

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

BRUNA NUNES FREITAS

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE ENERGIA**

ARARANGUÁ

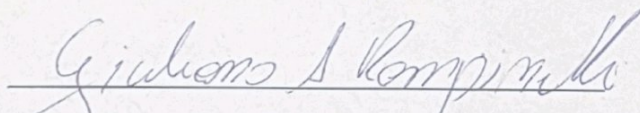
2017

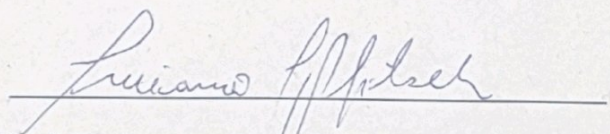
BRUNA NUNES FREITAS

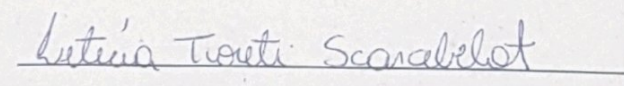
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

Aprovado em: 01/12/2017


Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli (Orientador)


Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher (Examinador)


Msc. Eng. Eletricista Leticia Toret Scaravelot
(Examinador)

ANÁLISE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM BATERIA INTEGRADA DE ALTO DESEMPENHO

BRUNA NUNES FREITAS*

RESUMO

A demanda de energia elétrica é uma variável em crescimento mundial, devido à expansão populacional e a urbanização. O Brasil apresenta o maior índice de crescimento no consumo e geração de energia da América Latina. A energia solar fotovoltaica tem maturidade tecnológica e a produção em escala permitiu a redução de custos para o consumidor. Desde abril de 2012, o Brasil segue a regulamentação para o processo de geração distribuída pela ANEEL, para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede. Na nota técnica nº 0056 da ANEEL, publicada em 25 de maio de 2017, é apresentado um crescimento de potência instalada de 407% até maio de 2017, onde a classe residencial representa 79,5% dos consumidores de geração distribuída. A partir desse cenário, foi estudado um modelo de curva de carga residencial, o qual foi utilizado para montar um perfil de consumo de uma semana que foi replicado durante um ano para ser utilizado nas simulações do sistema fotovoltaico de geração distribuída. Este sistema possui potência de 4 kWp e apresenta bancos de baterias Li-íon e Pb-ácido, com armazenamento de energia variando entre 2, 4 e 10 kWh. A energia das baterias é consumida para verificar seu efeito no consumo de energia nos horários de ponta. Após a análise desse sistema, verificou-se que um banco de baterias de 2 kWh, com as características do produto apresentado, não consegue suprir toda a demanda da carga nos horários de maior consumo desse sistema simulado, visto que foi mantida a potência do sistema para manter o fator de dimensionamento do inversor em 0,97. Para as baterias de 4 e 10 kWh, o consumo nos horários de ponta é suprido pelos acumuladores, sendo que a última, há energia excedente para ser consumida em horários fora de ponta, mas por conta da configuração do software o excedente será injetado na rede.

Palavras-chave: Geração distribuída. Bateria integrada ao inversor. Curva de carga residencial.

* Graduanda do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88900-000. E-mail: bruna.nf@live.com

ANALYSIS OF A DISTRIBUTED GENERATION PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH HIGH PERFORMANCE INTEGRATED BATTERY

ABSTRACT

The demand for electric power is a variable in world growth due to population expansion and urbanization. Brazil has the highest growth rate in consumption and generation of energy in Latin America. Photovoltaic solar energy has technological maturity and the scale production allowed the reduction of costs for the consumer. Since April 2012, Brazil has followed the regulations for the generation process distributed by ANEEL, for the connection of photovoltaic systems to the grid. ANEEL technical note n° 0056, published on May 25, 2017, presents an installed power growth of 407% until May 2017, where the residential class represents 79.5% of the consumers of distributed generation. From this scenario, a residential load curve model was studied, which was used to build a consumption profile of one week that was replicated for one year to be used in the distributed generation photovoltaic system simulations. This system has a power of 4 kW_P and features banks of Li-ion and Pb-acid batteries, with energy storage ranging from 2, 4 and 10 kWh. Battery power is consumed to check its effect on peak power consumption. After analyzing this system, it was verified that a battery bank of 2 kWh, with the characteristics of the presented product, cannot supply all the demand of the load in the times of greater consumption of this simulated system, since the power of the system was maintained to keep the inverter sizing factor at 0.97. For batteries of 4 and 10 kWh, consumption at peak times is supplied by the accumulators, and the latter, there is excess energy to be consumed at off-peak times, but due to the configuration of the software the surplus will be injected in the grid.

Keywords: Distributed generation. Inverter battery. Residential charge curve.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
2	REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1	CURVA DE CARGA RESIDENCIAL	8
2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	9
2.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	9
2.3.1	Sistemas fotovoltaicos isolados.....	11
2.3.2	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede.....	11
2.4	COMPONENTES DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	13
2.4.1	Módulo solar fotovoltaico.....	13
2.4.2	Inversor	14
2.4.3	Bateria	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1	CURVA DE CARGA RESIDENCIAL DE REFERÊNCIA.....	17
3.2	SIMULAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO NO SAM	21
3.2.1	Despacho de armazenamento.....	22
3.3	ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS.....	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1	CURVA DE CARGA DO SISTEMA SIMULADO	23
4.2	CURVA DE CARGA COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	25
4.3	CURVA DE CARGA COM BATERIA LI-ÍON.....	26
4.4	CURVA DE CARGA COM ACUMULADORES PB-ÁCIDO.....	29
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
	REFERÊNCIAS	34
	AGRADECIMENTOS	38
	APÊNDICE A – Energia consumida da rede e injetada na rede pelos sistemas sem bateria e com bateria Li-íon de 2 kWh referente à uma semana	39

1 INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica no mundo é uma variável em crescimento devido à expansão populacional e a urbanização. Junto com os avanços da tecnologia, a população encontra-se cada vez mais dependente da energia elétrica. E ainda, acompanhando o aumento da demanda de energia tem-se o crescimento em pesquisa e em produtos voltados à geração de energia renovável.

Historicamente, o planejamento do setor elétrico brasileiro foi pautado por altos investimentos em grandes hidrelétricas e pela utilização das usinas térmicas como uma energia de reserva, acionadas quando as hidrelétricas não suprem a demanda. Conforme o relatório Alvorada de 2016, 61% da eletricidade do Brasil vem de grandes hidrelétricas, e 17,5% são provenientes de termelétricas movidas a combustíveis fósseis. Porém, as hidrelétricas causam um grande impacto no ambiente em que são instaladas, pois afetam a biodiversidade das áreas inundadas.

O Brasil é o país que apresenta o maior índice de crescimento no consumo e geração de energia da América do Sul e Central e também é o que mais cresce no uso de energias renováveis, de acordo com o BP (2017).

A energia solar fotovoltaica tem maturidade tecnológica e a produção em escala permitiu a redução de custos para o consumidor. A tecnologia é consolidada em países como a Alemanha, que possui diversos programas subsidiados pelo governo de implantação de sistemas fotovoltaicos nas residências, como o *1,000 Roofs Program*, seguido pelo *100,000 Roofs Program*. No Brasil, um importante passo nesta direção foi a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede em abril de 2012, que regulamenta o processo de Geração Distribuída (GD) no país e faz possível a geração de energia elétrica pelo próprio consumidor e a contabilização de créditos pelas concessionárias. Em termos de faixas de potência, observa-se que 72% dos equipamentos têm potência menor ou igual a 5 kW, o que está associado principalmente ao perfil dos consumidores residenciais (ANEEL REN 687, 2015; SOUZA, 2016, ZOMER, 2014).

A Nota Técnica nº 0056 publicada no dia 25 de maio de 2017 pela ANEEL, apresenta a atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte. A Figura 1 mostra a evolução da potência instalada desde 2012, evidenciando o forte crescimento em 2016, com aumento de 407% em relação a 2015.

Com relação à participação dos consumidores, destacam-se a classe residencial (79,5%), conforme ilustrado na Figura 2. Em termos de potência instalada, 72% tem potência menor ou igual a 5 kW, que também está associado ao perfil de consumidores residenciais (ANEEL, 2017).

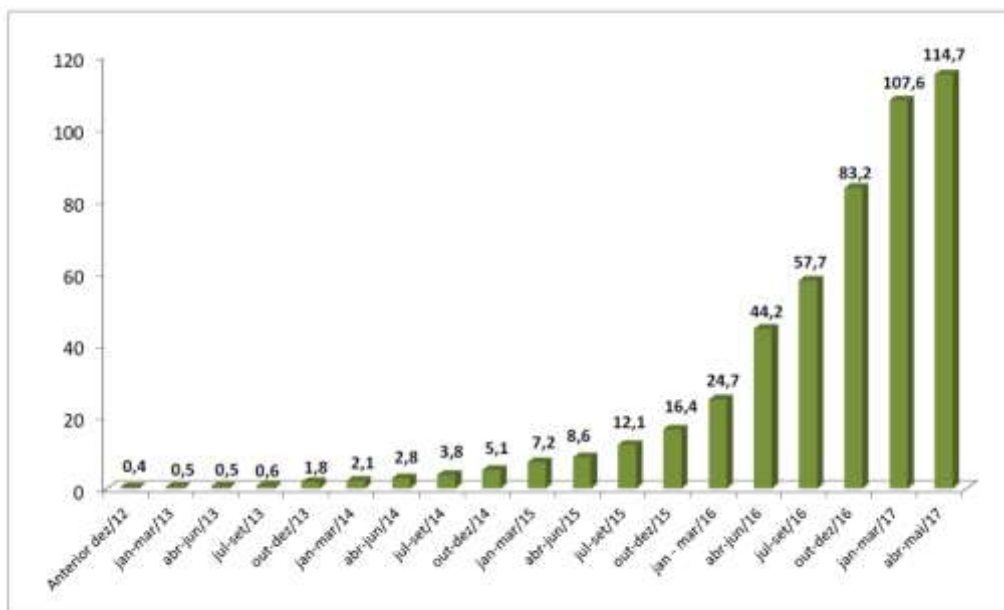


Figura 1 - Evolução da potência instalada (MW) até 23/05/17 (Fonte: ANEEL, 2017)

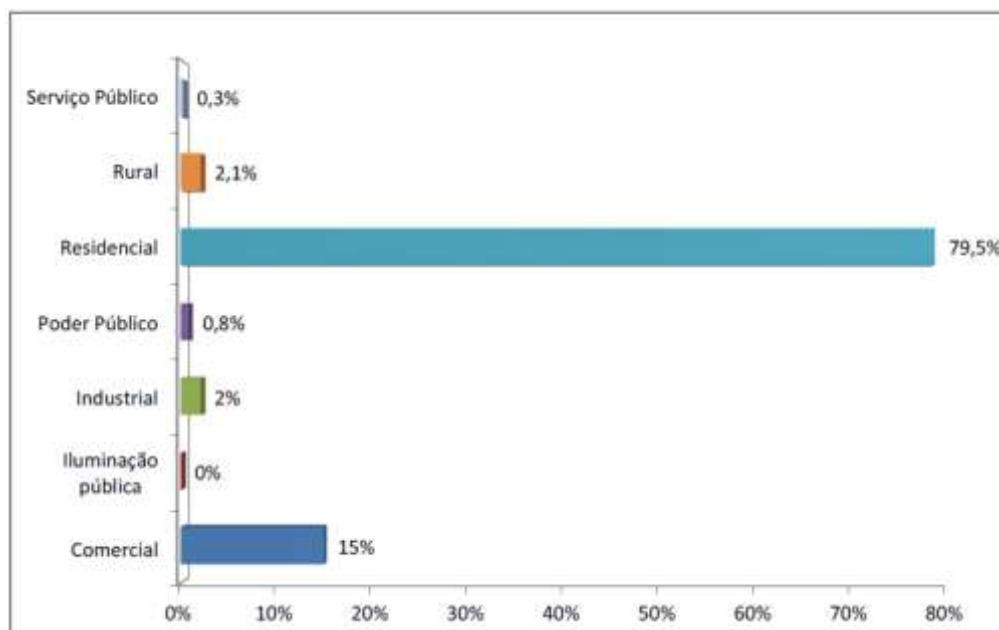


Figura 2 - Classes de consumo dos consumidores até 23/05/17 (Fonte: ANEEL, 2017).

Apesar dos dados apresentados mostrarem um aumento significativo no uso da geração distribuída, no Brasil, a GD ainda encontra-se pouco difundida. É visto que grandes esforços têm sido direcionados ao aproveitamento da energia solar no país, visando o atendimento de comunidades isoladas da rede de energia elétrica e ao desenvolvimento regional, mas ainda assim não há base suficiente para o desenvolvimento de tecnologias internas no que concerne aos equipamentos necessários para essa aplicação (MICHELS, OSAWA, SANTOS, 2015).

Entretanto, como um sistema fotovoltaico gera energia somente durante o dia, para o consumidor residencial que está conectado à rede elétrica o consumo de energia no período noturno provém da rede, justamente no chamado horário de ponta, em que a rede se encontra sobrecarregada.

Para fazer a redução da demanda de energia provinda da rede durante o horário de ponta, pode-se adicionar acumuladores de energia, que devem suprir parte ou toda a demanda de energia no horário de ponta. A adição de um banco de baterias no sistema pode se tornar viável para a residência realizar a transição à tarifa branca. A Tarifa Branca é uma nova opção que sinaliza aos consumidores a variação do valor da energia conforme o dia e o horário do consumo. Ela é oferecida para as unidades consumidoras que são atendidas em baixa tensão (127, 220, 380 ou 440 Volts) e cria condições que incentivam alguns consumidores a deslocarem o consumo dos períodos de ponta para aqueles em que a rede de distribuição de energia elétrica tem capacidade ociosa.

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta como objetivo principal analisar o efeito de um inversor com uma bateria integrada de alto desempenho em um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) para uma demanda residencial, realizando simulações em *software* para comparar a frequência que este sistema injeta energia na rede com dois tipos de baterias, Chumbo-ácido e Lítio-íon, dimensionadas em diversas potências para melhorar o nível de comparação, programadas pelo mesmo *software* para carregarem somente pelo sistema simulado e descarregarem nos horários de ponta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão descritos pressupostos teóricos básicos relacionados a temática estudada neste trabalho, a fim de demonstrar questões que influenciam um sistema fotovoltaico conectado à rede com e sem bateria.

2.1 CURVA DE CARGA RESIDENCIAL

O perfil da curva de carga residencial é formado pelo consumo de energia elétrica baixo ao longo do dia, com maior ascendência a partir das 17:00 horas, visto que comumente é o horário em que as pessoas começam a retornar para suas residências e também é o horário em que a incidência solar diminui. Convencionalmente, o pico de consumo ocorre por volta das 20:00 horas, período em que há o maior uso de eletrodomésticos, principalmente chuveiros elétricos (BRAGA, 2014; NETO, 2016). A Figura 3 representa a curva de carga de uma residência.

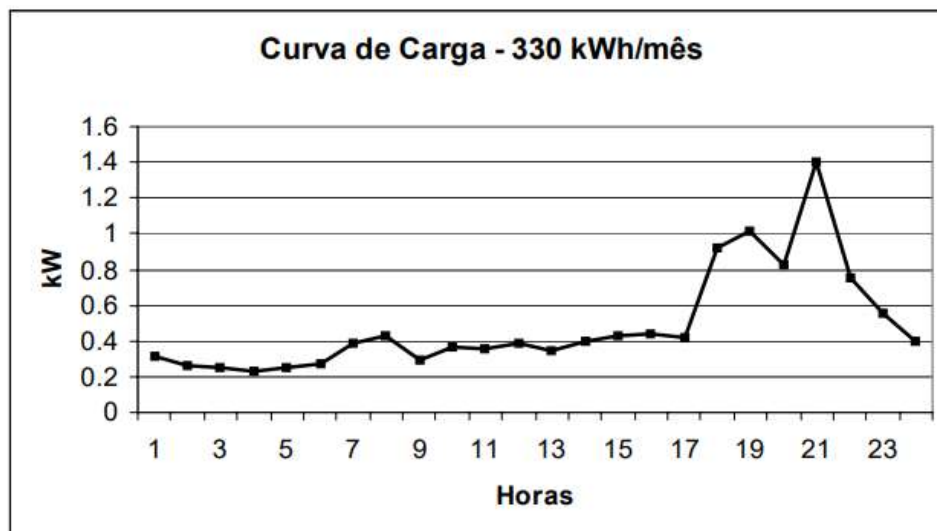


Figura 3 - Curva de carga de um consumidor residencial (Fonte: FRANCISQUINI, 2006).

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Geração distribuída (GD) pode ser definida como a fonte de potência elétrica conectada diretamente à rede de distribuição, caracterizando uma proximidade com o consumidor (ANTUNES, 2016). Além de ser uma área chave para a sustentabilidade, causa um grande impacto frente à geração centralizada devido à economia nos investimentos em linhas de transmissão e distribuição de energia (LOPES; FERNANDES; MUCHALUAT-SAADE, 2015; LUIZ, 2012).

O uso de fontes renováveis ganha destaque entre as alternativas existentes para serem utilizadas na forma distribuída. A geração de energia por sistemas fotovoltaicos aparece como principal alternativa para essa utilização, tornando-se competitiva economicamente com as formas de geração tradicionais a cada ano (ANTUNES, 2016).

O sol é caracterizado como a fonte primária mais abundante de energia para o nosso planeta. É possível dizer que, com exceção da energia nuclear, todas as outras fontes de energia, renováveis ou não, dependem da energia radiante do sol para existirem (ROCHA, 2015).

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é obtida pelo efeito fotovoltaico, descoberto em 1839 por Edmond Becquerel e implica no aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica causada pela adsorção de luz, onde ocorre a conversão direta da luz em eletricidade. Para este processo de conversão, a célula fotovoltaica deve ser fabricada a

partir de um material semicondutor (TAVARES, 2014; JARDIM et.al. 2004). Quando os fótons incidem sobre a célula fotovoltaica, através de uma junção P-N (positivo-negativo), a energia de uma fração desses fótons pode excitar elétrons que contribuem para estabelecer uma corrente elétrica, representado na Figura 4. Dentre os materiais mais adequados para a conversão de radiação solar em energia elétrica, destaca-se o silício, principal matéria prima de uma célula solar fotovoltaica (SILVA, 2014).

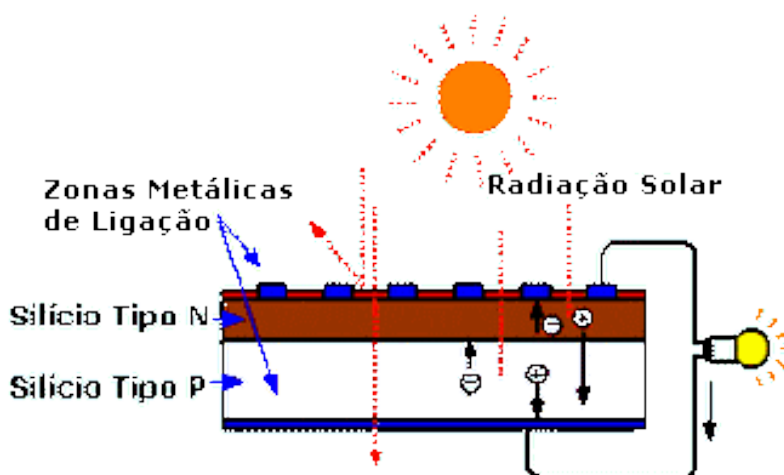


Figura 4 – Representação do efeito fotovoltaico (Fonte: ZUFFO, 2017).

A célula é o menor elemento do sistema fotovoltaico e sua eficiência de conversão é medida pela proporção de radiação solar incidente sobre a sua superfície que é convertida em energia elétrica (SILVA, 2014).

Um conjunto de células forma um módulo fotovoltaico. Os módulos podem ser ligados em série, formando um *string*, e um conjunto de strings ligadas em paralelo formam um arranjo. Tais ligações entre células, módulos e strings podem ser conectadas em série e/ou paralelo para se obter o nível de tensão e corrente requerido por cada sistema (PINHO; GALDINO, 2014). Posteriormente, um inversor converte a corrente contínua em corrente alternada para disponibilizar o consumo da energia que está sendo gerada (TAVARES, 2014; JARDIM et. al., 2004).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como sistemas isolados ou autônomos (*off-grid*), híbridos ou conectados à rede (*on-grid*). Nesta seção, os sistemas *off-grid* e *on-grid* serão estudados.

2.3.1 Sistemas fotovoltaicos isolados

Os sistemas fotovoltaicos isolados costumam ser instalados em regiões onde não se tem disponibilidade de fornecimento de energia elétrica através das concessionárias ou quando se deseja mantê-lo isolado de outros sistemas energéticos (BENEDITO, 2009; SILVA, 2014).

O sistema fotovoltaico autônomo, apresentado na Figura 5, é composto basicamente por módulos fotovoltaicos, um inversor, um controlador de carga e um banco de baterias. Para que a energia elétrica produzida durante os horários de alta incidência solar seja armazenada, utilizam-se os acumuladores; estes permitem utilizar a energia armazenada nos horários em que a radiação solar não esteja disponível. Já os controladores de carga, têm a função de manter a bateria do sistema saudável, evitando que sejam sobrecarregadas, ou descarregadas profundamente, a fim de garantir que toda a energia gerada pelo sistema seja armazenada com maior eficácia nas baterias (LOPEZ, 2002; SILVA, 2013).

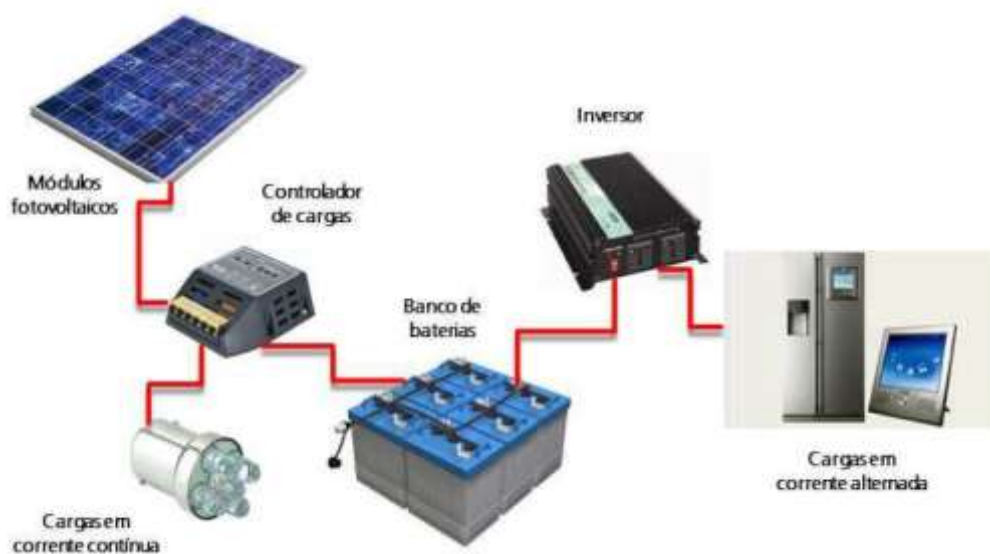


Figura 5 - Esquema simplificado de um sistema fotovoltaico isolado (Fonte: SILVA, 2014).

2.3.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm sua energia produzida consumida pela carga ou injetada na rede elétrica convencional. Essa injeção de energia produzida pelo sistema fotovoltaico na rede pode ser acumulada em forma de créditos, conforme a legislação do país. Durante o período em que não houver geração de energia, a rede deverá fornecer a energia necessária para o consumidor (SILVA, 2014; SILVEIRA, 2013; BENEDITO, 2009).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são compostos basicamente por módulos fotovoltaicos e inversores, conforme a Figura 6, podendo haver a necessidade de outros componentes, de acordo com os requisitos exigidos pela concessionária local. Para obter-se controle sobre a energia injetada e consumida da rede, é necessário o uso de um medidor bidirecional ou de dois medidores unidirecionais em sentidos opostos (SILVA, 2014).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede ainda podem possuir um banco de baterias, conforme a Figura 7, que podem ser utilizadas em situações como back-up, situações emergenciais e/ou em localidades onde o abastecimento de energia pela rede não apresenta boa qualidade como consequência da pouca capacidade da linha em relação ao consumo. A geração de energia que ocorre durante o dia, deve suprir a demanda e carregar as baterias para que durante a noite, principalmente nos horários de pico de consumo, o banco de baterias possa suprir parte da demanda das cargas instaladas (BARBOSA, SILVA, MELO, 2007).

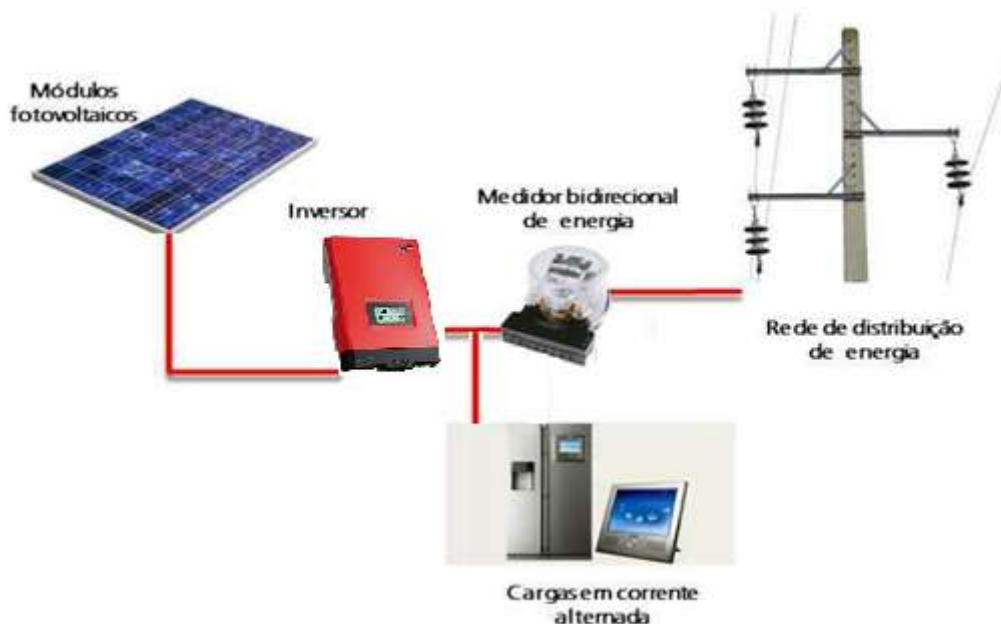


Figura 6 – Esquema simplificado de um sistema fotovoltaico conectado à rede

(Fonte: Adaptado de SILVA, 2014).

Para a redução da demanda do horário de ponta com a geração excedente, é necessário que uma unidade consumidora a qual realiza esse tipo de controle apresente um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia (Figura 7), onde a geração excedente não é injetada na rede, mas é armazenada para posterior utilização nos horários de ponta (NETO, 2016). Deste modo, o sistema permite diminuir a carga aparente da rede nos momentos de maior consumo. Como consequência, a qualidade do abastecimento de energia elétrica pela rede melhora, afetando positivamente a economia do sistema (BARBOSA, SILVA, MELO, 2007).

Em um sistema fotovoltaico conectado à rede há flutuações de tensão, que podem gerar uma interação adversa entre os componentes do sistema fotovoltaico com as cargas instaladas e a rede de distribuição. A saída intermitente da geração fotovoltaica pode causar também um aumento na frequência de atuação desses dispositivos, reduzindo a expectativa de vida de seus componentes. Por essas razões o uso de acumuladores de energia pode facilitar a integração do sistema de geração fotovoltaica e aumentar sua eficiência operacional por todo o sistema de distribuição elétrica (HILL et.al, 2014).

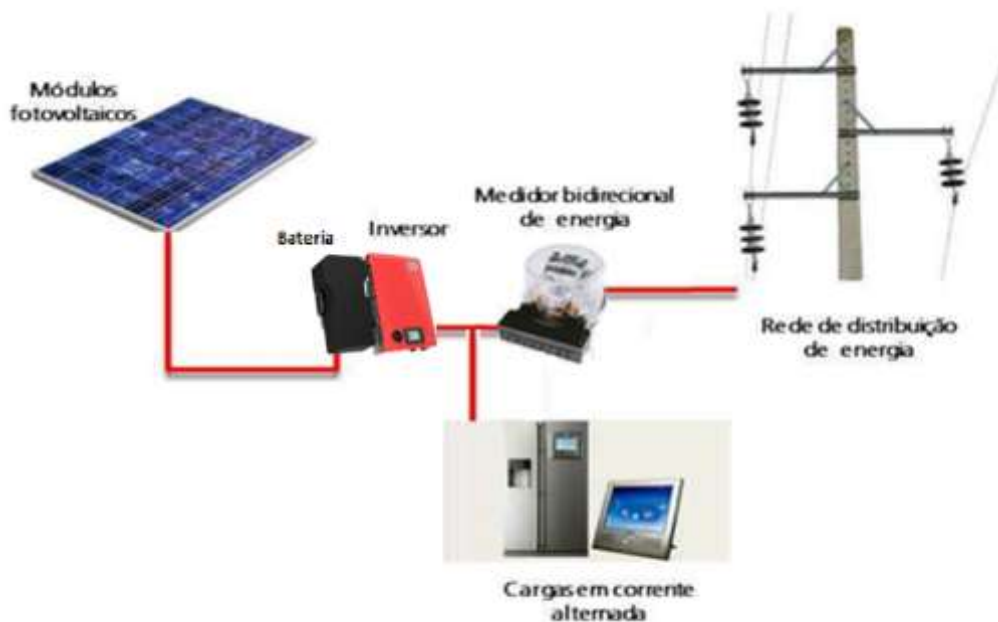


Figura 7 - Configuração modelo para um sistema fotovoltaico conectado à rede com banco de baterias (Fonte: Adaptado de SILVA, 2014).

2.4 COMPONENTES DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

A seguir serão brevemente apresentados os componentes do sistema fotovoltaico citado anteriormente.

2.4.1 Módulo solar fotovoltaico

O módulo solar fotovoltaico é a base do sistema gerador. Formado pelo conjunto de células, feitas de material semicondutor, sendo o silício a principal matéria prima para este fim, são capazes de converter diretamente uma parte do espectro da radiação solar em corrente elétrica. (SILVEIRA, 2013; RÜTHER, 2004).

A quantidade de módulos conectados em série, formando *strings*, irá determinar a tensão de operação do sistema em corrente contínua (CC). Conectando as *strings* em paralelo, a corrente do gerador solar é definida. A potência instalada é obtida através da soma da potência nominal de cada módulo (RÜTHER, 2004).

Os módulos mais comuns são formados por células de silício cristalino (c-Si), conectadas em série sobre um substrato de tedlar, recobertas com EVA e vidro temperado de alta transmitância e alta resistência a impactos. Para garantir a proteção do módulo, ao manuseá-lo, o conjunto pode ser protegido por uma estrutura metálica a fim de garantir sua rigidez (BENEDITO, 2009). A Figura 8 mostra a ilustração de um corte de um módulo comercial.

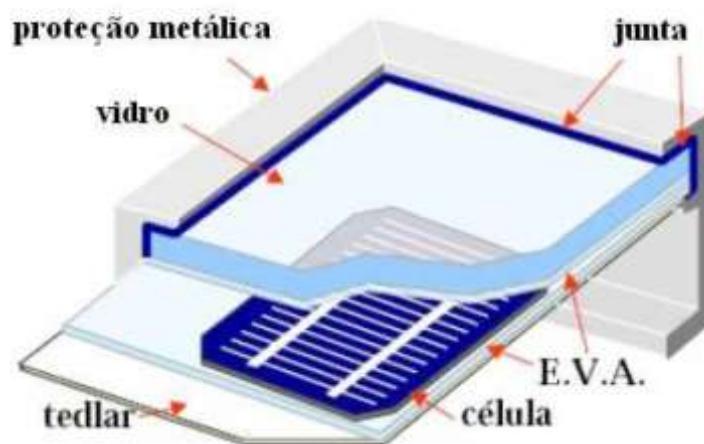


Figura 8 – Ilustração do corte de um módulo comercial (Fonte: BENEDITO, 2009).

2.4.2 Inversor

As células e os módulos de um sistema fotovoltaico trabalham em corrente contínua, e para conectá-los à rede o inversor é o responsável pela conversão para corrente alternada (CA) e deve garantir os padrões de qualidade da energia entregue pelo sistema à rede. Deve também apresentar eficiência superior a 90%, e ainda garante a segurança dos sistemas e das pessoas envolvidas, pois desconecta a instalação em caso de falhas na rede (SILVEIRA, 2013; RODRÍGUEZ, 2002).

O objetivo do inversor é obter sinais de saída com baixo conteúdo harmônico e alto fator de potência, esse resultado é obtido aumentando a frequência de comutação dos semicondutores e filtrando adequadamente o sinal de saída que então será regulado pelo inversor. A regulação é obtida basicamente de três formas: ajustando a tensão antes do inversor (conversores CC/CC), regulando a tensão no próprio inversor através de seu sistema de controle ou regulando o sinal do inversor mediante um autotransformador (RAMPINELLI, KRENZINGER, ROMERO, 2013).

Os inversores podem ser classificados para serem utilizados em sistemas isolados, sistemas conectados à rede sem baterias e sistemas conectados à rede com baterias (LOPEZ, 2002). O presente trabalho apresentará o estudo de sistemas conectados à rede com e sem baterias.

Para os sistemas conectados à rede, o gerador da concessionária local cumpre o papel de fonte de tensão e o inversor funciona como uma fonte de corrente ao sistema conectado. Para esse tipo de sistema, os inversores devem possuir um rastreador de tensão, como medida de proteção, para se desconectar automaticamente quando o sistema atingir sua máxima tensão, para evitar danos tanto no sistema quanto nas cargas instaladas (SILVA, 2014; TANT et.al, 2013).

Aos inversores conectados à rede com bateria, se a rede se desconecta do sistema, o inversor deve ser capaz de realizar uma comutação sincronizada com a rede através de sua fonte de corrente interna, sincronizando a fonte de tensão de saída para as cargas de emergência serem alimentadas (SILVA, 2014).

2.4.3 Bateria

As baterias eletroquímicas são uma forma de armazenamento de energia que podem ser utilizadas em sistemas fotovoltaicos, pois são capazes de transformar diretamente energia elétrica em energia potencial química e posteriormente converter, diretamente, a energia potencial química em energia elétrica (SEGUEL, 2009).

Também chamadas de acumuladores eletroquímicos, as baterias são classificadas em duas categorias: baterias primárias e secundárias. Na primeira, são dispositivos eletroquímicos que, uma vez esgotado os reagentes que produzem a energia elétrica são descartados por não serem recarregáveis. As baterias secundárias, através da aplicação de uma corrente elétrica em seus terminais podem reverter as reações responsáveis pela geração de energia elétrica e então, carregam novamente. Para os sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica, são utilizados acumuladores secundários. Dentre inúmeros tipos de baterias, as mais comuns são as chumbo-ácido e as níquel-cádmio. Porém, por apresentarem custo menor, as chumbo-ácido são mais populares no mercado (SEGUEL, 2009; PINHO, GALDINO, 2014).

A vida útil de uma bateria é medida pelo número de ciclos, com determinada profundidade de descarga que uma célula ou bateria pode ser submetida antes de apresentar falhas, dependendo da profundidade de descarga do ciclo, da corrente de descarga e da temperatura de operação. Em um sistema fotovoltaico, normalmente os ciclos de carga/descarga são diários, ou seja, o número de ciclos de vida corresponde ao número de dias de serviço. A capacidade de uma bateria também é reduzida pelo seu envelhecimento, que está diretamente relacionado com a temperatura de operação e a forma de armazenamento das células (PINHO, GALDINO, 2014). As baterias estacionárias atuais permitem uma profundidade de descarga de até 80%, que expressa a quantidade de carga que pode ser extraída

de uma bateria plenamente carregada. A Figura 9 mostra a relação inversa e exponencial entre a profundidade de descarga e ciclo de vida (PEREIRA, 2016).

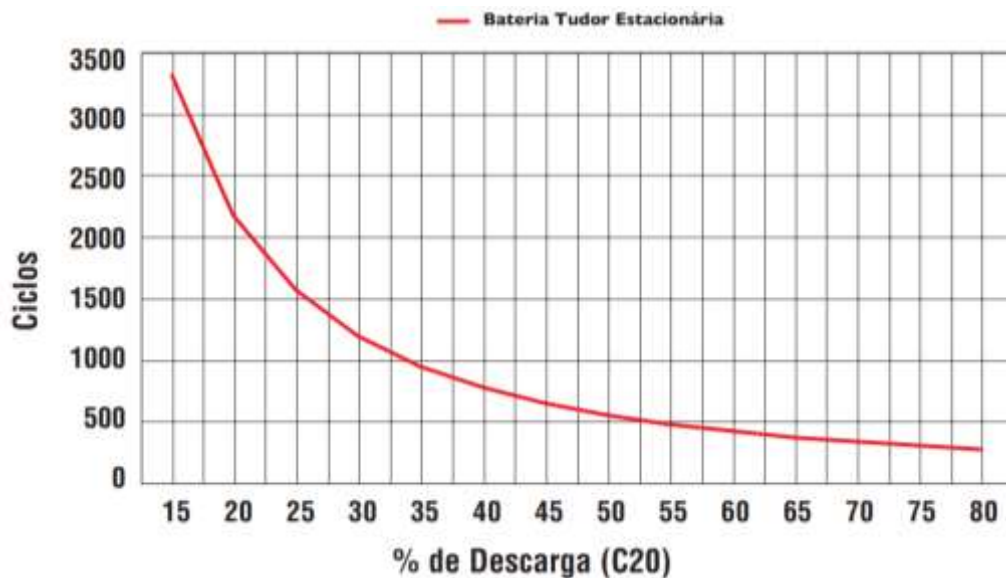


Figura 9 – Ciclos de vida em função da profundidade de descarga (Fonte: TUDOR, 2016.)

Em sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica, as baterias são utilizadas para atender a demanda nos períodos em que a geração não é suficiente ou é nula (dias com níveis baixos de irradiância solar, no período noturno ou em dias chuvosos e nublados). Para esses sistemas, parte da energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para atender a demanda em outros momentos (PINHO, GALDINO, 2014).

Os acumuladores mais populares instalados em sistemas fotovoltaicos são as baterias estacionárias, que são projetadas para oferecer quantidade constante de corrente por um longo período de tempo e são projetadas para serem descarregadas completamente várias vezes. Elas podem suportar altas correntes de descarga, mas não tão frequente quanto uma bateria automotiva, que é o segundo tipo de bateria popular em sistemas fotovoltaicos, pois apresenta baixo custo. Ambas usam a mesma química em sua operação, porém as baterias automotivas possuem um tempo de vida menor, levando a substituições frequentes, o que acaba comprometendo a confiabilidade do sistema (VERA, 2009).

A tecnologia das baterias de Lítio Íon (Li-íon) é considerada promissora e apresenta vasto espaço para desenvolvimento, possuindo vantagens como alta densidade energética e possibilidade de suportar altas taxas de carga e descarga, baixo tempo de carga e baixa taxa de autodescarga (PINHO, GALDINO, 2014). Também se destaca por ser mais compacta do que os acumuladores de chumbo-ácido e níquel-cádmio, conforme a Figura 10. Geth *et.al* (2011) apresentou uma análise técnico-econômica e de expectativa de vida entre baterias Chumbo-ácido e Lítio-íon como acumuladores para sistemas de energia, utilizando como parâmetros

baterias com 10 anos de duração, enquanto a bateria de Pb-ácido dura 400 ciclos, a de Li-íon dura 3000 ciclos e enquanto a primeira leva 3 horas para carregar, a segunda carrega em 1 hora. Apesar de apresentar custo mais elevado, para sistemas menores, as baterias Li-íon mostram-se mais eficazes.

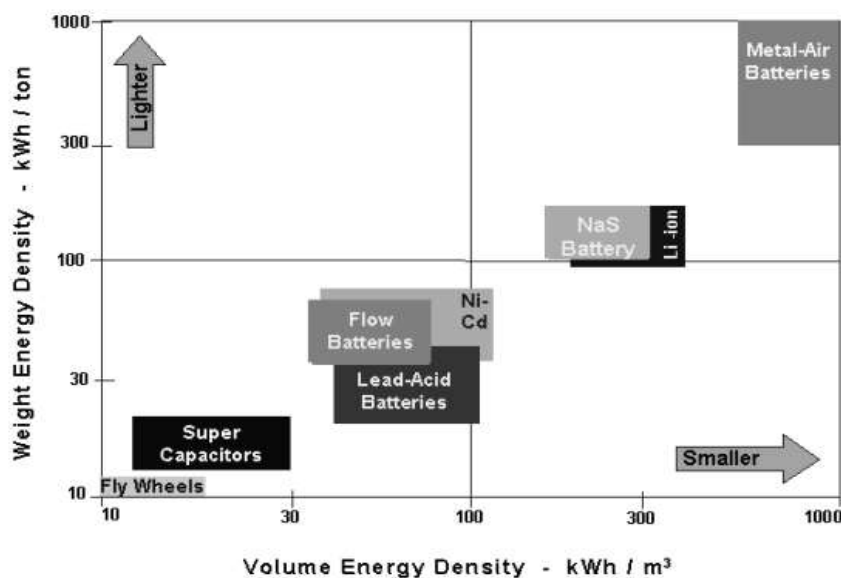


Figura 10 - Densidade de energia de diferentes tecnologias de acumuladores (Fonte: NOURAI, 2002).

As baterias do tipo Lítio-íon, Níquel-cádmio e Chumbo-ácido, são consideradas ideais para sistemas de aplicações em menor escala, por possuírem tecnologias mais avançadas. Porém, em sistemas de larga escala seu custo tende a inviabilizar seu uso (HILL et.al 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de analisar o efeito de um sistema fotovoltaico conectado à rede com banco de baterias sobre o consumo de energia da rede de uma residência nos horários de ponta, este capítulo apresentará a metodologia utilizada para esta análise.

3.1 CURVA DE CARGA RESIDENCIAL DE REFERÊNCIA

Para realizar as simulações dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede adotaram-se as curvas de cargas distintas em dias úteis, sábados e domingos, representadas nas Figuras 11, 12 e 13, respectivamente, para classe de consumo de 301 a 500 kWh. Baseando-se nos dados

apresentados pelas curvas de carga, foi criada uma semana padrão, com os dados horários e essa semana foi repetida até obter-se às 8760 horas de consumo, referente a um ano civil.

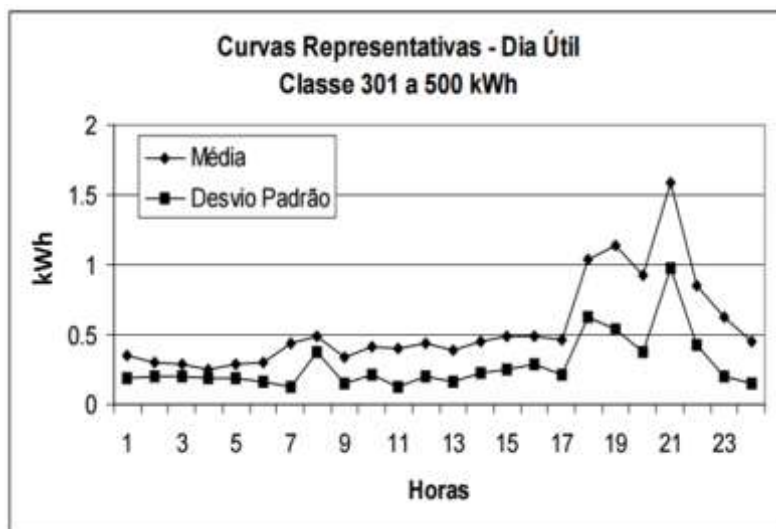


Figura 11 – Curvas representativas de dias úteis da classe 301 a 500 kWh/mês (Fonte: FRANCISQUINI, 2006).

O perfil horário anual de consumo de uma residência foi inserido no *software System Advisor Model (SAM)*, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) dos Estados Unidos.

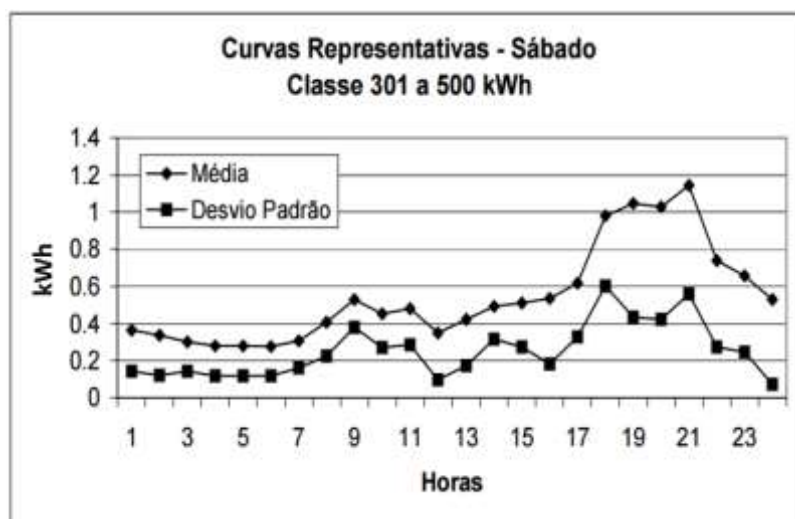


Figura 12 – Curvas representativas de sábados da classe 301 a 500 kWh/mês (Fonte: FRANCISQUINI, 2006).

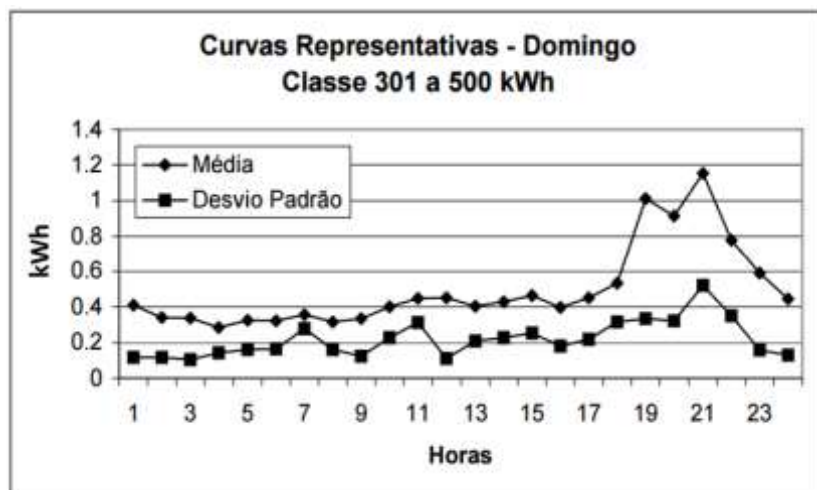


Figura 13 – Curvas representativas de domingo de classe 301 a 500 kWh/mês (Fonte: FRANCISQUINI, 2006).

Para fins de comparação de resultados reais com os simulados, adotou-se um modelo de curva de geração fotovoltaica típico (Figura 14) e um modelo para curva de carga residencial junto com a geração fotovoltaica (Figura 15) que mostra os horários que um sistema fotovoltaico conectado à rede gera mais energia e tem o excedente injetado na rede e quando o sistema não está gerando energia e sim, recebendo essa energia da rede, sendo P a curva de carga original, FV a curva de geração fotovoltaica e P - FV a curva de carga resultante para as curvas de carga residencial, ambas figuras com a base p.u. no pico de geração do sistema fotovoltaico (NETO, 2016).

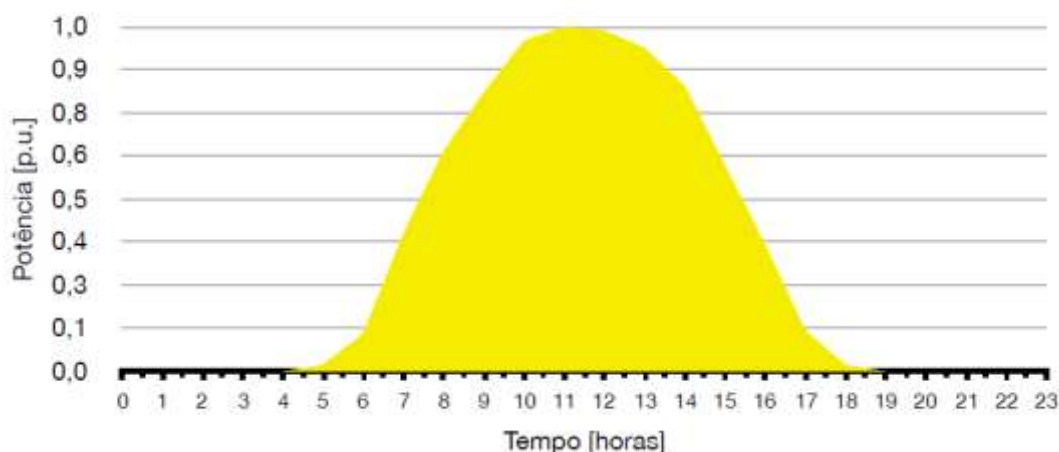


Figura 14 – Curva de geração fotovoltaica típica (Fonte: NETO, 2016).

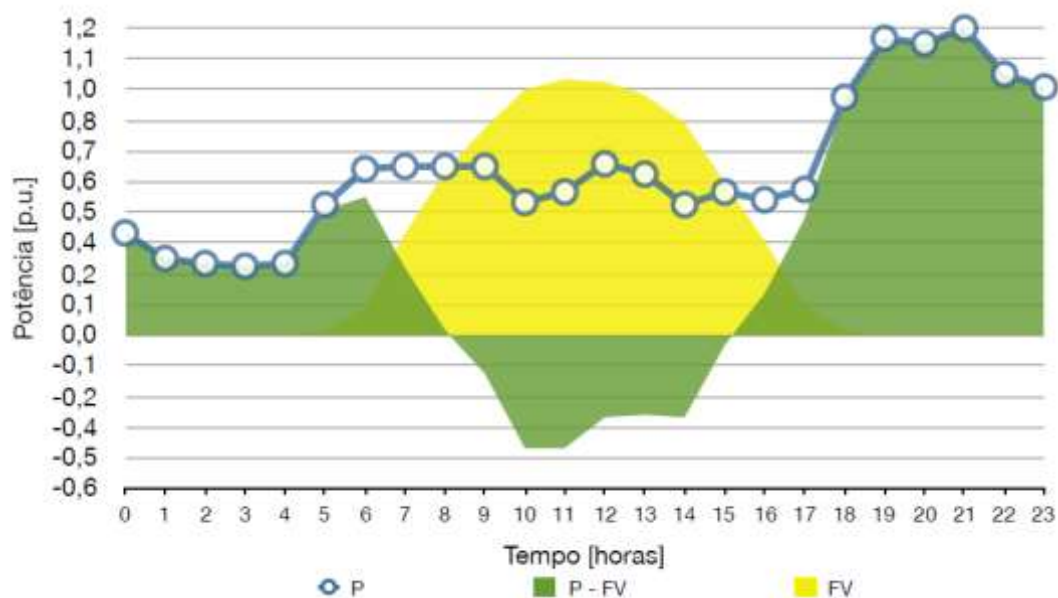


Figura 15 - Curva de carga residencial resultante da utilização da geração fotovoltaica (Fonte: NETO, 2016).

Para representação de um sistema fotovoltaico utilizando acumuladores para armazenamento de energia, foi adotada a Figura 16 como base para apresentar o funcionamento da gestão ativa da demanda (NETO, 2016).

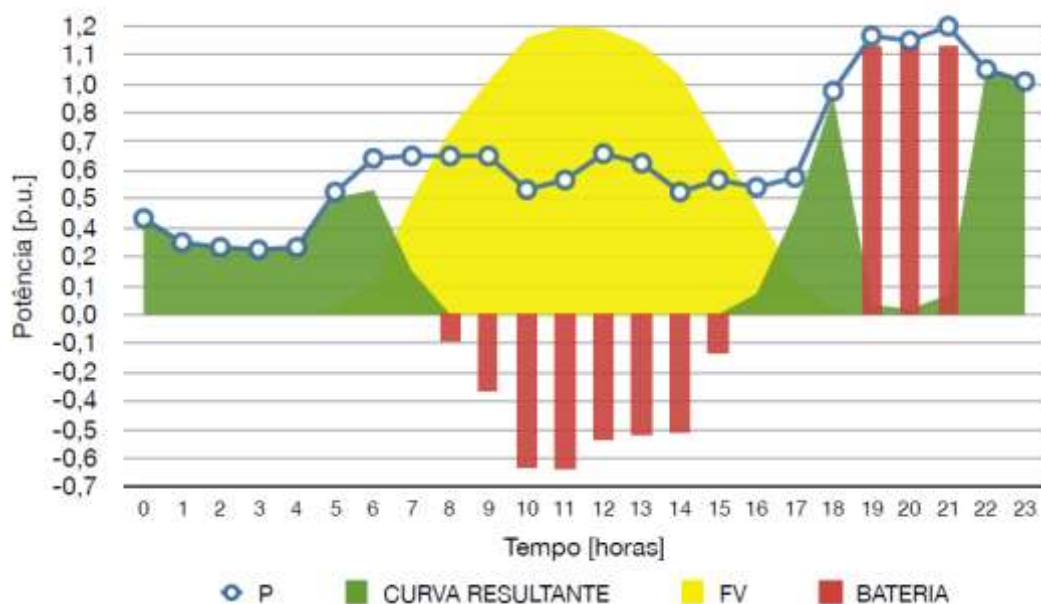


Figura 16 - Redução da demanda do horário de ponta com a geração excedente (NETO, 2016).

3.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO NO SAM

Para as simulações de um sistema fotovoltaico utilizando o *software* SAM, foram adotadas as características de latitude e radiação da cidade de Florianópolis – SC. As simulações foram realizadas utilizando os dados padrões trazidos pelo *software* para um sistema de 4 kW_P com relação fator de dimensionamento de inversor de 0,97. O módulo utilizado para as simulações foi da fabricante *Canadian Solar*, modelo CS6P-210. Para o inversor, foram inseridos dados para que se aproximassem das características do inversor da fabricante SMA, modelo *Sunny Boy 3600 / 5000 Smart Energy*, representado na Figura 17, com potência de entrada de 5200 W_{dc} e potência de saída de 3680 W_{ac}. O banco de baterias foi dimensionado também com as características da bateria integrada nesse inversor, uma bateria Li-ion, com capacidade de 2 kWh. Para fins comparativos, foram dimensionados sistemas sem banco de baterias e com banco de baterias com capacidades de 4 e 10 kWh.

Como o objetivo é a análise do inversor com a bateria integrada que já se encontra no mercado internacional, para manter-se as configurações compatíveis do inversor simulado e do inversor do mercado, em conjunto com as potências dos módulos, o sistema que melhor se encaixou nessas características foi um sistema fotovoltaico com geração de 4 kW_P. Então, esse foi o sistema adotado para realizar as simulações com os diferentes tipos de baterias.



Figura 17 – Sunny Boy 3600 / 5000 Smart Energy (Fonte: SMA, 2017).

Para melhor visualização e comparação dos resultados, todos os dados das simulações foram extraídos do *software* SAM para o *Microsoft EXCEL*.

3.2.1 Despacho de armazenamento

O *software* SAM permite um despacho estratégico, onde o usuário pode configurar perfis de uso customizados e organizá-los mês a mês, hora a hora por um ano. Essa ferramenta permite que o usuário especifique as características detalhadas, como quando permitir o descarregamento das baterias, quanto de capacidade descarregar, estágio mínimo de carregamento. Com essas opções o usuário pode escolher como despachar o armazenamento na hora em que o sistema esteja oferecendo maior benefício (DIORIO, 2015).

A configuração do despacho de armazenamento da bateria, representado na Figura 18, foi configurada para carregar a bateria apenas através da energia gerada pelo sistema fotovoltaico e descarregá-la principalmente nos horários das 18:00 às 22:00 horas, representados pelo *Period 2*, com capacidade de descarga de até 80% e, havendo energia acumulada após esse período, a bateria pode descarregar com uma taxa de 10% até as 23:00 horas, no *Period 3*. Convencionalmente, as baterias não descarregam mais do que 80% de sua carga total, então quando atingem esse nível, os acumuladores param de descarregar até o horário em que estão configurados para começar o carregamento.

	Charge from PV	Charge from grid		Discharge	
		Allow	% capacity	Allow	% capacity
Period 1:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	25	<input type="checkbox"/>	25
Period 2:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	25	<input checked="" type="checkbox"/>	80
Period 3:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	25	<input checked="" type="checkbox"/>	10
Period 4:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	25	<input type="checkbox"/>	25
Period 5:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	25	<input type="checkbox"/>	25
Period 6:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	25	<input type="checkbox"/>	25

	Weekday																						
	12am	1am	2am	3am	4am	5am	6am	7am	8am	9am	10am	11am	12pm	1pm	2pm	3pm	4pm	5pm	6pm	7pm	8pm	9pm	10pm
Jan	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Feb	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Mar	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Apr	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
May	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Jun	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Jul	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Aug	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Sep	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Oct	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Nov	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3
Dec	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3

Figura 18 – Dados de entrada para despacho de energia da bateria (Fonte: autor, 2017).

3.3 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

Após conferência dos dados extraídos do SAM para o EXCEL, para evitar que houvessem alterações nos resultados, fez-se o uso das fórmulas e ferramentas do EXCEL para calcular a frequência que o sistema injeta energia na rede, com o número de dias no ano e a porcentagem que esse valor representa, e também a frequência que as cargas consomem energia da rede. Com esses dados são gerados os gráficos para que haja a validação do sistema simulado com o sistema de referência, para então comparar o efeito do banco de baterias nos horários de ponta de consumo da residência.

O *software* SAM acusa quando os componentes do sistema não são compatíveis, por isso, usou-se um sistema com as mesmas características para fins comparativos, com a configuração de 4 kW_P, que não acusou incompatibilidade em nenhuma simulação e permite manter as características do inversor *Sunny Boy 3600 / 5000 Smart Energy*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados das simulações realizadas do sistema fotovoltaico de geração distribuída com acumuladores de energia, bem como a análise e discussão dos mesmos.

4.1 CURVA DE CARGA DO SISTEMA SIMULADO

Através dos dados de consumo de uma residência inseridos no *software*, com na análise das curvas de carga apresentadas na metodologia, para a simulação, as curvas de cargas obtidas são apresentadas nas Figuras 19, 20 e 21.

A curva de um dia útil, representada pela Figura 19, mostra como resultado o perfil típico de uma residência, condizente com as curvas de carga apresentadas anteriormente e tomadas como base para as simulações. Apresentando o primeiro aumento no consumo pela manhã, a partir das 06:00 horas, aumentando até as 08:00 horas, a partir das 09:00 horas o consumo pode ser considerado constante até às 16:00 horas, apresentando apenas pequenos desvios. A partir das 17:00 horas, começa um aumento considerável de consumo das cargas, que costuma coincidir com a chegada das pessoas nas residências, aumentando até as 19:00 horas, quando obteve-se um leve decréscimo de consumo. Entre as 20:00 e 21:00 horas há o maior pico de consumo. Esses horários com maior consumo estão dentro do horário de ponta (das 18:30 às 21:29 de acordo com a Celesc). Entre as 21:00 e 22:00 horas o consumo diminui exponencialmente, até chegar às 00:00 horas, voltando para o nível de consumo que pode ser considerado constante.

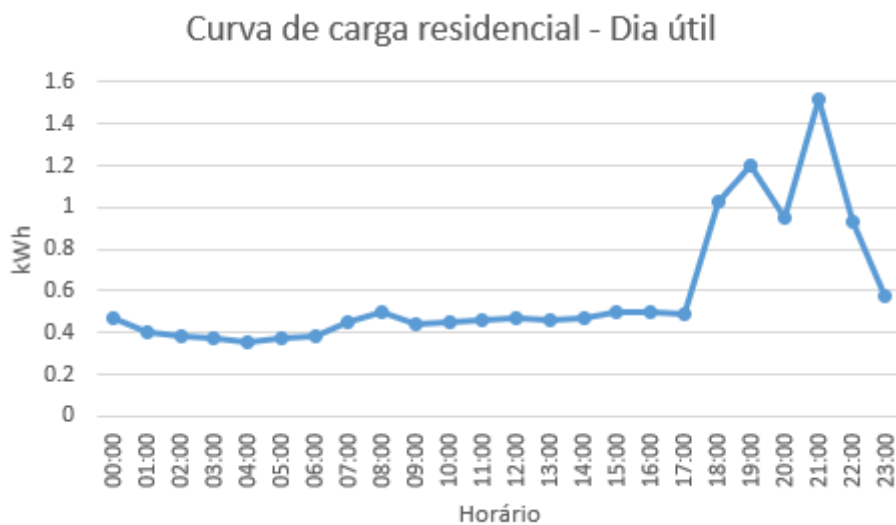


Figura 19 – Representação da curva de carga residencial em um dia útil (Fonte: autor, 2017).

As Figuras 20 e 21 também estão de acordo com o consumo proposto para os finais de semana, com a curva de carga de sábado apresentando o consumo um pouco maior, porém comparada à curva de dia útil, possui menos pontos com picos, apresentando um maior índice de consumo entre 20:00 e 21:00 horas. Já a curva de domingo, apresenta um perfil similar ao de um dia útil, com valores em kWh menores.

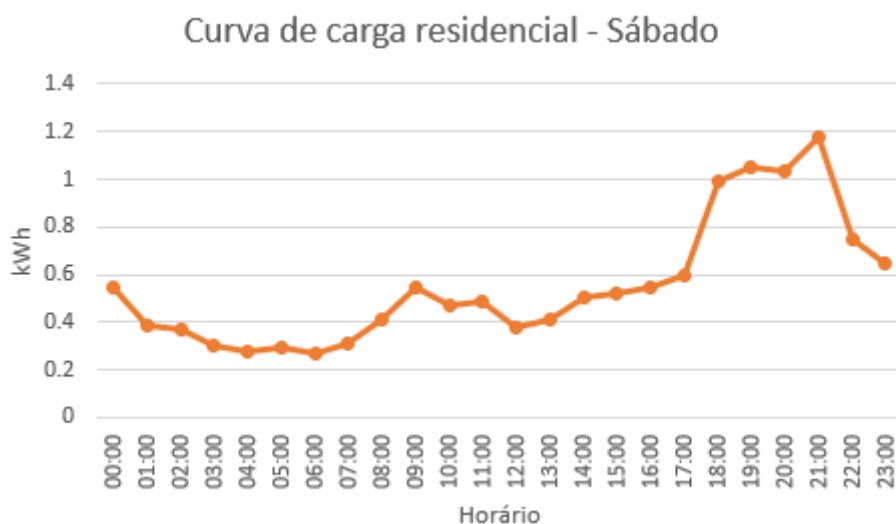


Figura 20 – Representação da curva de carga residencial de sábado (Fonte: autor, 2017).

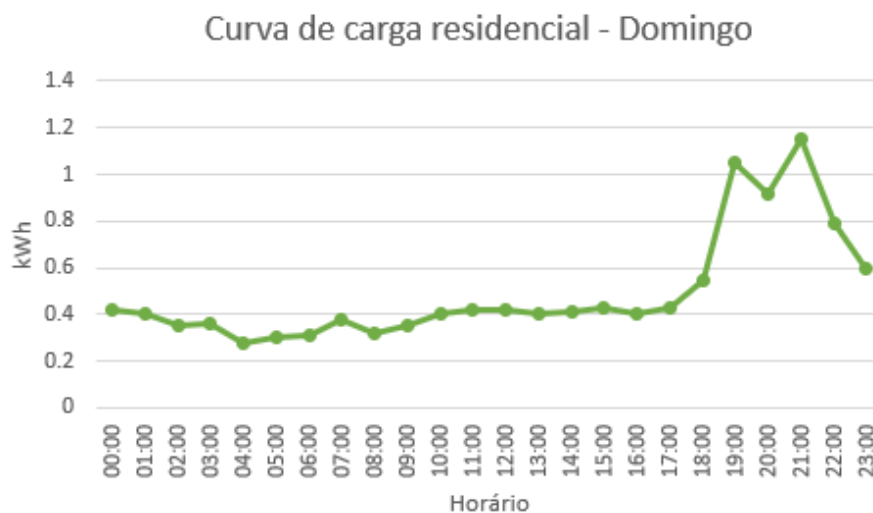


Figura 21 – Representação da curva de carga residencial de domingo (Fonte: autor, 2017).

4.2 CURVA DE CARGA COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Figura 22 representa a curva de carga da simulação de um sistema com geração fotovoltaica sem adição de um banco de baterias, em um dia típico ensolarado que apresenta alto índice de radiação solar. Esse mesmo dia ensolarado foi utilizado para todas as simulações. De acordo com o resultado apresentado, observa-se que a simulação segue o padrão esperado, com energia injetada na rede durante os horários de geração do sistema fotovoltaico, das 07:00 às 17:00 horas, com pico de geração entre 11:00 e 13:00 horas. O sistema supre a demanda das cargas das 07:00 às 16:00 horas, consumindo energia da rede das 17:00 às 07:00 horas, quando ocorre o consumo de energia da rede nos horários de ponta.

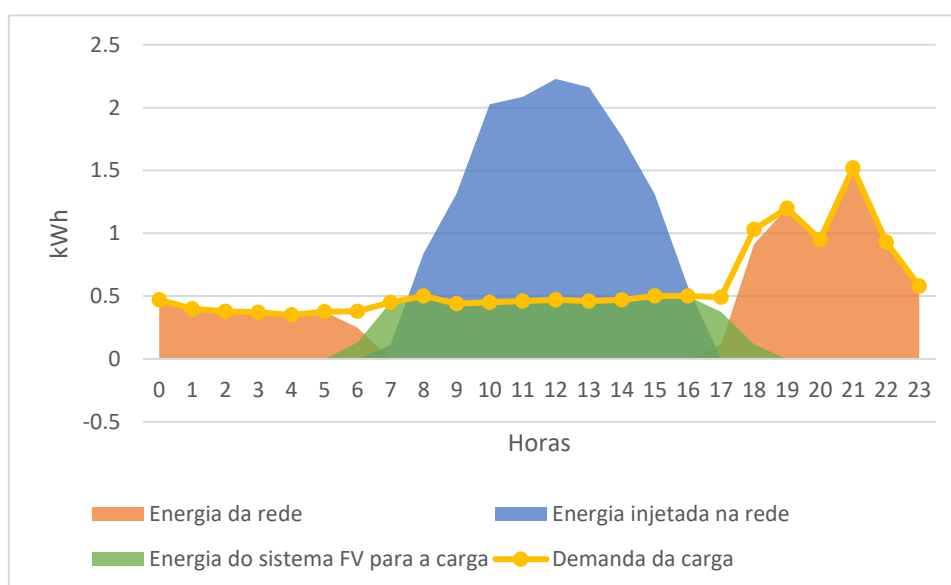


Figura 22 - Curva de carga com geração fotovoltaica (Fonte: autor, 2017).

4.3 CURVA DE CARGA COM BATERIA LI-ÍON

Ao se adicionar um banco de baterias de 2 kWh, para coincidir com a bateria integrada no inversor *Sunny Boy 3600 / 5000*, o resultado dessa simulação é apresentado na Figura 23, onde se pode observar que esse banco de bateria não supre toda a demanda do horário de ponta, haja vista que o modelo de inversor com a bateria integrada apresentado no capítulo anterior visa a economia de espaço junto com a economia de custo pela redução no consumo de energia da rede. Por isso, foi optado por uma bateria Li-íon, que apresenta um custo maior, em comparação com uma bateria Pb-ácido com a mesma potência, que entretanto ocupa mais espaço na instalação e possui eficiência inferior. Por possuir um dimensionamento de potência baixo, como comparado em HILL *et.al*, 2012, nesses casos, baterias Li-íon tornam-se mais viáveis.

Também na Figura 23, na área que representa a energia injetada na rede, ao compará-la com a área representada na Figura 22, observa-se que essas são diferentes entre si, apesar de representarem o mesmo dia e sistema. Isso ocorre devido ao sistema com bateria integrada necessitar de parte dessa energia que a priori foi injetada na rede, para carregar a bateria. Esse tipo de diferença pode ser observado de forma mais clara quando a potência da bateria é aumentada, já que quanto maior sua potência, mais energia irá consumir do sistema para carregá-las.

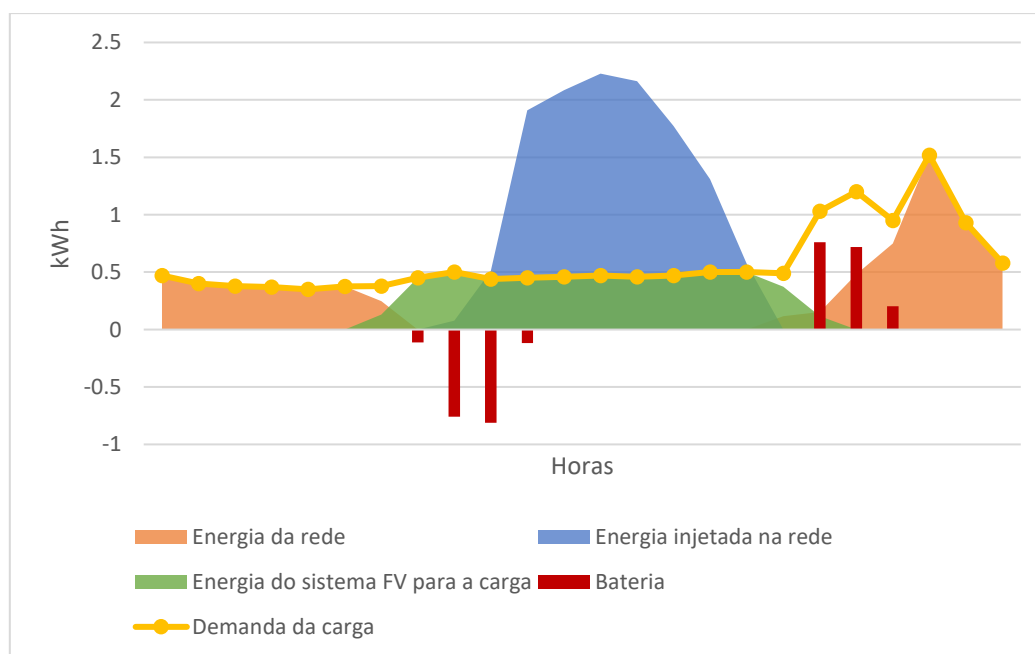


Figura 23 – Curva de carga com geração fotovoltaica e bateria Li-íon de 2 kWh (Fonte: autor, 2017).

A Tabela 1 faz a comparação da frequência de energia consumida da rede entre o sistema sem e com o banco de baterias pelo período de 8760 horas, equivalente a um ano. Os dados obtidos são próximos para ambos os sistemas dimensionados, porém o *software* considera todas as horas que qualquer quantidade de energia consumida que tenha vindo da rede. Ao analisar os dados e comparar seus valores, dispostos no Apêndice A, percebe-se que os valores em kWh consumidos da rede pelo sistema com acumulador nos horários de ponta são menos expressivos do que aqueles consumidos pelo sistema sem acumuladores de energia, até a bateria chegar em seu ponto de carga mínimo, quando o sistema começa a consumir somente energia da rede.

Utilizando um banco de baterias de 2 kWh em um sistema de 4 kW_P, o sistema continua a receber energia da rede, porém em valores menores, das 18:00 às 19:00, a partir das 20:00, com a carga da bateria se esgotando, aumenta o consumo da rede e então, às 21:00 o consumo passa a ser todo suprido pela rede. Portanto, esse sistema consegue reduzir o consumo no horário de pico por aproximadamente 2 horas.

Os resultados da simulação com banco de baterias de 4 kWh e 10 kWh, representados pelas figuras 24 e 25 respectivamente, mostram que ao aumentar a potência dos acumuladores, a demanda nos horários de ponta tem grande parte suprida por acumuladores de 4 kWh e totalmente suprida pelos de 10 kWh.

Tabela 1 – Frequência que os sistemas com bateria Li-íon simulados injetam e consomem energia da rede.

	SFV 4 kW _P		Bateria li-íon					
			2 kWh		4 kWh		10 kWh	
Energia / ano	Horas	%	Horas	%	Horas	%	Horas	%
Consumida da rede	5556	63,42	5726	65,37	5618	64,13	5068	57,85
Injetada na rede	3204	36,58	3034	34,63	3142	35,87	3692	42,15

Fonte: do autor, 2017.

Em um sistema de 4 kW_P com um banco de baterias de 4 kWh, tem sua demanda totalmente suprida pelas baterias das 18:00 às 19:00 horas, às 20:00 horas o acumulador supre mais da metade da demanda e a partir das 21:00 horas toda a energia provém da rede. Portanto, com acumuladores dessa capacidade, há a redução de consumo em horário de ponta de quase 3 horas, podendo suprir toda a demanda no horário de ponta, se for possível setar a bateria para começar a liberar energia para a carga desde as 18:30 horas.

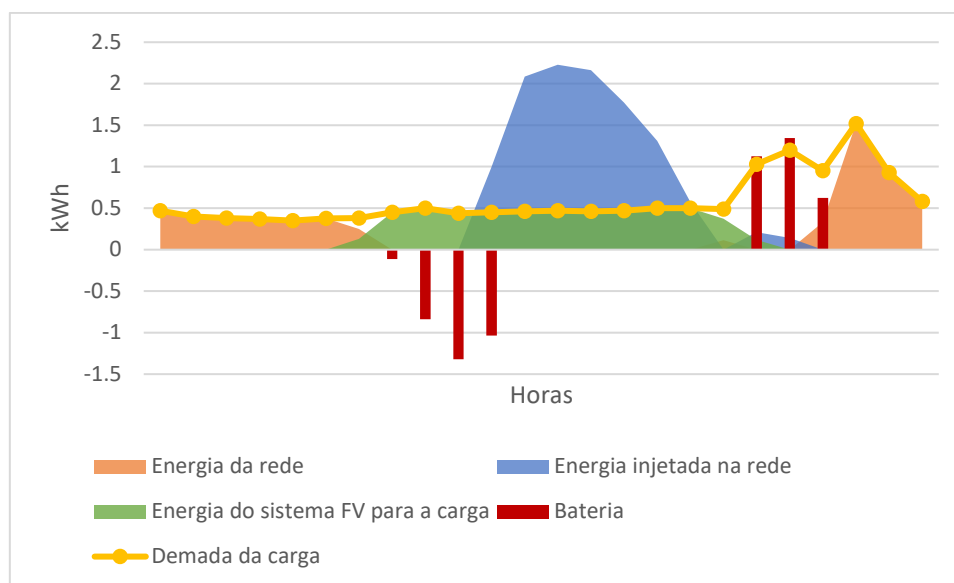


Figura 24 – Curva de carga com geração fotovoltaica e bateria Li-íon de 4 kWh (Fonte: autor, 2017).

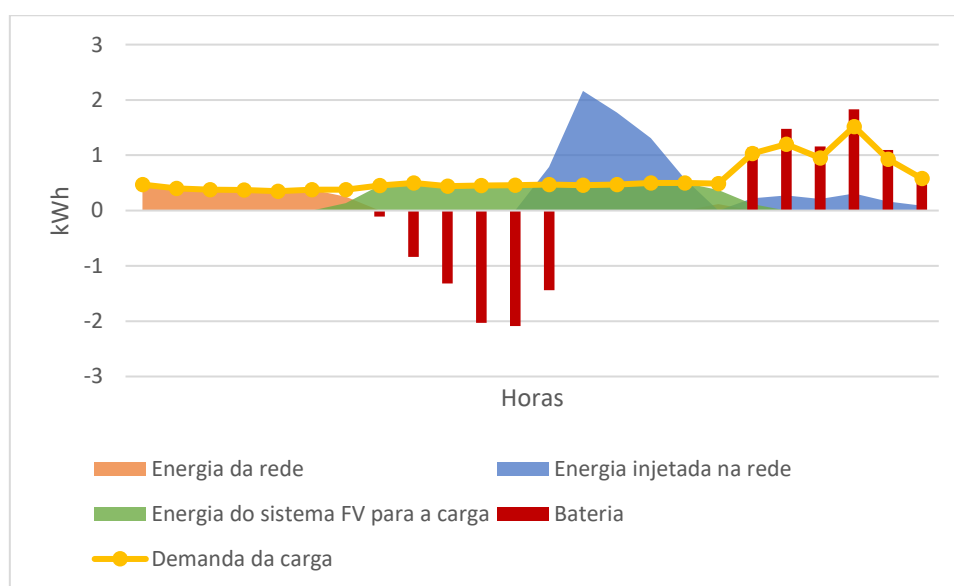


Figura 25 – Curva de carga com geração fotovoltaica e bateria Li-íon de 10 kWh (Fonte: autor, 2017).

A comparação entre a frequência em horas de energia consumida da rede entre o sistema de 4 e 10 kWh durante um ano, apresentados na Tabela 1, que mostra que o sistema com acumuladores de 10 kWh consome menos energia da rede, como já era esperado. Esse sistema supre a demanda da energia em todo o limite de horas configurado para que a bateria possa descarregar e distribuir energia para as cargas instaladas. Já o sistema com a bateria de 4 kWh, que supre apenas os horários de ponta, consome energia da rede nos horários em que não há geração.

Com um acumulador de 4 kWh toda, há um excesso de geração que é injetado na rede. Porém, como a potência do banco de baterias foi dobrada, o tamanho vai aumentar, junto com o custo do sistema. Bem como no resultado apresentado para a bateria de 10 kWh, que supre toda a demanda da noite e envia o excesso para a rede. Esse excesso em ambas as configurações poderia ser estendido para ser utilizado em todos os horários sem geração de energia pelo sistema fotovoltaico, mas para manter um padrão em todas as simulações, o sistema foi configurado para carregar durante o dia e somente descarregar no período da noite, das 18:00 às 23:00 horas, alcançando 80% de desgaste da bateria. Porém, como a configuração do despacho de energia das baterias foi mantido nesse período para todas as simulações, tendo em vista que o equipamento tomado como base tem a potência mais baixa, para o banco de baterias atingir 80% de descarregamento durante esse período de tempo a bateria injeta a energia excedente na rede.

4.4 CURVA DE CARGA COM ACUMULADORES PB-ÁCIDO

Ao realizar a simulação para de sistema com acumuladores Pb-ácido de 2 kWh, conforme a Figura 26, percebe-se que é um tipo de bateria que leva mais tempo para completar seu carregamento, comparando com o tempo que as baterias de Li-íon levam para completar sua carga, e também apresenta o tempo de descarregamento maior, o que pode levar a conclusão de maior redução de consumo de energia da rede nos horários de ponta se comparando a frequência em horas em que a energia é injetada e consumida da rede durante um ano (Tabela 2), mas um sistema FV com baterias de chumbo ácido consome mais energia da rede porque os valores em kWh que alimentam as cargas são menores do que os valores das baterias de Li-íon, porém são distribuídos por um período maior.

Nessa simulação, o sistema continua consumindo energia da rede por todo o período do horário de ponta junto com a energia fornecida pelo acumulador. Às 18:00 horas a bateria transmite a maior parte da energia para o sistema, reduzindo-se aproximadamente pela metade às 19:00 horas e até às 23:00, a bateria completa seu ciclo, atingindo 80% de descarregamento.

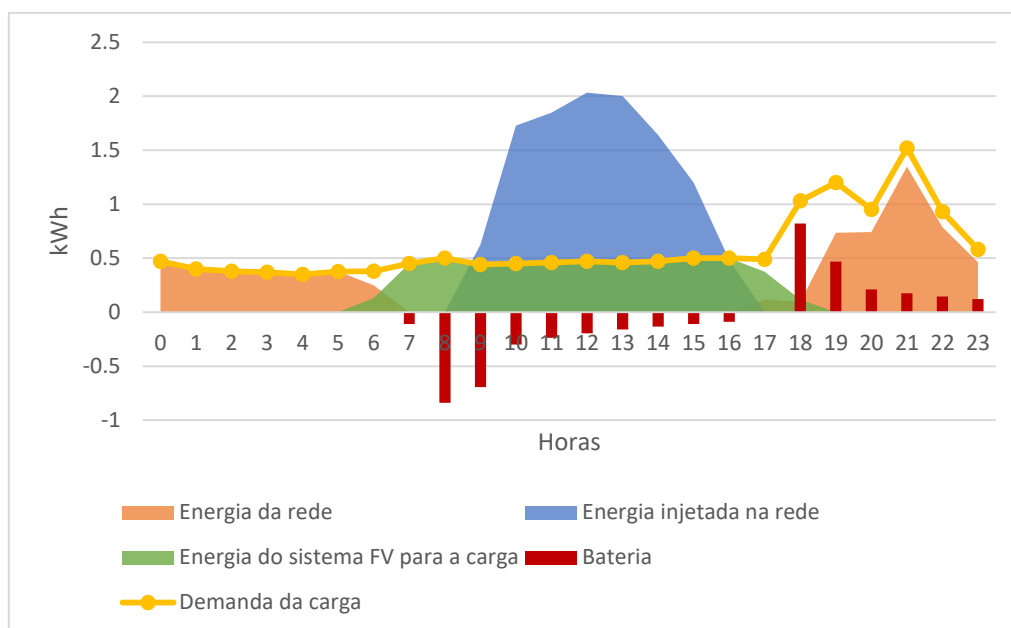


Figura 26 – Curva de carga com geração fotovoltaica e bateria Pb-ácido de 2 kWh (Fonte: autor, 2017).

Tabela 2– Frequência que os sistemas com bateria Pb-ácido simulados injetam e consomem energia na/da rede.

SFV 4 kW _P			Bateria pb-ácido					
			2 kWh		4 kWh		10 kWh	
Energia / ano	Horas	%	Horas	%	Horas	%	Horas	%
Consumida da rede	5556	63,42	5804	66,26	5721	65,31	4780	54,57
Injetada na rede	3204	36,58	2956	33,74	3039	34,69	3980	45,43

Fonte: do autor, 2017.

Ao realizar a simulação de um sistema fotovoltaico com acumuladores Pb-ácido de 4 e 10 kWh, representados pelas Figuras 27 e 28 respectivamente, obtemos resultados próximos das baterias Li-íon.

Os acumuladores de 4 kWh de Pb-ácido, conseguem suprir a demanda das 18:00 às 19:00 horas, começando o consumo de energia da rede às 20:00 horas, e aumentando esse consumo das 21:00 até as 23:00 horas, quando a bateria está setada para finalizar a transmissão de energia para a carga. Nesse caso, o uso da bateria poderia ser prolongado, pois como já apresentado anteriormente essas baterias levam mais tempo para descarregar, mas para manter a mesma configuração para todas as simulações para melhor comparação.

Para os acumuladores de 10 kWh, esses conseguem suprir toda a demanda no horário disposto ao uso da bateria, das 18:00 às 23:00 horas, sendo capaz ainda de injetar energia na

rede, como mostrado na Figura 28, como apresentado no resultado da bateria de 10 kWh de Li-íon.

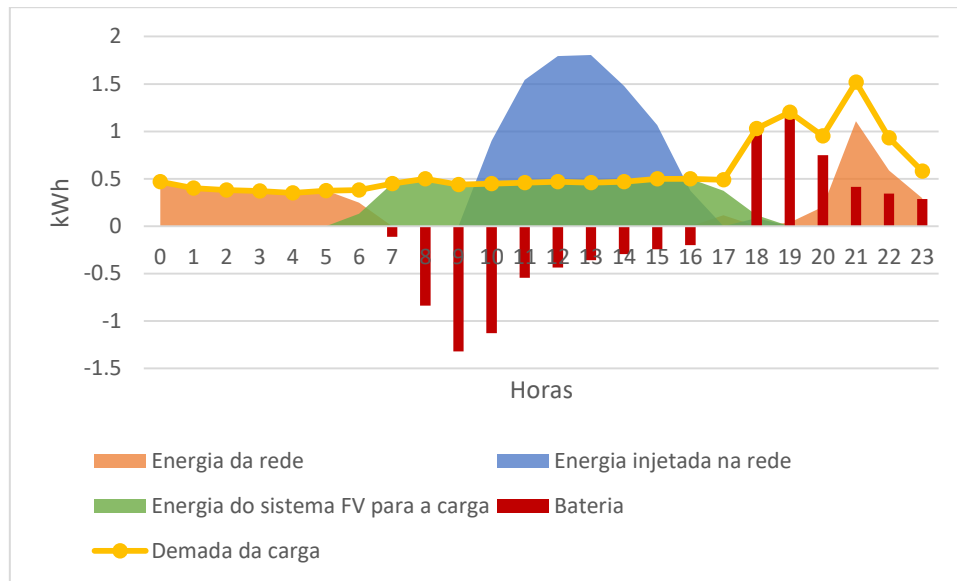


Figura 27 – Curva de carga com geração fotovoltaica e bateria Pb-ácido de 4 kWh (Fonte: autor, 2017).

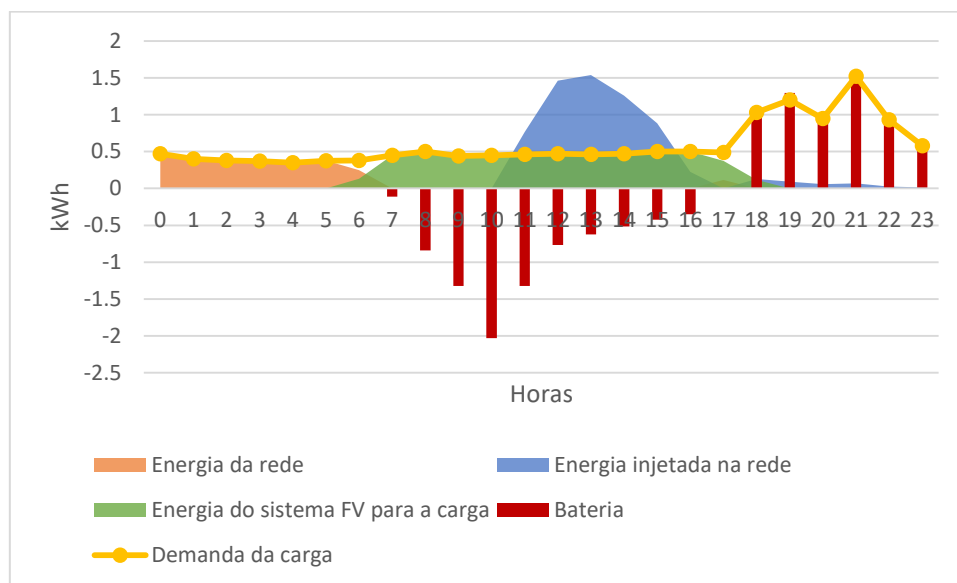


Figura 28 – Curva de carga com geração fotovoltaica e bateria Pb-ácido de 10 kWh (Fonte: autor, 2017).

Um arranjo para os níveis de potência de 4 e 10 kWh ocuparia grande parte do espaço físico do sistema instalado em uma residência, o que por questões estéticas pode inviabilizar sua instalação em uma residência, bem como se comparados os métodos de descarte, onde a química utilizadas em baterias de Pb-ácido apresenta riscos mais elevados para o ambiente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho consiste na análise da implantação de um inversor com bateria do tipo lítio-íon integrada para redução do consumo de energia no horário de ponta. Baseando-se na metodologia referenciada para a realização de simulações de um sistema com as características do inversor e da bateria apresentados, e bancos de baterias com potências maiores e do tipo chumbo-ácido para fins de comparação.

A simulação do sistema residencial utilizou uma curva de carga baseada na referência já apresentada e atingiu a forma esperada, assemelhando àquelas apresentadas no referencial teórico. Com a demanda da carga assumida, foi considerado as características do inversor e da bateria apresentadas no catálogo do *Sunny boy 3600 / 5000*, visando o menor índice de perdas por conversão de carga, manteve-se o fator de dimensionamento DC/AC do inversor em 0,97, resultando em um sistema de 4 kW_P. O sistema residencial foi mantido o mesmo para todas as simulações, em que o tamanho do banco de baterias foi variado, em kWh.

Com a variação do tamanho e do tipo de baterias, houve também uma variação na quantidade de energia injetada/consumida da rede, contrastada pelas diferentes formas de suas curvas apresentadas nos resultados. Essa variação deu-se pelo fato de que, apesar de utilizar o mesmo dia para a apresentação dos resultados, a cada simulação, além das baterias exigirem mais ou menos potência para seu carregamento, dependendo de cada tecnologia, as condições ambientes também variam, onde diversos fatores externos podem afetar a área de geração de energia, como nuvens passageiras naquele determinado horário, causando sombreamentos momentâneos, o que pode afetar alguns dos resultados apresentados.

Os resultados das simulações para a bateria li-íon de 2 kWh mostram que para o sistema de 4 kW_P essa tecnologia não é suficiente para suprir toda a demanda esperada no horário de ponta, visto que foi optado por manter o dimensionamento DC/AC em 0,97. Caso tivéssemos mantido esse valor como uma variável, poderíamos optar por um sistema menor de 3 a 2 kW_P e assumir as perdas nessa conversão, porém a bateria seria capaz de suprir uma parte maior na demanda do horário de ponta. Isso se confirma ao analisarmos os resultados apresentados quando a potência dos bancos de baterias são aumentados, permitindo que o consumo de energia do horário de ponta seja suprido pelos acumuladores.

Ao fazer a comparação entre as baterias li-íon e Pb-ácido, percebemos que apresentam resultados próximos, porém, como constatado no referencial teórico, as baterias li-íon são mais compactas, por isso podem ser integradas em um inversor sem a necessidade de instalação de maiores estruturas, e também apresentam ciclo de vida superior ao das baterias Pb-ácido, que são vantagens essenciais para esse tipo de tecnologia.

A utilização de banco de baterias em sistemas fotovoltaicos conectados à rede ainda não é difundida no Brasil, apenas em sistemas emergenciais, visto que a instalação de SFV ainda está em ascendência. Porém, com o crescimento constante da tecnologia e a decadência dos preços, esse tipo de instalação pode vir a ser explorado por se apresentar um sistema

duradouro e eficiente para diminuir o consumo de energia da rede nos horários de ponta, em que a rede encontra-se sobrecarregada pelo alto consumo das residências.

A instalação de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída é uma tecnologia que apresenta alto crescimento de potência instalada, pois além do sistema reduzir o consumo de energia que provém da concessionária, ainda gera créditos para o consumidor que podem ser abatidos da fatura de energia elétrica, de acordo com as regras da própria concessionária local. Há também a redução de gastos com as linhas de transmissão, que variam de acordo com a potência instalada e geralmente se estendem por longas distâncias. Devido ao material e os dispositivos de proteção necessários o custo das LTs aumentam com a distância, então, no caso da geração distribuídas, devido a proximidade da geração com o consumidor, esse custo irá sofrer uma redução considerável.

Como o alvo é suprir a demanda de energia da rede nos horários de ponta, no futuro, com a tecnologia dos sistemas fotovoltaicos tornando-se mais popular, esse tipo de estudo mostra-se importante para que os consumidores consigam depender cada vez menos das concessionárias e tornarem-se geradores de sua própria energia.

E por fim, uma das principais vantagens da instalação de um banco de baterias em um sistema fotovoltaico de geração distribuída em uma residência para o consumidor, seria a adesão da tarifa branca, onde a residência deve passar por uma análise da potência instalada e consumida. Para garantir a viabilidade dessa adesão, já que a residência vai diminuir o consumo no horário de ponta, o que gera uma grande vantagem para a concessionária, que terá a sobrecarga no horário de ponta reduzida. Para uma região com instalações desse tipo, a concessionária consegue melhorar a qualidade da energia transmitida e também diminuir quedas e falhas nesses horários.

REFERÊNCIAS

ALVORADA. **Como o incentivo à energia solar fotovoltaica pode transformar o Brasil.** Greenpeace. 2016.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração distribuída;** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=757>. Acesso em: setembro de 2017.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 0056 e 25 de Maio de 2017.** 2017

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 482 de 17 de Abril de 2012.** 2012.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa 687 de 24 de Novembro de 2015.** 2015.

ANTUNES, Vitor. **Análise do impacto da inserção de geração distribuída na qualidade da energia elétrica em uma microrrede de baixa tensão.** 2016. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

BEN. **Balanco Energético Nacional.** Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf Acesso em: Agosto de 2017.

BENEDITO, Ricardo da Silva. **Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório.** 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BP **Statistical Review of World Energy June 2017.** Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf> Acesso em: Novembro de 2017.

BRAGA, Nina Bordini. **Gerenciamento pelo lado da demanda em áreas residenciais.** 2014. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CÂMARA, Carlos Fernando. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** 2011. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Formas Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

DIORIO, Nicholas; DOBOS, Aron; JANZOU, Steven. Economic Analysis Case Studies of Battery Energy Storage with SAM. **National Renewable Energy Laboratory**, Oak Ridge, v. 1, n. 1, p.1-22, nov. 2015.

FRANCISQUINI, Aislan Antonio. **Estimação de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuição.** 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2006.

GETH, Freferik et al. Techno-economical and life expectancy modeling of battery energy storage systems. In: 21ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 2011, Frankfurt. **CIREC**. Bélgica: Cired, 2011. p. 1 – 4.

GALDINO M. A., PINHO J. T. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.

HILL, Cody A. et al. Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation. **IEEE: Transitions of Smart Grid**, Texas, v. 3, n. 2, p.1-8, jun. 2012.

JARDIM, Carolina da Silva et al. **O potencial dos sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica em áreas urbanas: dois estudos de caso**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2004. 12 p.

LOPES, Yona; FERNANDES, Natalia Castro; MUCHALUAT-SAADE, Débora Christina. **Geração distribuída de energia: desafios e perspectivas em redes de comunicação**. 2015. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Telecomunicação, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015. Cap. 2

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia Solar**. São Paulo: Artiber, 2002.

LUIZ, Cicéli Martins. **Avaliação dos impactos da geração distribuída para proteção do sistema elétrico**. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MICHELS, Adalberto Sato; OSAWA, Rafael Arimura; SANTOS, Telma Aparecida Meneguette dos. **Avaliação de um inversor fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 2015. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica Com ênfase em Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

NETO, Aimé Fleury de Carvalho Pinto. **Avaliação do impacto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão**. 2016. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

NOURAI, A. Large-Scale Electricity Storage Technologies for Energy Management. **IEEE: American Electric Power Service Corporation**, Columbus, v. 1, n. 1, p.1-6, jan. 2002.

PEREIRA, Tiago Quartiero. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto microcontrolado para análise da performance de bancos de baterias**. 2016. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

PUFAL R. A. **Modelagem de cargas não lineares e rede de energia elétrica para simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; KREZINGER, Arno; ROMERO, Faustino Chenlo. Desenvolvimento de modelo matemático para descrição da eficiência CC/CA de inversores

utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. IV , n. I , p.25-32, jul. 2013.

ROCHA, Héilton Marcon. **Estudo de caso: dimensionamento e análise de viabilidade econômica de um planta fv para atender a demanda energética de um engenho de arroz considerando os aspectos de tarifação de energia elétrica**. 2015. 35 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2015.

RODRÍGUEZ, Carlos Roberto Cervantes. **Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: O caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

RÜTTER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos:: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e integradas à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: Ufsc/labsolar, 2004. 118 p.

SALAMONI, Isabel Tourinho. **Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte**. 2004. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SEGUEL, Julio Igor López. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. 2009. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SILVA, Alex de Lima e. **Protótipo de um sistema fotovoltaico auxiliar com armazenamento de energia elétrica**. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Instituto de Tecnologia Para O Desenvolvimento, Curitiba, 2014.

SILVEIRA, Miguel Francisco da. **Análise do impacto da geração distribuída sobre a rede elétrica de distribuição devido á utilização de geradores fotovoltaicos**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

SMA. Sunny Boy 3600 / 5000 Smart Energy. *Data Sheet*. Disponível em: <<https://www.sma.de/en/products/solarinverters/sunny-boy-3600-5000-smart-energy.html>> Acessado em Agosto de 2017.

SOUZA A. C. **Análise dos impactos da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na qualidade da energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

TANT, Jeroen et al. Multiobjective Battery Storage to Improve PV Integration in Residential Distribution Grids. **IEEE: Transactions on sustainable energy**, Bélgica, v. 4, n. 1, p.1-10, jan. 2013

TAVARES, João Pinho; GAUDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel – Cresesb, 2014. 530

TUDOR. **Catálogo Tudor.** Disponível em: <tudor.com.br/assets/upload/layout_catalogo_tudor_estacionarias.pdf>. Acesso em: outubro de 2017.

VERA, Luis Horacio. **Análise do impacto do comportamento de baterias em sistemas fotovoltaicos autônomos.** 2009. 269 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ZOMER, Clarissa Debiazi. **Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações.** 2014. 258 f. Dissertação (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ZUFFO A. L. Kûara – Energia Solar. Engenheiro Eletricista, Campinas. 2017. Disponível em: <<https://www.kuaraenergiasolar.com/tecnologia>> Acessado em: Julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me guiado e iluminado meu caminho durante todos esses anos e por permitir que eu concluísse mais uma etapa da vida.

Quero agradecer ao apoio da minha família, que estiveram presentes e me apoiam não só no tempo de graduação, mas em toda a minha vida. Especialmente meus avós, José Clézio e Vera Lúcia e minha mãe, Cinara, que sempre se me inspiraram à crescer e por todo amor que devotam a mim, me ensinando a ser forte e sempre superar o obstáculos, sem perder a auto-estima e o bom humor. Agradeço também meu pai, Antônio e minhas irmãs, Amábile, Nathália e Helena, por me acompanharem e estarem sempre presentes em diversas etapas e conquistas.

Gostaria de agradecer minhas amigas, que essa graduação me apresentou e que levarei para o resto da vida, Julia, Natalia e Tamlis, que me dão força e momentos de descontração, representando o verdadeiro significado de amizade. Obrigada por serem amigas tão maravilhosas e estarem presentes, mesmo estando longe.

Um agradecimento em especial para o meu orientador Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli, pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho, por toda sua atenção, dedicação e paciência nesta fase final do curso, por ter compartilhado seus conhecimentos e me guiado nesta última etapa.

E por fim, agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente o Centro Araranguá, por ter me garantido a oportunidade de receber o diploma de Engenharia de Energia.

**APÊNDICE A – Energia consumida da rede e injetada na rede pelos sistemas sem
bateria e com bateria Li-íon de 2 kWh referente à uma semana**

Horário	SISTEMA FV DE 4 KW _P COM BANCO DE BATERIAS DE 2 KWH		SISTEMA FV DE 4 KW _P SEM BANCO DE BATERIAS	
	Eletricidade consumida da rede (kWh)	Eletricidade injetada na rede (kWh)	Eletricidade consumida da rede (kWh)	Eletricidade injetada na rede (kWh)
00:00	0.422242	0	0.422242	0
01:00	0.402242	0	0.402242	0
02:00	0.352242	0	0.352242	0
03:00	0.362242	0	0.362242	0
04:00	0.282242	0	0.282242	0
05:00	0.302242	0	0.302242	0
06:00	0.178583	0	0.178583	0
07:00	0.136966	0	0.136966	0
08:00	0	0.0535623	0	0.576281
09:00	0	0.69803	0	1.23066
10:00	0	1.92988	0	1.39644
11:00	0	1.81334	0	1.52034
12:00	0	2.23513	0	0.437823
13:00	0	2.33705	0	1.04525
14:00	0	1.97544	0	1.19091
15:00	0	1.42165	0	0.471319
16:00	0.125292	0.901309	0.125292	0
17:00	0.175559	0	0.175559	0
18:00	0	0.104984	0.408289	0
19:00	0.306754	0	1.05224	0
20:00	0.238917	0	0.922242	0
21:00	1.14686	0	1.15224	0
22:00	0.792242	0	0.792242	0
23:00	0.602242	0	0.602242	0

00:00	0.472242	0	0.472242	0
01:00	0.402242	0	0.402242	0
02:00	0.382242	0	0.382242	0
03:00	0.372242	0	0.372242	0
04:00	0.352242	0	0.352242	0
05:00	0.377242	0	0.377242	0
06:00	0.106267	0	0.106267	0
07:00	7.15E-05	0	0	0.124233
08:00	0	0.000891268	0	0.573718
09:00	0	0.000650942	0	0.455364
10:00	0	0.524888	0	1.33412
11:00	0	1.09258	0	1.21619
12:00	0	1.3672	0	1.3672
13:00	0	1.70843	0	1.70843
14:00	0	0.737378	0	0.737378
15:00	0	0.70575	0	0.70575
16:00	0	0.404601	0	0.404601
17:00	0.115291	0	0.115291	0
18:00	0.210734	0	0.971696	0
19:00	0.464549	0	1.20224	0
20:00	0.452266	0	0.952242	0
21:00	1.52224	0	1.52224	0
22:00	0.932242	0	0.932242	0
23:00	0.582242	0	0.582242	0
00:00	0.472242	0	4.72E-01	0
01:00	0.402242	0	0.402242	0
02:00	0.382242	0	0.382242	0
03:00	0.372242	0	0.372242	0
04:00	0.352242	0	0.352242	0

05:00	0.377242	0	0.377242	0
06:00	0.224681	0	0.224681	0
07:00	6.24E-05	0	0	0.109374
08:00	0	0.223578	0	0.982871
09:00	0	0.793422	0	1.60381
10:00	0	1.88941	0	2.01025
11:00	0	2.26687	0	2.26687
12:00	0	2.34846	0	2.34846
13:00	0	1.8297	0	1.8297
14:00	0	1.88136	0	1.88136
15:00	0	1.22642	0	1.22642
16:00	0	0.437994	0	0.437994
17:00	0.190495	0	0.190495	0
18:00	0.182462	0	0.942057	0
19:00	0.482277	0	1.20224	0
20:00	0.74774	0	0.952242	0
21:00	1.52224	0	1.52224	0
22:00	0.932242	0	0.932242	0
23:00	0.582242	0	0.582242	0
00:00	0.472242	0	4.72E-01	0
01:00	0.402242	0	0.402242	0
02:00	0.382242	0	0.382242	0
03:00	0.372242	0	0.372242	0
04:00	0.352242	0	0.352242	0
05:00	0.377242	0	0.377242	0
06:00	0.203368	0	0.203368	0
07:00	0.000793576	0	0	0.279777
08:00	0	0.153421	0	0.933865
09:00	0	0.626321	0	1.36806

10:00	0	1.95416	0	1.95416
11:00	0	1.99518	0	1.99518
12:00	0	1.87594	0	1.87594
13:00	0	1.77812	0	1.77812
14:00	0	1.29955	0	1.29955
15:00	0	0.292681	0	0.292681
16:00	0	0.0872219	0	0.0872219
17:00	0.241083	0	0.241083	0
18:00	0.182642	0	0.942236	0
19:00	0.482301	0	1.20224	0
20:00	0.748027	0	0.952242	0
21:00	1.52224	0	1.52224	0
22:00	0.932242	0	0.932242	0
23:00	0.582242	0	0.582242	0
00:00	0.472242	0	4.72E-01	0
01:00	0.402242	0	0.402242	0
02:00	0.382242	0	0.382242	0
03:00	0.372242	0	0.372242	0
04:00	0.352242	0	0.352242	0
05:00	0.377242	0	0.377242	0
06:00	0.248362	0	0.248362	0
07:00	6.29E-05	0	0	0.111434
08:00	0	0.0784349	0	0.838084
09:00	0	0.508844	0	1.3193
10:00	0	1.90962	0	2.02741
11:00	0	2.0853	0	2.0853
12:00	0	2.22862	0	2.22862
13:00	0	2.16266	0	2.16266
14:00	0	1.7735	0	1.7735

15:00	0	1.3092	0	1.3092
16:00	0	0.576383	0	0.576383
17:00	0.116042	0	0.116042	0
18:00	0.153922	0	0.913514	0
19:00	0.482325	0	1.20224	0
20:00	0.748314	0	0.952242	0
21:00	1.52224	0	1.52224	0
22:00	0.932242	0	0.932242	0
23:00	0.582242	0	0.582242	0
00:00	0.472242	0	4.72E-01	0
01:00	0.402242	0	0.402242	0
02:00	0.382242	0	0.382242	0
03:00	0.372242	0	0.372242	0
04:00	0.352242	0	0.352242	0
05:00	0.377242	0	0.377242	0
06:00	0.264878	0	0.264878	0
07:00	2.81E-05	0	0	0.048734
08:00	0	0.138257	0	0.885727
09:00	0	0.820785	0	1.62949
10:00	0	1.80145	0	1.9915
11:00	0	1.01216	0	1.01216
12:00	0	1.85871	0	1.85871
13:00	0	1.26027	0	1.26027
14:00	0	1.43046	0	1.43046
15:00	0	0.668709	0	0.668709
16:00	0	0.158634	0	0.158634
17:00	0.0794728	0	0.0794728	0
18:00	0.191313	0	0.950902	0
19:00	0.482349	0	1.20224	0

20:00	0.7486	0	0.952242	0
21:00	1.52224	0	1.52224	0
22:00	0.932242	0	0.932242	0
23:00	0.582242	0	0.582242	0
00:00	0.552242	0	0.552242	0
01:00	0.392242	0	0.392242	0
02:00	0.372242	0	0.372242	0
03:00	0.302242	0	0.302242	0
04:00	0.282242	0	0.282242	0
05:00	0.292242	0	0.292242	0
06:00	0.0334348	0	0.0334348	0
07:00	0	0.00016582	0	0.38486
08:00	0	0.178578	0	0.967469
09:00	0	0.605701	0	1.23213
10:00	0	1.89125	0	1.89125
11:00	0	2.34046	0	2.34046
12:00	0	2.25874	0	2.25874
13:00	0	2.16622	0	2.16622
14:00	0	1.63793	0	1.63793
15:00	0	0.940061	0	0.940061
16:00	0	0.206467	0	0.206467
17:00	0.0813431	0	0.0813431	0
18:00	0.0795552	0	0.839143	0
19:00	0.332373	0	1.05224	0
20:00	0.828887	0	1.03224	0
21:00	1.18224	0	1.18224	0
22:00	0.752242	0	0.752242	0
23:00	0.652242	0	0.652242	0