméstica. Essa expansão traz consigo, uma série de desafios para as concessionárias que administram a distribuição de energia. Um desses problemas são os potenciais riscos de sobretensão da rede, devido à grande quantidade de inversores estarem simultaneamente injetando energia. Além de enfrentar o problema da sobretensão, a bateria também é extremamente interessante para agentes que possuem taxas de cobrança as quais variam conforme a demanda, como é o caso da UFSM, que inclusive paga multas, caso seu consumo ultrapasse o limite firmado em contrato. Nesse sentido, o uso inteligente de uma bateria exige entre outras tecnologias, a utilização de supervisórios, os quais fornecem uma visão da atuação de múltiplas variáveis elétricas ao longo do tempo, viabilizando tomadas de decisão assertivas por parte do operador. Consequentemente, o objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um sistema SCADA para geração de energia fotovoltaica com bateria. Tal supervisório foi constituído por uma comunicação serial Modbus, protocolo de mensagens MQTT, linguagem de programação *Python*, banco de dados InfluxDB e o visualizador interativo Grafana. O desenvolvimento de tal sistema foi satisfatório no que diz respeito à supervisão de dados, porém as etapas de controle não atenderam os requisitos de projeto.

Palavras-chave: SCADA. Modbus. Bateria. Solis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concepção do Peak Shaving.....	20
Figura 2 - Representação da unidade de dados do protocolo.....	21
Figura 3 - Representação do cabeçalho fixo (<i>fixed header</i>).....	22

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
GW	Gigawatt
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
OSI	Open System Interconnection
IoT	Internet of Things
M2M	Machine to Machine
INRI	Instituto de Redes Inteligentes
W	Watt
kW	kilowatt
kWp	kilowatt-pico
USB	Universal Serial Bus
Ah	Ampére Hora
kWh	kilowatt hora
SSH	Secure Shell
LAN	Local Area Network

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 UNIDADE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	11
2.1.1 Inversor Fotovoltaico.....	12
2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	13
2.2.1 Baterias de Íons de Lítio.....	14
2.3 GERENCIAMENTO DE ENERGIA.....	14
2.3.1 Peak Shaving.....	15
2.4 INFRAESTRUTURA COMPUTACIONAL.....	16
2.4.1 MODBUS.....	17
2.4.2 MQTT.....	18
2.4.3 Broker.....	20
2.4.4 Banco de Dados.....	20
2.4.4.1 InfluxDB.....	21
2.4.5 Grafan.....	21
3. ARTIGO 1 - PROPOSTA DE EXECUÇÃO DE UM MÉTODO DE GERENCIAMENTO DE DEMANDA ATRAVÉS DE CONTROLE EXTERNO DE INVERSOR FOTOVOLTAICO COM BATERIA.....	22
4.DISSCUSSÕES.....	29
5.CONCLUSÃO.....	30
REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

O aperfeiçoamento das tecnologias e normas que tangem o campo da geração de energia elétrica com fontes renováveis estão, nos últimos anos, sendo responsáveis pelo elevado crescimento da quantidade de micro e minigeração distribuída instalada no país. Segundo a ANEEL (2017), após a resolução normativa 482/2012 o Brasil registrou um aumento significativo no número de conexões de consumidores que recebem crédito por terem uma micro ou mini geração de energia. Ainda segundo a agência, 99% destas instalações usam a fonte solar fotovoltaica.

Como relatado pela ANEEL (2017) há a projeção do Brasil atingir em 2024 mais de 880 mil agentes (residências, comércios e instituições) com algum tipo de fonte geradora de energia. Isso significaria que o país teria mais de 3,2 GW de potência instalada proveniente deste tipo de recurso energético.

Apesar de tal ampliação gerar impactos positivos em termos de qualidade energética, inovação e meio ambiente, existem consequências problemáticas associadas a esse contexto que se apresenta no horizonte. Para KIMAIYO (2019), o aumento das conexões de gerações fotovoltaicas somada ao aumento de cargas não lineares desafiam a qualidade de energia da rede elétrica. Isso significa que o sistema de energia pode apresentar variações de tensão, frequência e baixa confiabilidade. Portanto, o estudo do impacto e viabilidade do uso de baterias, junto aos sistemas de geração fotovoltaicos é importante para avaliar o potencial que tal dispositivo tem na solução ou mitigação de tais problemas.

As concessionárias de energia também lidam constantemente com o fato de precisar dimensionar a rede elétrica de acordo com os picos de demanda. MAHMUD (2018) argumenta que tais períodos específicos exigem um super dimensionamento em termos de tamanho dos transformadores, dos circuitos de proteção e das linhas de transmissão e distribuição. Consequentemente, sistemas de armazenamento de energia (SAE) tornam-se ainda mais interessantes em termos de otimização energética. Tratando-se de SAE, uma das técnicas mais comuns é o alívio de carga denominado *peak shaving*.

peak shaving é útil na redução da conta de eletricidade dos consumidores através do deslocamento do pico de demandas de um período de alto preço para um período de baixo preço. Além disso, melhora a qualidade e a confiabilidade da energia para os usuários (Manojkumar, 2021, p.2).

Tal estratégia consiste em definir um limite de potência que um fornecedor irá atender. Após esta definição é preciso identificar a demanda de potência instantânea que uma carga está exigindo. Com essa identificação é preciso que um dispositivo, no caso uma bateria, atenda as exigências energéticas que excedem o limite estipulado pelo fornecedor. Nos momentos em que a demanda se encontra abaixo do limite estipulado, o dispositivo de armazenamento é então carregado exclusivamente pela geração de energia local, no caso o sistema fotovoltaico.

O estudo de gerenciamento de energia com baterias exige intrinsecamente a existência de um sistema capaz de supervisionar e atuar sobre os dispositivos participantes de tal infraestrutura. Neste sentido, este trabalho tem como finalidade operacionalizar um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) para atuar em uma unidade de geração de energia fotovoltaica e que implementa a técnica de gerenciamento de energia *peak shaving*, considerando que tal gerência ocorre do lado da demanda. Ou seja, os equipamentos que dizem respeito à geração fotovoltaica, armazenamento e gerenciamento de energia encontram-se na instalação elétrica do consumidor.

Logo, para a concretização desta proposta utilizou-se o computador externo *Raspberry Pi* modelo 3 b+, tanto para se comunicar com o inversor quanto para enviar os parâmetros lidos até um *broker*. A comunicação entre o inversor e o computador externo se deu através do protocolo serial ModBus. Já para o envio de mensagens da máquina computacional até o *broker* usou-se o protocolo MQTT. Foi empregado o banco de dados InfluxDB e o aplicativo web para visualização interativo Grafana.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos que tangem à área de geração fotovoltaica, armazenamento com baterias de lítio-íon e gerenciamento de energia.

2.1 UNIDADE DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Para ser possível a geração de energia elétrica por intervenção da luz do sol uma série de fatores precisam ser levados em consideração. O rendimento de uma unidade de geração deste tipo dependerá de fatores geográficos tais como a taxa de incidência solar da região, inclinação e equipamentos escolhidos. Em relação aos equipamentos, destacam-se os dois principais, os painéis solares e o inversor. Marcado por ser uma alternativa energética renovável e ambientalmente correta, RÜTHER (2004, p.11) argumenta que os painéis solares são dimensionados para operarem sob condições climáticas diversas, portanto expostos a luz do sol, chuva, vento entre outros, apresentando um vida útil que supera os 30 anos.

A organização estrutural de uma unidade de geração consiste da conexão elétrica entre os painéis solares e o inversor, o qual por sua vez, de acordo com MÜLLER (2017) irá possuir uma interface com a rede elétrica local, sendo necessário respeitar as regulamentações que padronizam as instalações e conexões com as concessionárias. RÜTHER (2004, p.11) classifica duas formas distintas de conexão de uma unidade de geração fotovoltaica: ela pode ser isolada ou conectada à rede elétrica.

Por apresentar um comportamento intermitente devido a limitação da radiação solar, o sistema isolado, também conhecido como *off-grid*, além de não ter nenhuma conexão com a rede elétrica local, quase sempre possui algum sistema de armazenamento associado.

Já os sistemas conectados à concessionária elétrica, os também chamados sistemas *on-grid* possuem característica oposta. RÜTHER (2004, p.9) explica que:

[...] sistemas solares fotovoltaicos vêm sendo utilizados de forma interligada à rede elétrica pública [...], desta forma fica dispensado o sistema

acumulador (baterias) [...], já que a “bateria” da instalação solar fotovoltaica interligada à rede elétrica é a própria rede elétrica.

Entretanto, as inovações recentes no campo de energias renováveis iniciaram a exploração e implementação de um terceiro tipo de conexão, a híbrida. Segundo VINEETHA (2014), as unidades de geração com inversores híbridos podem operar tanto como *off-grid* quanto *on-grid*, dependendo da necessidade e utilidade. Para NOSHAHR (2020), uma das principais vantagens dos sistemas híbridos é a capacidade de seus inversores intervir na energia trocada entre geração, consumo e armazenamento, além de prevenir tanto o retorno da energia excedente para a rede de distribuição, quanto o deslocamento de carga.

2.1.1 Inversor Fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos e a bateria possuem o fluxo de energia na forma de corrente contínua CC. Entretanto CANDIDO (2010) salienta que, a grande maioria das cargas são alimentadas com corrente alternada CA. O que significa que entre o painel solar e a rede elétrica existirá um dispositivo responsável por converter a energia na forma CC para o formato CA. Tal dispositivo chama-se inversor.

Este dispositivo tem como princípio de funcionamento o emprego dos painéis solares como fonte de tensão. Essa fonte então irá se conectar com um arranjo de transistores, os quais serão polarizados e dimensionados para atuarem como chaves. As características de como cada transistor será chaveado é que irá permitir a produção de uma fonte alternada.

Importante destacar que uma rede elétrica, a qual atende as demandas energéticas das residências, comércio e indústria possui uma série de exigências, normas e padrões em relação ao modo de como a energia será entregue para as cargas que farão uso dessa. É por isso que CÂNDIDO (2010) pontua que um inversor precisa ser projetado de tal forma que seja capaz, de durante sua operação, prezar e entregar uma energia de qualidade. O que significa que variáveis elétricas como conteúdo harmônico, frequência, tensão senoidal, fator de potência possuem limites e margens de erro controladas.

2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O emprego de um banco de baterias associado ao sistema de geração fotovoltaica, durante muito tempo, tinha sua justificativa fortemente pautada pela necessidade de, sistemas isolados precisarem de um dispositivo capaz de compensar as descontinuidades entre energia entregue pelo inversor e a energia demandada das cargas. Isso porque o caráter intermitente da geração fotovoltaica faz com que ela nunca seja constante.

Entretanto, com o advento dos inversores híbridos, uma série de estratégias de gerenciamento de energia podem estar associadas às unidades de geração fotovoltaicas e o sistema de armazenamento. Uma das técnicas de gerenciamento de energia é o *peak shaving*, que para LEVRON (2012) consiste no uso de um equipamento de armazenamento de energia, o qual permite reduzir a potência vinda da rede elétrica.

Para GUNEY e col. (2017), no campo de energia solar, baterias eletroquímicas são largamente utilizadas. O princípio de funcionamento destas tecnologias de armazenamento baseia-se na exploração de reações químicas reversíveis, proporcionando a possibilidade de efetuar a carga e descarga. Ou seja, o carregamento é fundamentado em fenômenos físicos capazes de converter energia elétrica em energia química, já para descarregar o fluxo oposto acontece. Tal tecnologia é classificada, segundo GUNEY e col. (2017), como uma célula secundária. Seu processo de carregamento se dá por meio da passagem de corrente através do circuito. Já para efetuar a descarga, basta polarizar a bateria de modo a inverter o sentido da corrente. Ainda segundo GUNEY e col. (2017), baterias recarregáveis podem ser separadas em dois grupos; as com eletrólitos aquosos e não aquosos. Pode-se citar ácido de chumbo, níquel-cádmio, níquel-hidreto metálico e zinco alcalino-dióxido de manganês como exemplos de eletrólitos aquosos. Já os não aquosos, GUNEY e col. (2017) apresenta íon de lítio, metal de lítio, ar metálico, enxofre de sódio e cloreto de sódio e níquel como exemplos de materiais.

O caráter recarregável da bateria é fundamental para a execução do método *peak shaving*, portanto este trabalho faz o uso de uma bateria de íons de lítio para operacionalizar o armazenamento de energia.

2.2.1 Baterias de Íons de Lítio

Caracterizada por ser a tecnologia com maior registro de crescimento para ser empregada em sistemas de armazenamento, SERRA e col. (2016) salienta que tais baterias são capazes de lidar com altas taxas de carga e descarga e possuem alta densidade energética, em relação às demais tecnologias citadas anteriormente.

A vida útil de uma bateria de íon-lítio é de aproximadamente 10 anos, o que é 3 vezes menor do que a de um painel solar. Tal diferença exige que a interação entre bateria e inversor seja feita respeitando certos parâmetros elétricos, com o objetivo de prezar pela máxima perenidade da qualidade da bateria. Isso significa que parâmetros como tensão de flutuação de carregamento e tensão de equalização de carga.

Segundo o padrão IEEE 1881 (2016), o primeiro parâmetro, também conhecido como *floating charge* é uma tensão que se aplica constantemente, no momento após a bateria ter se carregado completamente. Este parâmetro minimiza a degradação do dispositivo. Seu valor varia de acordo com especificações do fabricante.

Ainda segundo o padrão IEEE 1881 (2016), a tensão de equalização de carga (*equalizing charge*), por sua vez caracteriza-se pela aplicação de uma tensão em um nível maior do que a *floating charge*, por um curto período de tempo. Seu objetivo é corrigir inadequações de tensão, estado de carga entre células, ou gravidade específica.

2.3 GERENCIAMENTO DE ENERGIA

No contexto de sistemas de potência, o gerenciamento de energia é uma das áreas que sofrem forte impacto das inovações tecnológicas. Isso porque o aperfeiçoamento das infraestruturas de comunicação, somadas ao desenvolvimento de dispositivos com modos de operação cada vez mais versáteis, expandem os horizontes de possibilidades. Isso pois, um dos grandes compromissos e desafios de

um sistema de potência é prezar pela qualidade, constância e confiabilidade às cargas que farão uso de sua energia.

Dentre as estratégias que exploram aplicações entre unidades de geração de energia e sistema de armazenamento, a ANE (2016) salienta que a soma das duas estruturas têm o potencial de construir características valiosas à rede elétrica. A agência destaca técnicas como, nivelamento da curva de carga diária *load leveling*; *spinning reserve*, a qual fornece continuidade no atendimento da demanda em casos de perda inesperada de parte da unidade de geração, além de ser útil na manutenção da qualidade de energia das redes de transmissão e distribuição. Porém, este trabalho restringe-se a explorar uma técnica de gerenciamento em específico; a redução de demanda de pico (*peak shaving*).

2.3.1 Peak Shaving

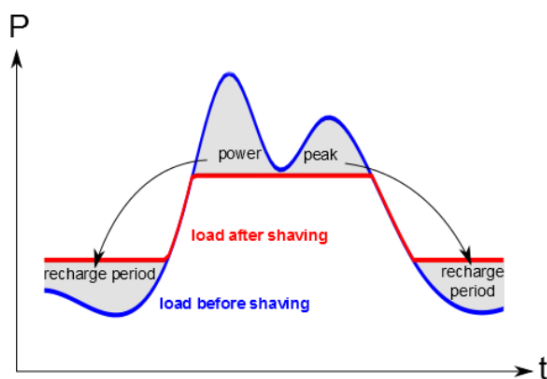
Dentro do contexto de *smart grids*, KARMIRIS (2013) discorre que a abordagem *peak shaving* tem o potencial de se tornar uma das aplicações mais importantes dessa área. Isso porque, baseado em momentos específicos de demanda é possível amortecer o custo da energia. Seu princípio de funcionamento é bastante simples porém traz fortes consequências do ponto de vista financeiro. LEVRON (2012) explica que para esse tipo de gerenciamento de energia ser implementado, basta identificar os momentos em que uma carga elétrica qualquer exige da rede elétrica, uma potência acima de um determinado limiar. Quando isso acontece, uma fonte energética secundária atende a demanda que está acima deste limite.

Existem duas grandes vantagens, segundo KARMIRIS (2013), que essa aplicação traz. A primeira envolve considerar que toda a rede elétrica é dimensionada para atender os picos de demanda. Porém, tal situação ocorre em períodos relativamente curtos do dia, o que faz com que toda a infraestrutura da rede de transmissão e distribuição fique subutilizada na grande maioria do tempo. Isso significa que o custo para o consumidor final é fortemente baseado nesse pequeno intervalo de tempo. Outro ponto trazido por KARMIRIS (2013) é o de levar em conta que, quase sempre os picos de demanda coincidem com o momento em

que a taxa de energia atinge seu maior preço. Portanto, para os consumidores que pagam taxas variáveis e multas por exceder determinados limites de potência tem sua conta de energia reduzida. Tal consequência também é vantajosa do lado da oferta de energia, uma vez que o pico de demanda é reduzido.

A figura disponibilizada por KARMIRIS (2013) permite observar o princípio de funcionamento do *peak shaving* em função do tempo. Importante salientar que, nos períodos de recarga apresentado no gráfico, apenas a potência gerada pelo inversor é utilizada para recarregar a bateria. Isso significa que, do ponto de vista da oferta houve redução da demanda das cargas, apenas nos intervalos de pico. Porém do ponto de vista do consumo, o comportamento da demanda ficou inalterado. Portanto, quando há o *peak shaving* (linha vermelha da Figura 1), nos momentos de recarga (região em cinza), duas fontes estão fornecendo potência, uma é a fornecedora que atende a demanda das cargas a outra provém da geração fotovoltaica que carrega a bateria. Já nos momentos de pico (região em cinza), quando o supervisor identifica que a demanda limite foi ultrapassada a bateria então atende as necessidades que excedem a linha de tolerância, enquanto que do ponto de vista da rede elétrica há um fornecimento constante, que dura até o término do pico.

Figura 1 - Concepção do Peak Shaving.



Fonte: KARMIRIS, 2013

2.4 INFRAESTRUTURA COMPUTACIONAL

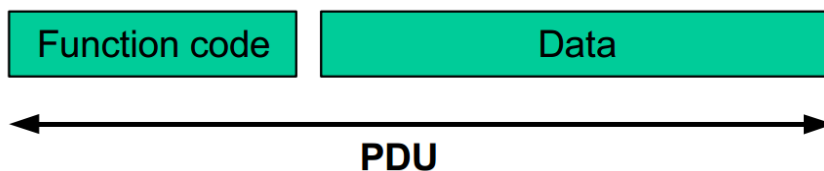
A seguir serão apresentados os principais recursos computacionais empregados neste trabalho para a implementação do sistema SCADA.

2.4.1 MODBUS

Muito utilizado no ambiente industrial, este protocolo de comunicação permite que uma aplicação faça a leitura e o controle de outros dispositivos conectados. Foi construído sobre o paradigma mestre-escravo, de tal forma que apenas uma máquina computacional pode assumir a condição de mestre, enquanto várias outras podem ser escravas. Ou seja, dentro de uma conexão, apenas uma máquina pode enviar requisições de leitura ou escrita, ao passo que várias outras estão aptas para atender as demandas do mestre.

É um protocolo bastante versátil, possuindo a opção de conexões seriais, utilizando a interface elétrica RS485 ou conexões a nível de rede, através dos protocolos *Ethernet* TCP/IP. Segundo as especificações do protocolo a MODBUS ORGANIZATION IND (2012) explica que este assume a camada 7 do modelo OSI, quando operacionalizado em conexões via internet. Isso significa que é um protocolo de aplicação. A documentação explica que independente da camada de comunicação que esteja abaixo do Modbus, seu pacote de dados sempre respeitará a estrutura da figura 2.

Figura 2 - Representação da unidade de dados do protocolo



Fonte: MODBUS ORGANIZATION IND, 2012

O campo *function code* serve para definir qual operação deve ser executada por parte do servidor. A documentação MODBUS ORGANIZATION IND (2012) explica que em um primeiro momento, no conjunto *data* o mestre envia para a máquina escrava, informações adicionais determinantes para o sucesso da

execução da *function code* exigida. Dependendo do tipo de operação que se deseja, o campo de dados pode ser completado com zeros, e portanto não ser relevante, como também pode conter informações sobre valores de constantes ou endereços de registradores. Importante frisar que, cada registrador é de 16 *bits*.

Em termos de tamanho de uma informação, este protocolo trabalha com 2 categorias. Dados binários e palavras de 16 *bits*. Além do tamanho, há a divisão entre informações que são apenas de leitura e outras que são de leitura ou escrita. No escopo deste trabalho, utilizou-se 3 tipos de função; *read input register*, para realizar o acesso de registradores (16 bits) que são apenas de leitura; *read holding register* e *write holding register*, as quais realizam leitura e escrita de registradores que permitem monitoramento e controle.

2.4.2 MQTT

Esse protocolo foi desenvolvido com o intuito permitir a troca de mensagens através do paradigma cliente-servidor *publish/subscribe*. A OASIS OPEN (2019), instituição criadora do protocolo, explica que ele é focado para comunicações que exigem baixo volume de dados tais como conexões máquina-máquina (M2M) e internet das coisas (IoT). Tipicamente roda acima do protocolo TCP/IP.

Como o MQTT é implementado sobre os princípios do paradigma *publish/subscribe*, ele portanto estabelece a troca de informações de maneira indireta. Isso significa que os destinatários e remetentes de uma mensagem são independentes do ponto de vista do tempo e do espaço. COULOURIS (2013, p.229) define que toda comunicação indireta faz uso de um agente intermediário para realizar o acoplamento temporal e espacial da comunicação. Isso porque, no momento que deseja-se enviar uma mensagem, o remetente não sabe quem irá receber a informação, qual é sua referência para localização e sequer se ele está *online*. O contrário também é verdade, ou seja, a máquina que recebe a mensagem não sabe quem a enviou e nem quando foi enviada.

COULOURIS (2013, p.243) explica que a única característica em comum entre remetente e destinatário é o interesse em um evento (no MQTT, chama-se tópico). Portanto, publicar (*publish*) uma informação em um evento significa que

todas as máquinas que estão inscritas (*subscribe*) nele deverão receber a mensagem. Desta forma os agentes remetentes e destinatários interagem diretamente com a máquina intermediária, também conhecida como *broker*.

No protocolo MQTT, dependendo do tipo de mensagem que se deseja enviar para o intermediário, diferentes tipos de pacotes com cabeçalhos específicos deverão ser enviados. Entretanto, a OASIS OPEN (2019) explica que independente do tipo de mensagem que está sendo trocada, há um cabeçalho que sempre está presente. O chamado cabeçalho fixo (*fixed header*). A figura 3 apresenta a organização de tal pacote.

Pela figura 3 observa-se que no *byte 1* há o tipo de mensagem e as *flags* (DUP, QoS *level* e *RETAIN*). A comunicação MQTT oferece 16 tipos de mensagem, entre elas existem requisições para publicação, inscrição, desinscrição, conexão com o *broker*, entre outras.

Figura 3 - Representação do cabeçalho fixo (*fixed header*).

bit	7	6	5	4	3	2	1	0
byte 1	Message Type				DUP flag	QoS level		RETAIN
byte 2	Remaining Length							

Fonte: OASIS OPEN, 2019

A *flag* DUP é setada em casos que há o interesse, seja do cliente ou servidor de tentar re-enviar mensagens do tipo *PUBLISH*, *PUBREL*, *SUBSCRIBE* ou *UNSUBSCRIBE*.

Este protocolo trabalha com 3 níveis de garantia de entrega. Portanto a *flag* QoS serve para, no momento em que se deseja fazer uma publicação indicar se trata-se de uma mensagem que deva ser entregue mais de uma, pelo menos uma, ou exatamente uma vez aos destinatários.

A OASIS OPEN (2019), destaca que para casos que há atrasos no envio das publicações, os novos inscritos no tópico podem acabar não recebendo a mensagem. Para este tipo de contexto, a *flag retain* pode ser testada. Quando isso acontece, o *broker* armazena a última mensagem recebida de um tópico, mesmo que essa já tenha sido entregue a todos os atuais inscritos. Quando uma nova

inscrição é realizada em um tópico, a última mensagem retida no *broker*, sobre o mesmo tópico é enviada instantaneamente para esse novo destinatário.

2.4.3 Broker

Em sistemas distribuídos, COULOURIS (2013, p.58) destaca o quão comum é o uso do padrão arquitetônico capaz de interoperar entre as infraestruturas do sistema. Trata-se, portanto, do padrão *brokerage*, o qual é estruturado a partir de 3 instâncias; provedor do serviço, solicitante do serviço e corretor do serviço (*broker*). Esse último é definido por COULOURIS (2013, p. 58) como “um serviço que combina os serviços fornecidos com os que foram solicitados”.

No contexto do protocolo MQTT, o *broker* deve ser tal que seja capaz de além de atender as necessidades dos seus clientes, as quais podem ser simplificadas como sendo apenas troca de mensagens; ele precisa fornecer serviços que estão implícitos ou são abstraídos dos tipos de requisição disponíveis no protocolo MQTT. Entre os serviços implícitos que pode-se citar estão a identificação da localização e da temporização dos remetentes e destinatários. Em outras palavras, o *broker* irá saber quem enviou uma mensagem e quem deve recebê-la. Isso implica ter o registro da referência das partes e ser capaz de saber quem está *online* e *offline*.

2.4.4 Banco de Dados

Todo e qualquer processo ou sistema que se propõe a realizar coleta, análise e controle de diferentes dados invariavelmente precisará ter, na sua infraestrutura uma forma eficiente de armazenamento. Portanto, este trabalho fez uso de um banco de dados baseado em séries temporais. Isso pois, ao associar o valor das amostras com instantes de tempo, tem-se uma compreensão do ponto de vista do comportamento da variável que se busca visualizar ou eventualmente controlar.

2.4.4.1 InfluxDB

Desenvolvido pela empresa Influx Data, o banco de dados de séries temporais InfluxDB é *open-source* e tem o propósito de ser utilizado em aplicações do campo de monitoramento de processos, telemetria, *IoT* e análises de tempo real.

2.4.5 Grafana

Trata-se de uma aplicação *web open-source*, cujo propósito é fornecer ferramentas para visualização de dados, de tal forma que é possível a associação entre diferentes tipos de banco de dados, possuindo uma grande variedade de alternativas para estruturar a forma como os dados serão apresentados (tabelas, gráficos, alarmes, etc). O Grafana possui configurações nativas, as quais facilmente permitem que os dados presentes no InfluxDB sejam visualizados através de interface humano-máquina acessível.

3. ARTIGO 1 - PROPOSTA DE EXECUÇÃO DE UM MÉTODO DE GERENCIAMENTO DE DEMANDA ATRAVÉS DE CONTROLE EXTERNO DE INVERSOR FOTOVOLTAICO COM BATERIA

Este artigo foi submetido ao 9º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos e está de acordo com as normas de submissão do congresso.

Proposta de Execução de um Método de Gerenciamento de Demanda através de Controle Externo de Inversor Fotovoltaico com Bateria

João Felipe A. Santiago*. Lucas V. Belinaso*. Mauricio Sperandio*. Rafael C. Ney**

*Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS 97105-900

Brasil (e-mail: joaofelipe.santiago@ecomp.ufsm.br, lucas@gepoc.ufsm.br, mauricio.sperandio@ufsm.br).

**CEEE-D, Grupo Equatorial (e-mail: rafael.ney@ceee.equatorialenergia.com.br)

Abstract: The energy management method called Peak Shaving is a valuable approach, which increases the efficiency of the electricity grid and reduces costs for consumer agents, especially in contexts of high demand. Furthermore, this technique proves to be interesting for the new Brazilian energy challenges. This work proposes to build a computational infrastructure in order to enable the execution of this energy management method through a photovoltaic generation unit. In this sense, the construction of a supervisory will be presented, which will provide a view of the behaviour of the multiple electrical variables, which involve the generation unit, enabling the realization of the energy optimization technique. This system consisted of a Modbus serial communication, MQTT message protocol, Python programming language, InfluxDB database and the Grafana interactive viewer. The infrastructure development was satisfactory with regard to data monitoring, but the control steps did not meet the design requirements.

Resumo: O método de gerenciamento de energia chamado Peak Shaving é uma abordagem valiosa, a qual eleva a eficiência da rede elétrica e reduz custos para os agentes consumidores, principalmente em contextos de ultrapassagem de demanda contratada. Além do mais, tal técnica se mostra interessante para os novos desafios energéticos brasileiros. Este trabalho se propõe a construir uma infraestrutura computacional de modo a viabilizar a execução deste método de gerenciamento energético em uma unidade de geração fotovoltaica com baterias. Nesse sentido, será apresentado a construção de um supervisor, o qual fornecerá uma visão do comportamento das múltiplas variáveis elétricas, que envolvem a unidade de geração. Tal sistema foi constituído por uma comunicação serial Modbus, protocolo de mensagens MQTT, linguagem de programação Python, banco de dados InfluxDB e o visualizador interativo Grafana. O desenvolvimento da infraestrutura foi satisfatória no que diz respeito ao monitoramento de dados, porém as etapas de controle ainda não puderam ser finalizadas.

Keywords: Energy; Modbus; Raspberry; SCADA; Inverter

Palavras-chaves: Energia; Modbus; Raspberry; SCADA; Inversor.

1. INTRODUÇÃO

Projeta-se que no Brasil, até 2024, haverão mais de 880 mil agentes (residências, comércios, indústrias, instituições) com uma unidade de geração de energia solar fotovoltaica, segundo dados da ANEEL (2017). Isso significa que o país teria mais de 3,2 GW de potência instalada proveniente deste tipo de recurso energético. Apesar de tal ampliação gerar impactos positivos em termos de qualidade energética, inovação e meio ambiente, existem consequências problemáticas associadas a esse contexto que se apresenta no horizonte. Para KIMAIYO (2019), o aumento das conexões de gerações fotovoltaicas somada ao aumento de cargas não lineares desafiam a qualidade de energia da rede elétrica. Isso

significa que o sistema de energia pode apresentar variações indesejadas de tensão, frequência e baixa confiabilidade.

Portanto, sistemas de armazenamento de energia (SAE) tornam-se interessantes em termos de otimização energética. No que se refere ao uso de estratégias de otimização utilizando SAE, uma das técnicas mais comuns é o alívio de carga denominado *peak shaving*. Tal estratégia consiste em definir um limite de potência que um fornecedor irá consumir da rede (P_{Max}), que pode ser definida como a demanda contratada. Durante a operação do sistema é preciso medir a potência instantânea de todos os elementos do sistema a fim de definir a potência necessária para a bateria compensar a ultrapassagem de demanda. Nos momentos em que a

demanda da(s) carga(s) é menor, a bateria é carregada pela fonte energética alternativa.

O estudo de gerenciamento de energia com baterias exige intrinsecamente a existência de um sistema capaz de supervisionar e atuar sobre os dispositivos participantes de tal infraestrutura. Neste sentido, este trabalho tem como finalidade operacionalizar um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) para atuar em uma unidade de geração de energia fotovoltaica e que implementa a técnica de gerenciamento de energia *peak shaving*. Logo, para a concretização desta proposta utilizou-se o computador externo *Raspberry Pi* modelo 3 b+, tanto para se comunicar com o inversor quanto para enviar os parâmetros lidos até um servidor. A comunicação entre o inversor e o computador externo se deu através do protocolo serial ModBus. Já para o envio de mensagens da máquina computacional até o broker usou-se o protocolo MQTT. Foi empregado o banco de dados InfluxDB e o aplicativo web para visualização interativo Grafana. A unidade de geração de energia solar conta com uma bateria da fabricante Dyness modelo PowerBox F-5.0 e um inversor híbrido monofásico do fabricante Solis modelo RHI-5K-48ES. A Figura 1 apresenta um diagrama que resume as variáveis e equipamentos presentes no sistema. Já a Figura 2 mostra o inversor e a bateria que foram utilizados.



Fig 2. Foto dos dispositivos instalados.

2. O MÉTODO PEAK SHAVING

Dentro do contexto de *smart grids*, KARMIRIS (2013) discorre que a abordagem *peak shaving* tem o potencial de se tornar uma das aplicações mais importantes dessa área. Isso porque, baseado em momentos específicos de demanda é possível amortecer o custo da energia. Seu princípio de funcionamento é bastante simples porém traz fortes consequências do ponto de vista financeiro. Para esse tipo de gerenciamento de energia, LEVRON (2012) explica que para ser implementado, basta identificar os momentos em que uma carga elétrica qualquer exige da rede elétrica, uma potência acima de um determinado limiar. Quando isso acontece, uma fonte energética secundária atende a demanda que está acima deste limite.

Existem duas grandes vantagens, segundo KARMIRIS (2013), que essa aplicação traz. A primeira envolve considerar que toda a rede elétrica é dimensionada para atender os picos de demanda. Porém, tal situação ocorre em períodos relativamente curtos do dia, o que faz com que toda a infraestrutura da rede de transmissão e distribuição fique subutilizada na grande maioria do tempo. Isso significa que o custo para o consumidor final é fortemente baseado nesse pequeno intervalo de tempo. Outro ponto trazido por KARMIRIS (2013) é o de levar em conta que, quase sempre, os picos de demanda coincidem com o momento em que a taxa de energia atinge seu maior preço. Portanto, para os consumidores que pagam taxas variáveis e multas por exceder determinados limites de potência, o uso da técnica de *peak shaving* tem o potencial de reduzir o valor que será pago para as administradoras da rede elétrica.

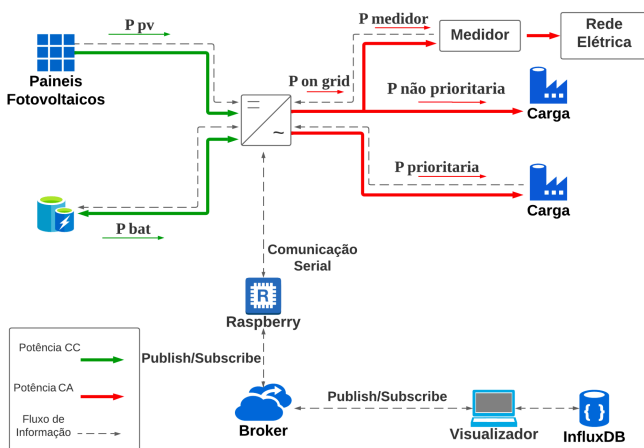


Fig 1. Diagrama do sistema.

2.1 Concepção da Execução do Método

Em termos de conceito de implementação, foi preciso providenciar a existência de uma forma ou uma estrutura apta a configurar determinados parâmetros operacionais da bateria, através de uma comunicação remota. Para isso, levou-se em consideração duas características do inversor. A primeira, diz respeito a sua capacidade de parametrizar o funcionamento da bateria via comunicação serial CAN. Já a segunda, leva em conta a disponibilidade dele receber, de máquinas externas, comandos que irão alterar as características operacionais do equipamento de armazenamento, via protocolo Modbus. Com esses materiais e recursos, a estratégia, em nível conceitual, utilizada para pôr em prática o *peak shaving* consiste na realização de verificações periódicas da potência da(s) carga(s) conectada(s) ao inversor ($P_{priorit\acute{a}ria}$ e $P_{n\grave{a}o\ priorit\acute{a}ria}$), o nível de estado de carga (SOC), a potência vinda dos painéis solares (P_{pv}) e a potência do medidor ($P_{medidor}$). Em linhas gerais, dentro de um estágio de averiguação, o sistema SCADA compara a demanda energética suprida pela rede, com o limite de fornecimento (P_{max}). Caso haja carga suficiente na bateria e o limite tiver sido superado, a bateria é então descarregada com uma potência apta a compensar a extrapolação da linha de tolerância. Foi estipulado também duas parametrizações para carregar o dispositivo de armazenamento. Uma em que a potência de carregamento é constante (nome da variável), e outra que a carrega com a máxima potência disponível.

Nos momentos em que a demanda está abaixo do limite, ocorre a verificação da viabilidade de se realizar o carregamento da bateria. Na condição de não ser possível nem realizar o atendimento de demanda da carga, nem o carregamento do dispositivo de armazenamento, a bateria é então desabilitada.

Considerando que o inversor possua elevada eficiência de conversão de energia (> 97%), a equação de equilíbrio de potências da Figura 1 é dada por:

$$P_{pv} + P_{bat} - P_{medidor} - P_{n\grave{a}o\ priorit\acute{a}ria} - P_{priorit\acute{a}ria} = 0 \quad (1)$$

onde

$$P_{n\grave{a}o\ priorit\acute{a}ria} = P_{on\ grid} - P_{medidor} \quad (2)$$

A potência da bateria é dada por:

$$\begin{aligned} P_{bat} &= P_{medidor} + P_{n\grave{a}o\ priorit\acute{a}ria} + P_{priorit\acute{a}ria} - P_{pv} \\ &= P_{on\ grid} + P_{priorit\acute{a}ria} - P_{pv} \end{aligned} \quad (3)$$

A potência do medidor deve ser limitada de acordo com a demanda. Com isso, quando $P_{medidor}$ é positivo significa que a rede elétrica está recebendo energia do inversor. Na situação contrária ($P_{medidor} < 0$) a demanda de $P_{n\grave{a}o\ priorit\acute{a}ria}$ é maior do que P_{pv} consegue entregar. Portanto, neste contexto, a rede elétrica está fornecendo energia ao sistema.

Neste sentido, quando $P_{medidor}$ ultrapassa o limite de demanda ($P_{medidor} < P_{max}$) e a bateria possui SOC suficiente, ela é então descarregada, respeitando e considerando a equação de equilíbrio de potências do sistema e P_{max} . Por outro lado, na circunstância em que $P_{medidor}$ indica que o limite contratado não está sendo ultrapassado, a bateria é carregada com a máxima potência disponível.

A tabela 1 resume a determinação da potência da bateria necessária para implementar o *peak shaving*. Portanto, o carregamento e descarregamento do dispositivo de armazenamento ocorre apenas em condições adequadas. Importante mencionar que os valores de SOC_{max} e SOC_{min} precisam ser tais que evitem *overcharging* e *undercharging* da bateria, contudo seus valores dependem das especificações do dispositivo empregado. Percebe-se na equação 1, a existência do parâmetro $P_{carga, const}$, o qual consiste em uma potência de carregamento cujo valor é dimensionado com a intenção de otimizar a utilização da bateria.

Importante mencionar que o inversor precisa estar configurado de tal forma que apenas ele esteja habilitado para carregar a bateria.

Tabela 1. Determinação da potência da bateria

P_{bat}	Condição
$P_{max} + P_{n\grave{a}o\ priorit\acute{a}ria} + P_{priorit\acute{a}ria} - P_{pv}$	$P_{medidor} \geq P_{max}$ e $SOC < SOC_{max}$
$-P_{max} + P_{n\grave{a}o\ priorit\acute{a}ria} + P_{priorit\acute{a}ria} - P_{pv}$	$P_{medidor} \leq -P_{max}$ e $SOC > SOC_{min}$
$- P_{carga, const} $	$ P_{medidor} \geq P_{max} - P_{carga, const} $ e $SOC < SOC_{max}$
0	outros casos

3. ESTRUTURA COMPUTACIONAL

Os equipamentos empregados para realização do sistema SCADA foram um *Raspberry Pi 3 b+* e um conversor USB/RS485, modelo CH340. O estabelecimento de conexão entre o inversor e o Raspberry via padrão RS485 fez-se via o emprego do conversor USB/RS485. Este equipamento, por sua vez, possui uma interface de conexão bastante simples, pois exige-se apenas a ligação entre o conversor de interface e o inversor, nos barramentos A e B do padrão RS485. Tal configuração possibilitou a operacionalização da comunicação serial Modbus.

Com o uso de um cabo Ethernet para conectar o Raspberry à Internet somado à exploração do protocolo MQTT, o computador pode se conectar com um *broker*, o qual tem como propósito receber todas as publicações realizadas por essa máquina. Em uma outra ponta, há o Visualizador (Figura 1), o qual é um segundo computador conectado ao mesmo *broker*. Portanto, toda a vez que o Raspberry realizar uma publicação (*publish*) esta segunda máquina, ao receber a mensagem, a armazena no banco de dados InfluxDB, o qual por sua vez estará conectado ao visualizador de dados Grafana.

3.1 Recursos de Software

Todo o código necessário para implementar o sistema SCADA foi desenvolvido, utilizando a linguagem de programação Python. Isso devido a facilidade de uso dos pacotes necessários tanto para a comunicação serial, quanto para a troca de mensagens via *broker*. Em relação ao protocolo Modbus, este trabalho utilizou o pacote *pymodbus*, o qual possui o módulo *client.sync*. Dentro deste módulo há a definição da classe *ModbusSerialClient*, nela é possível acessar todos os métodos necessários para estabelecer uma comunicação entre o Raspberry e o inversor. Para a comunicação indireta foi utilizado o pacote *paho*, que é quem possui uma variedade de módulos que tangem o protocolo MQTT. No escopo desta implementação, operou-se com a classe *client*, presente no subpacote *mqtt*. Por último, foi necessário o emprego da biblioteca Influxdb, para assim realizar as inserções das amostras coletadas no banco de dados.

3.2 Especificidades do Protocolo Modbus

Ao todo, 61 registradores Modbus do inversor são monitorados ou controlados. Todos respeitam a política de organização definida pelo fabricante do inversor. Em suma, a organização dos parâmetros presentes nos registradores baseia-se em endereço, tamanho em bits, escala de conversão e nome. Cada uma dessas características cria exigências distintas em termos de conversão. Isso porque, o dado bruto que se interage com cada registrador não representa o verdadeiro valor da variável que deseja-se conhecer ou relacionar-se. Para este trabalho, utilizou-se apenas dois tipos de registradores Modbus, os *Input Registers* e os *Holding Registers*. O primeiro é composto de 16 bits e restringe-se a fornecer apenas leitura de informações. Já o segundo tipo,

também é formado por 16 bits, porém permite a realização de leitura e escrita de dados.

O endereço nada mais é do que a referência que precisará ser utilizada tanto para realizar a leitura de uma variável, quanto para seu eventual controle. O tamanho de um parâmetro varia entre 16 e 32 bits, ou seja, é definido por um ou dois registradores. Portanto, métodos específicos precisam ser utilizados para a correta conversão de cada caso.

Para os casos de uma variável de 32 bits sem sinal, é necessário realizar o deslocamento apropriado dos 16 bits mais significativos, concatená-los com os menos significativos e atribuir esse número a uma variável. A constante utilizada para realizar a concatenação é tal que desloca todos os bits do registrador mais significativos 16 bits à esquerda. Portanto, basta multiplicar este registrador por 2^{16} (65.536) e somar com o registrador dos primeiros 16 bits da variável amostrada.

Porém, para as variáveis de 32 bits com sinal exige-se levar em consideração as regras do complemento de dois, para a representação de números negativos. Para esta circunstância, primeiro o código verifica se o valor acessado é negativo ou não. As regras deste tipo de representação consideram que o bit mais significativo indica o sinal do número (0 é positivo, 1 negativo). Ou seja, é necessário verificar qual é o valor do registrador que representa a parte alta do número. Assim, caso ele seja maior do que 2^{15} (32.768), tem-se a certeza de que trata-se de um número negativo. Nesta essa circunstância, além da multiplicação por 2^{16} para realizar o deslocamento é preciso inverter todos os bits e somar mais um. Caso o número seja positivo, apenas o deslocamento se faz necessário. Nas circunstâncias em que a variável amostrada é de 16 bits com sinal, apenas a verificação do sinal e sua eventual modificação é exigida. O valor de verificação é o mesmo que para o caso de 32 bits.

O último fator necessário para realizar a devida conversão das amostras monitoradas é a escala. De acordo com o protocolo de comunicação do fabricante, cada registrador precisa ser multiplicado por uma constante adequada. Por exemplo, o registrador 33134, indica o valor da corrente fluindo sobre a bateria e seu fator de escala é 10, portanto para ter o valor adequado é necessário multiplicar a magnitude do registrador por 0,1.

3.3 Especificidades do Protocolo MQTT

Além de interagir com o inversor, o Raspberry se comunica com o *broker* público da instituição *Eclipse Foundation*, chamado *mqtt.eclipseprojects.io*. A conexão com esse broker exige, previamente, a instanciação de um objeto cliente MQTT e dois callbacks. Um dos métodos (*on_connect()*) é utilizado para quando a conexão é estabelecida com o *broker*, o outro (*on_message()*) para os casos em que o computador

recebe uma mensagem de uma publicação (não se aplica ao Raspberry, pois ele não realiza inscrição em nenhum tópico).

Após realizar as configurações prévias e a conexão com o broker, um *loop* é executado. Este *loop* é definido pelo método *loop_start()* e está presente no módulo *paho*. Tal método tem duas utilidades, a primeira é liberar a *main* de possíveis bloqueios de processo que podem acontecer devido aos procedimentos internos de uma comunicação de rede, e o outro visa garantir uma conexão com o broker de maneira ininterrupta.

Importante mencionar que esses procedimentos são executados tanto no Raspberry (agente publicador de mensagens), quanto no *Visualizador* (agente que realiza inscrições).

Após finalizar as devidas conversões relacionadas ao acesso dos dados internos do inversor e o estabelecimento de conexão com o broker, o Raspberry deve realizar a publicação dos valores. Para isto, basta incitar o método *mqtt_publish()*, tal função recebe três parâmetros; a referência do objeto cliente, o nome do tópico em que se deseja realizar a publicação e o seu respectivo valor.

No *Visualizador*, a realização das inscrições é realizada no momento em que o callback *on_connect()* é executado. Isso significa que, após essa etapa, toda vez que o Raspberry, ou qualquer outra máquina conectada ao mesmo broker realizar a publicação de um valor em algum dos tópicos inscritos, o computador de visualização irá receber. Mais especificamente, o método *on_message()* será executado para esse tipo de situação.

3.4 Inserção das Amostras no Banco de Dados

Os procedimentos realizados, após o recebimento de uma mensagem, consistem em realizar a instanciação de um objeto para interagir com o banco de dados InfluxDB e inserir as medidas no sistema de armazenamento de informação. A instanciação envia 4 parâmetros, o endereço IP do banco de dados, sua porta (o influxDB utiliza a 8086 por padrão), o nome do banco de dados, seu nome de usuário e senha.

Após a criação deste objeto, o método *send_data_to_influx_db()* é chamado para, enfim, anexar o dado no banco de dados. Este método recebe como parâmetros a referência do objeto cliente, o nome do tópico e o valor a ser inserido. Internamente, sua lógica consiste em utilizar estes argumentos para elaborar um formato de dados JSON e posteriormente chamar o método, da biblioteca *influxdb*, *write_points()*.

3.5 Visualizador de Dados

A última etapa do sistema SCADA diz respeito à visualização do monitoramento e controle do inversor através do software Grafana. Portanto, todas essas informações estão presentes no painel de controle *Solis_PickShaving_inv1* da aplicação. Importante ressaltar que tais elementos estão presentes

apenas no computador *Visualizador*, o que significa que apenas máquinas computacionais conectadas na mesma LAN estão aptas a acessar esses dados.

4. RESULTADOS

4.1 Monitoramento

Todas as funcionalidades que tangem o monitoramento dos parâmetros elétricos do inversor atingiram níveis de operacionalidade completa. O painel de controle foi dividido em 4 filais: *Status*, *Battery*, *Meter* e *Backup*. A primeira fileira apresenta informações a respeito do inversor em si, tais como modelo do dispositivo, estado atual, modo de operação e dados de erros.

Já na fila *Battery* há uma série de dados referentes às variáveis operacionais da bateria de lítio-ion. Neste campo de informações é possível ter conhecimento da corrente que está fluindo sobre o dispositivo, a tensão aplicada, o valor da corrente máxima para carga e descarga, habilitação da bateria, valor de proteção contra overvoltage, undervoltage, modo de operação, entre outros tipos de dados.

As informações presentes em *Meter* concentram-se em fornecer uma compreensão a respeito da potência recebida do barramento CC dos painéis; a potência ativa gerada pelo inversor e a entregue aos medidores da rede elétrica; corrente e tensão dos medidores; valor dos limitadores de potência ativa gerada pelo inversor; corrente e tensão do barramento CA do inversor e estado atual do equipamento.

O campo de dados *Backup* apresenta dados relativos à carga conectada ao inversor. Isso significa que é possível conhecer a potência, corrente e tensão dela; além da visualização de parâmetros de controle relacionados à tensão, frequência e habilitação dos dados de controle.

A Figura 3 apresenta o resultado do monitoramento, presente no software Grafana, do comportamento da tensão eficaz da energia que passa pelo medidor, ao longo do tempo.

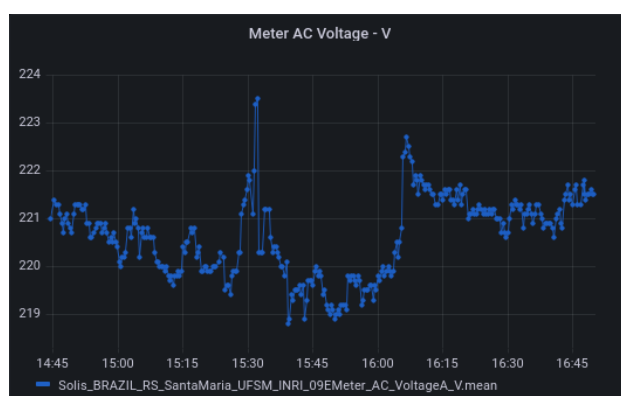


Fig 3. Tensão eficaz ao longo do tempo.

4.1 Controle

Criou-se a classe *Parametros_IO*, com o intuito de facilitar a programação e a compreensão da lógica do sistema. Essa classe é composta exclusivamente de atributos, os quais ao todo são 11. A grande vantagem de sua utilização é a facilidade que ela traz para retirar ou acrescentar novas variáveis para serem monitoradas e/ou controladas. No que tange a gestão dos parâmetros do sistema, via protocolo Modbus, três atributos da classe são utilizados. São eles: o endereço do registrador, o valor que deseja-se atribuir a ele e por fim, o valor de retorno que o inversor fornece ao Raspberry a cada solicitação de escrita.

A instanciação dos objetos desta classe é baseada nos valores existentes em uma lista chamada *INV_REGS*. Isso significa que a definição das medidas a serem efetuadas pelo sistema e os valores a serem escritos nos registradores acontecem em tempo de compilação. A consequência desta forma de funcionamento cria um caráter estático no modo como o controle é executado.

Como descrito na subseção 2.1, a operação do método *peak shaving* depende fortemente do monitoramento da potência que a carga exige e o SOC da bateria. Além de exigir, em linhas gerais, a alteração de 4 valores. Isso significa ter que gerenciar a habilitação do dispositivo de armazenamento, definir a realização de carregamento ou descarregamento, determinar a potência de saída ou entrada da bateria e impedir que a rede carregue o dispositivo de armazenamento.

Infelizmente, apenas o registrador relacionado com a imposição de limitação entre rede e bateria pode ser integralmente controlado. Isso pois, apesar do monitoramento presente no software Grafana indicar alteração bem sucedida nos valores dos registradores relacionados à bateria, tais modificações não apresentaram alteração no comportamento final no equipamento de armazenamento.

Um dos poucos comportamentos que o sistema construído foi capaz de controlar foi a potência nominal que o inversor entrega ao sistema, que em tese pode ser para a bateria, cargas ou rede elétrica. Neste caso, variando o valor do registrador chamado de *Power Limiting Seting* pela documentação do fabricante foi possível atingir tal feito. Como a potência nominal do inversor é de 3 kW esta variável então define, em porcentagem, o quanto ela será gerada pelo inversor.

As Figuras 4 e 5 permitem observar o fenômeno descrito, pois a alteração *Power Limiting Seting* impactou diretamente na potência CC, vinda dos painéis solares uma vez que, sob condições de incidência solar normal, a potência que chega no inversor entre os horários de 15 h e 30 min até pouco mais de 16 h são menores do que a potência após este horário. Portanto, nesta circunstância, tal fenômeno ocorre exclusivamente pela atuação da variável *Power Limiting Seting*.



Fig 4. Potência gerada pelo inversor (P_G)

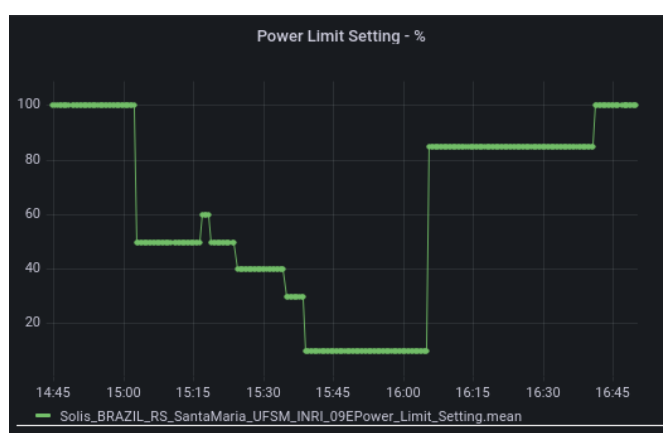


Fig 5. Controle da geração de energia do inversor.

5. CONCLUSÕES

O que explica o porquê das modificações nos registradores que, em tese são de controle da bateria, não causarem impacto no seu comportamento é a incapacidade dos recursos de hardware e software do inversor em associar esses elementos de memória, com comandos que devam ser enviados até o dispositivo acumulador de energia. Portanto, faz-se necessário providenciar a substituição do modelo de inversor utilizado.

Outro aspecto que merece reflexão diz respeito à forma como os dados de monitoramento são acessados. Como dito na subseção 3.5, da forma como o SCADA foi construído, apenas máquinas computacionais presentes na mesma rede local tem a capacidade de acessar os dados presentes no software visualizador de dados Grafana. Uma possível proposta que tem o potencial de permitir acesso remoto à plataforma é a utilização de serviços desta natureza oferecidos pelo Centro de Processamento de Dados (CPD) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Além do acesso remoto, uma funcionalidade que merece aperfeiçoamento é a forma como ocorre a execução das definições e requisições de controle. A otimização deve ser tal que permita a parametrização das variáveis aptas ao gerenciamento em tempo de execução, criando assim

manipulação de dados de forma dinâmica. Uma possibilidade é a investigação de se criar *threads* as quais são executadas apenas quando informações ou sinais são recebidas de usuários ou do sistema operacional. Para isso seria necessário descobrir bibliotecas, ou pacotes python os quais permitam manipulação, escalonamento e envio de sinais para processos. Outra alternativa seria a criação de threads para receber pacotes MQTT relacionados ao encaminhamento de *setpoints* de controle ao Raspberry. Porém, por se tratar de threads há a grande possibilidade de também ser necessário a utilização de métodos capazes de realizarem chamadas de sistema ao SO do Raspberry.

Para tornar o SCADA humanamente amigável e largamente utilizável é imprescindível a existência de uma interface interativa, gráfica e intuitiva. Uma vez que é preciso levar em consideração que um eventual operador que possa fazer uso desta infraestrutura, a qual implementa gerenciamento de energia, muito provavelmente não terá disposição e intimidade para configurar o sistema via código fonte. Idealiza-se, portanto, a necessidade de construir uma interface gráfica a qual permite determinar, em tempo de execução das variáveis de controle e monitoramento, que o Raspberry irá interagir com o inversor.

Todos os componentes de hardware, protocolos, bibliotecas, pacotes e aplicações empregadas na implementação convergiram na direção de proporcionar o sucesso da operacionalização do supervisionamento.

Importante destacar que, apesar da inviabilidade de execução do método *peak shaving*, este trabalho foi capaz de construir toda a amostragem de dados de uma unidade de geração de energia fotovoltaica, além de sua respectiva visualização, empregando integralmente softwares e protocolos de comunicação *open-sources*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de P&D ANEEL, e a CEEE-D | Grupo Equatorial, pelo financiamento deste trabalho via Contrato N° 5000003925.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2017). Nota Técnica n° 0056/2017-SRD/ANEEL, *ANEEL*, 28 páginas.

KIMAIYO, B. K e col. (2019). Effect of voltage unbalance on the power quality of three-phase grid-connected PV inverters, (2019), *International Engineer Electrical Congress*.

KARMIRIS. G.; TENGNÉR. T. (2013). Peak Shaving Control Method for Storage. *ABB AB*.

LEVRON, Y e col. (2012). Power systems' optimal peak-shaving applying secondary storage. *Electric Power Systems Research* Vol. 89.páginas 80-84.

4.DISSCUSSÕES

O artigo 1 apresenta a contextualização na qual a proposta deste trabalho está inserida, portanto discute-se como o método *peak shaving* minimiza os picos de demanda energética, partindo do ponto de vista conceitual até o emprego dos componentes físicos para atingir tal feito. Além da contextualização são expostos os materiais computacionais utilizados e sua respectiva organização cuja a intenção foi implementar a supervisão do inversor, bateria e medidor. Os resultados levantados foram obtidos através de amostragem dos dados presentes no inversor, durante sua operação conectada à rede elétrica.

Para enriquecer a compreensão do trabalho desenvolvido, nas referências deste trabalho, encontra-se o acesso para um repositório do *GitHub*, o qual contempla os códigos fonte desenvolvidos.

5.CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou a seleção e disposição dos componentes e protocolos computacionais, além da lógica de desenvolvimento do software, utilizados para atingir o monitoramento e controle da geração fotovoltaica com bateria, visando executar o método de gerenciamento de energia denominado *peak shaving*.

Após a execução da construção, o resultado atingido em termos de monitoramento se mostrou satisfatório. Contudo, devido a limitações tecnológicas intrínsecas do inversor empregado, não foi possível implementar a parametrização da operação da bateria do sistema, via comunicação serial.

Além das consequências e propostas descritas no artigo 1, o funcionamento integral da técnica *peak shaving* tem o potencial de gerar vantagens financeiras tanto para consumidores quanto para fornecedores de energia. Portanto, a continuidade e aperfeiçoamento deste trabalho pode trazer impactos no que diz respeito à eficiência do gerenciamento de energia.

REFERÊNCIAS

ANE - AGÊNCIA NACIONAL DE ENGENHARIA. **Comitê de Energia da Academia Nacional de Engenharia**. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: SITUAÇÃO ATUAL, PERSPECTIVAS E RECOMENDAÇÕES, Rio de Janeiro: ANE, 2016. Disponível em: <https://energiasrora.ima.com.br/wp-content/uploads/2020/01/ACUMULACAO-DE-ENERGIA-_Armazenamento-de-Energia-Fev-2017.pdf>. Acesso em 03 de jan. 2022.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL**. Assunto: Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024. Brasília: ANEEL, 2017. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/>. Acesso em: 03 de jan. 2022.

CÂNDIDO, D. B. **Controle supervisão aplicado a sistemas fotovoltaicos autônomos com topologia multi String**. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Centro de Tecnologia-Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria. 2010.

COULOURIS, G e col. **Sistemas Distribuídos: Conceitos e Projetos**. 5ª Edição. Cambridge: Pearson Education, 2013. 1048 p.

GITHUB. **TCC Peak Shaving**. 2022. Disponível em : <https://github.com/Jaolndio/TCC_peak_shaving>.

GUNEY, M. S e col. Classification and assessment of energy storage systems. 2017 **Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol 75**. 17 de nov. 2016, p.1187-1197. Anais eletrônicos. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116308218>>. Acesso em 21 de fev. de 2022.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION. IEEE Standard Glossary of Stationary Battery Terminology. **IEEE Power and Energy Society**. 2016. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7552407>>. Acesso em 03 de jan. 2022.

KARMIRIS. G.; TENGNÉR. T. PEAK SHAVING CONTROL METHOD FOR ENERGY STORAGE. **ABB AB**. Disponível em: <[https://www.sandia.gov/ess-ssl/EESAT/2013_papers/Peak_Shaving_Control_Metho](https://www.sandia.gov/ess-ssl/EESAT/2013_papers/Peak_Shaving_Control_Method_for_Energy_Storage.pdf)d_for_Energy_Storage.pdf>. Acesso em 03 de jan. 2022.

KIMAIYO, B. K e col. Effect of voltage unbalance on the power quality of three-phase grid-connected PV inverters. **International Engineer Electrical Congress**, 2019, São Francisco. Anais eletrônicos. São Francisco, CA, IEEECON, 2019. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8939046>>. Acesso em 12 de jan. 2022.

LEVRON, Y e col. Power systems' optimal peak-shaving applying secondary storage. 2012. **Electric Power Systems Research Vol. 89**. 12 de jan.2012, p. 80-84. Anais eletrônicos. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877961200048X?casa_token=0KMt1di-JDgAAAAA:wW-xL9jpJZ8aoTyPn0vmJ_EgcSWsVgZ5PkAzTDOQeNU0x8C5nlU2pa_SryRMUe2Xq_OP_r9Hsw>. Acesso em 10 de jan. 2022.

MAHMUD, K e col. Peak-Load Reduction by Coordinated Response of Photovoltaics, Battery Storage, and Electric Vehicles. **IEEE Acess Vol. 6**. 16 de maio.2018, p. 29353-29365. Anais eletrônicos. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8360096>>. Acesso em 12 de jan. 2022.

MANOJKUMAR, R e col. Optimal Peak Shaving Control Using Dynamic Demand and Feed-In Limits for Grid-Connected PV Sources With Batteries. **IEEE Systems Jornal Vol. 15**. 13 de jan.2021, p. 5560 - 5570. Anais eletrônicos. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9321511>>. Acesso em 12 de jan. 2022.

MODBUS ORGANIZATION IND. MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION. V1.1b3. **Modbus.org**, 2012. Disponível em: <https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2022.

MÜLLER, M. L. **Sistema Supervisório e Aquisição de Dados de uma Usina de Geração Fotovoltaica**. 2017. 93 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação)-Departamento de Automação e Sistemas-Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC. Florianópolis. 2017.

NOSHAHR, J. B e col. Operational Planning of Inverter Control in a grid connected Microgrid with hybrid PV and BESS. **IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)**, 2020, Madrid. Anais eletrônicos. Madri, Espanha. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9160692>>. Acesso em 14 de jan. 2022.

OASIS OPEN. MQTT VERSION 5.0. **OASIS OPEN**. 2019. Disponível em <<https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.pdf>> Acesso em: 11 de jan. 2022.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004. 114 p. Disponível em: <<https://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/livros/livro-edificios-solares-fotovoltaicos.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2022.

SERRA, E. T. e col. **Armazenamento de Energia: Situação Atual, Perspectivas e Recomendações**. 2016. Disponível em: <<https://anebrasil.org.br/wp-content/uploads/2018/05/Armazenamento-de-EnergiaFv-2017.pdf>>. Acesso em: 7 de jan. 2022.

VINEETHA, C. P e col. Economic Analysis of Off Grid and On Grid Hybrid Power System. **International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies**, 2014, Nagercoil. Anais eletrônicos. Nagercoil, India, ICCPCT. Disponível em <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7054841>>. Acesso em 14 de jan. 2022.