UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Vinícius Zago Cantú

Desenvolvimento e validação de modelo matemático para sistema de refrigeração doméstica off-grid alimentado por energia fotovoltaica

Florianópolis
2022

Vinícius Zago Cantú

Desenvolvimento e validação de modelo matemático para sistema de refrigeração doméstica off-grid alimentado por energia fotovoltaica

Projeto de dissertação submetido para qualificação no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.
Orientador: Prof. Ricardo Rüther, Dr.

Florianópolis

2022

RESUMO

O uso de sistemas fotovoltaicos desconectados da rede (off grid) é uma alternativa para o atendimento de demandas energéticas básicas de comunidades sem conexão à rede elétrica, realidade enfrentada por cerca de 860 milhões de pessoas em todo o mundo em 2020. O objetivo deste estudo é desenvolver um modelo matemático para simular um sistema e validá-lo através de um experimento. O sistema é composto por um refrigerador de pequeno porte, alimentado por um gerador fotovoltaico off-grid e com armazenamento de energia em banco de bateria. O modelo matemático será desenvolvido com base na literatura. O experimento consiste em uma instalação desse sistema, localizada no laboratório Fotovoltaica/UFSC (Florianópolis), que será instrumentada com sensores de corrente elétrica, tensão elétrica e temperatura. Os dados serão coletados por datalogger e armazenados em computador. Os dados medidos no experimento prático serão comparados aos resultados calculados no modelo matemático para as mesmas condições climáticas, de forma a identificar a margem de erro da simulação. Espera-se como resultado contribuir para o desenvolvimento e dimensionamento de produtos alimentados por geradores fotovoltaicos off-grid para suprimento de necessidades de comunidades isoladas, especialmente o uso de refrigeradores nessas condições.

Palavras-chave: fotovoltaico off-grid, modelagem, refrigerador

SUMÁRIO

1 Introdução 15

1.1 Justificativa 16

1.2 Objetivos 17

1.2.1 Objetivo Geral 17

1.2.2 Objetivos Específicos 17

2 Modelagem de sistemas fotovoltaicos isolados 18

3 Método 19

3.1 Desenvolvimento de modelo matemático 20

3.2 Instalação de experimento 20

3.3 Instrumentação do experimento 23

3.4 Análise de dados e validação do modelo 27

3.5 Cronograma 28

4 Resultados esperados 30

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um importante meio para geração de qualidade de vida mínima, tendo em vista o acesso a serviços fundamentais como iluminação e refrigeração. Embora o acesso à energia elétrica em todo mundo tenha aumentado de 74% para 86% entre 2010 e 2018, cerca de 860 milhões de pessoas ainda não tem acesso à energia elétrica (REN21, 2020).

Sistemas distribuídos de energia renovável (sistemas *off-grid* isolados ou mini-redes) são formas eficazes e estabelecidas de geração e distribuição de energia para comunidades não conectadas à rede principal de distribuição. Em 2019, essa foi a principal fonte de acesso à energia elétrica para cerca de 150 milhões de pessoas em todo mundo, sendo que 85% dessa energia foi gerada por sistemas *off-grid* com geradores fotovoltaicos (REN21, 2020).

Nesse cenário, novos eletrodomésticos estão sendo desenvolvidos especialmente para uso em sistemas *off-grid*. Em 2019, aproximadamente 1,2 milhões de eletrodomésticos *off-grid* foram vendidos, em sua maioria ventiladores e televisões (REN21, 2020) e a demanda por novos produtos para esse mercado é crescente. Eletrodomésticos para uso em sistemas *off-grid* tem requisitos específicos, tais como alta eficiência energética, baixo custo e flexibilidade frente a flutuações na alimentação de energia (EFFICIENCY FOR ACCESS, 2019).

Novos produtos que atendam esses requisitos têm potencial de impactar positivamente a vida dessas populações, como é o caso de refrigeradores, bombas de água e panelas de pressão elétrica (EFFICIENCY FOR ACCESS, 2018; REN21, 2020). De forma mais específica, o acesso a refrigeração pode facilitar a geração de renda em pequenos comércios locais, prolongar a validade de alimentos frescos, enriquecer dietas e reduzir o desperdício de alimentos (EFFICIENCY FOR ACCESS, 2018).

Outra aplicação relevante desse tipo de equipamento é na saúde pública. Sistemas autônomos de refrigeração para uso em áreas isoladas são elementos essenciais em programas de vacinação. Conforme relatório da Organização Mundial de Saúde, o uso de tecnologia fotovoltaica para esse fim iniciou nos anos 80, no entanto, o banco de baterias representa um desafio para o uso dessa solução, tendo em vista as falhas inesperadas, vida útil curta e alto custo de reposição das baterias (WHO, 2015).

O desenvolvimento de um sistema isolado para uso com refrigerador deve ser realizado de forma integrada, visto as características especiais desse tipo de carga no sistema

elétrico. Em um refrigerador, o compressor, componente responsável pela realização do trabalho termodinâmico, altera de forma cíclica entre os estados ligado e desligado. A cada nova partida ocorre um pico de corrente sobre o sistema elétrico, que é especialmente prejudicial para o banco de baterias.

Dessa forma, o correto dimensionamento e conhecimento sobre o comportamento dos componentes do sistema é de grande importância para o desenvolvimento de novas soluções que possam melhorar significativamente o desempenho e reduzir o custo dessas soluções, como por exemplo uma nova geração de compressores ou sistemas de gerenciamento da geração fotovoltaica especialmente desenvolvidos para esse fim.

1.1JUSTIFICATIVA

Esse trabalho está inserido no escopo de projeto de pesquisa e desenvolvimento firmado entre os laboratórios Fotovoltaica/UFSC e Polo/UFSC, com apoio da empresa Embraco/Nidec. Os estudos irão permitir o desenvolvimento de sistemas de refrigeração mais eficientes e de menor impacto ambiental. Dentro desse contexto serão avaliados novos sistemas de refrigeração *off-grid*, alimentados por energia solar fotovoltaica e sistema de armazenamento em bancos de bateria de íons de lítio de primeira e de segunda vida.

O equipamento objeto do trabalho foi vencedor do prêmio Global LEAP Awards 2019, competição internacional que busca identificar e promover os melhores aparelhos para aplicação em sistemas isolados (*off-grid*) do mundo, de forma a acelerar o desenvolvimento e inovação do mercado para atender comunidades carentes sem acesso à energia elétrica ou que contam com combustíveis fósseis como principal opção para atender as necessidades energéticas diárias (GLOBAL LEAP, 2019).

Para início da realização do trabalho, já está programado o acesso ao refrigerador *off-grid* supra citado e de kit fotovoltaico, o qual inclui hardware para gerenciamento da geração de energia e banco de bateria. Dados de testes de performance do refrigerador conforme normas de ensaio também foram disponibilizados para uso na pesquisa.

A equipe de pesquisa do laboratório Polo/UFSC desenvolveu um modelo matemático para realizar simulação do refrigerador utilizado nesse trabalho. Esse modelo matemático será utilizado como entrada para o desenvolvimento desse trabalho.

1.2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia para dimensionamento e certificação de produtos solares, alimentados por energia solar fotovoltaica e sistema de armazenamento em bancos de bateria, instalados em edificações unifamiliares populares.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão na literatura acerca dos conhecimentos específicos no dimensionamento de painéis, acionamento de sistema e gerenciamento de baterias (controles). Identificar prós e contras de diferentes tecnologias e tendências de mercado.
- Analisar e identificar as características do equipamento objeto do trabalho e do comportamento elétrico de seus componentes.
- Desenvolvimento de método para dimensionamento de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica e banco de baterias aplicados em refrigeradores domésticos.
- Desenvolver modelo matemático para previsão de potência disponível em painéis fotovoltaicos e do nível de carga de baterias em função do tempo.
- Instalar kit de refrigerador solar (refrigerador, módulo fotovoltaico, hardware de gerenciamento e banco de bateria) na localidade de Florianópolis.
- Analisar dados de irradiação, geração e consumo medidos na instalação e comparar com modelo de previsão desenvolvido.

2 MODELAGEM DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS

Diferentemente dos sistemas conectados à rede, os sistemas fotovoltaicos isolados, também conhecidos como *off-grid* ou *standalone PV*, não possuem conexão à rede elétrica da concessionária. Esses sistemas podem ser caracterizados como sistemas centralizados ou sistemas descentralizados. Tipicamente esses sistemas consistem em um gerador fotovoltaico, armazenamento em baterias, conversor CC/CC, controlador de carga e inversor de frequência.

Khatib, Ibrahim e Mohamed (2016) identificaram seis diferentes tipos de métodos para dimensionar e modelar sistemas fotovoltaicos isolados: intuitivos, numéricos, analíticos, ferramentas computacionais comerciais, inteligência artificial e métodos híbridos. Nos métodos numéricos são realizadas simulações em que as variáveis são calculadas através de relações matemáticas, e consideram o balanço de energia a cada intervalo de tempo, que são tipicamente da ordem de minutos, horas ou dias. Esse tipo de método será utilizado nesse trabalho, visto que se busca identificar o comportamento do sistema de acordo com diferentes variáveis, tanto climáticas como dos componentes, ao longo do tempo.

Segundo Dufo-López, Lujano-Rojas e Bernal-Agustín (2014), a corrente elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico é função de constantes do módulo utilizado, da irradiância incidente e da temperatura da célula fotovoltaica (Equação 1).

$$I_{PV}(t) = I_{SC} . \frac{G(t)}{1kW/m^2} . \left[1 + \frac{\alpha}{100}(T_c(t) - 25)\right] \quad (1)$$

Na Equação 1, $I_{PV}(t)$ é a corrente gerada pelo módulo fotovoltaico, I_{SC} é corrente de curto-circuito (constante do módulo), $G(t)$ é a irradiância incidente, α é o coeficiente de temperatura do módulo, $T_c(t)$ é a temperatura da célula. A temperatura da célula fotovoltaica pode ser aproximada em função da temperatura ambiente e da irradiância incidente (Equação 2), onde $T_a(t)$ é a temperatura do ar (ambiente externo).

$$T_c(t) = T_a(t) + \left(\frac{NOTC - 20}{0{,}8}\right) . G(t) \quad (2)$$

Dufo-López, Lujano-Rojas e Bernal-Agustín (2014) apresentam quatro modelos para simular o comportamento de baterias: o modelo Ah, modelo KiBaM, o modelo de Copetti e o

modelo de Schiffer. Dentre os modelo apresentados, o modelo KiBaM representa de forma adequada a taxa de capacidade e recuperação da bateria, e foi validado para uso de baterias de íon de lítio (FREITAS et al., 2017). No modelo KiBaM, a carga da bateria é distribuída em duas fontes, uma fonte de carga disponível e uma fonte de carga limitada. Os valores das duas fontes de carga são dependentes do nível de carga, do módulo e sentido da corrente elétrica e de parâmetros experimentais da bateria, os quais podem ser obtidos na ficha técnica da bateria.

A modelagem de sistemas de refrigeração não faz parte do escopo desse trabalho, visto que será utilizado um modelo já desenvolvido, o qual deverá, no entanto, ser integrado ao modelo do sistema completo. Uma entrada de dados importante para o modelo do refrigerador é a temperatura ambiente, visto que essa variável impacta diretamente no consumo do equipamento e consequentemente no desempenho do sistema como um todo. A simulação de temperatura ambiente de uma edificação envolve modelagem dos ambientes e envoltórias, e é tipicamente desenvolvida para cada edificação específica.

Abreu (2004) apresenta um método simples para estimar a temperatura interna de residências a partir de temperaturas internas e externas aferidas durante curtos períodos. O método propõe o desenvolvimento de equações que podem ser denominadas como sendo a “assinatura térmica” do ambiente. Essa abordagem simplifica o cálculo da temperatura ambiente para integração em outro modelo de simulação. Em seu trabalho, a autora também apresenta o resultado do método aplicado em 14 moradias populares construídas com diferentes materiais. Esses dados podem ser usados após a validação do método proposto, visto que amplia a aplicação do modelo para edificações de diferentes tipos construtivos.

3 MÉTODO

A execução desse trabalho envolve o desenvolvimento de um modelo matemático para simulação do sistema em análise, a instalação de um experimento em escala real para coleta de dados e a análise dos resultados simulados através do modelo matemático e comparação com os valores coletados no experimento. Essas etapas serão definidas nas seções seguintes, sendo que algumas já foram realizadas e, portanto, estão descritas com maior detalhamento.

3.1 DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO

O desenvolvimento do modelo será realizado pelo aluno, com base em revisão da literatura sobre modelagem e simulação de sistemas fotovoltaicos e de baterias. Para essa etapa, estão previstos os seguintes passos:

1. Revisão da literatura sobre modelagem e simulação de sistemas fotovoltaicos e de baterias
2. Identificação das variáveis envolvidas
3. Identificação dos bancos de dados climáticos disponíveis
4. Desenvolvimento do modelo matemático

O desenvolvimento de um modelo matemático para simular um sistema fotovoltaico isolado envolve a modelagem de diferentes componentes e fenômenos físicos, bem como a compatibilização com entradas de dados. Os grupos que envolvem o sistema são: módulo fotovoltaico, controlador de carga, bateria e a carga. As entradas de dados climáticos são: irradiância global e temperatura do ar.

O modelo já está parcialmente desenvolvido e utiliza as referências da literatura para a modelagem dos diferentes componentes do sistema. As bases de dados climáticos foram avaliadas considerando critérios de disponibilidade, atendimento de requisitos técnicos, abrangência a todos os continentes. O repositório OneBuilding (https://climate.onebuilding.org/) atende a esses requisitos e será utilizado como base de dados climáticos para o modelo.

3.2INSTALAÇÃO DE EXPERIMENTO

O desenvolvimento e instalação do experimento tem como objetivo, nesse trabalho, de realizar coleta de dados do sistema em condições reais afim de permitir a comparação dos dados medidos com os resultados simulados através do modelo matemático desenvolvido. Para essa etapa, foram previstos os seguintes passos:

1. Identificação e aquisição dos componentes necessários para instalação e instrumentação do experimento
2. Montagem do experimento
3. Instrumentação do experimento
4. Acompanhamento e monitoramento da coleta de dados

O experimento compreende: um módulo fotovoltaico instalado exposto ao sol, um controlador de carga MPPT, três módulos de bateria de íon de lítio, um regulador de tensão e um refrigerador para sistemas off-grid. Um esquema simplificado do experimento é apresentado na Figura 1.

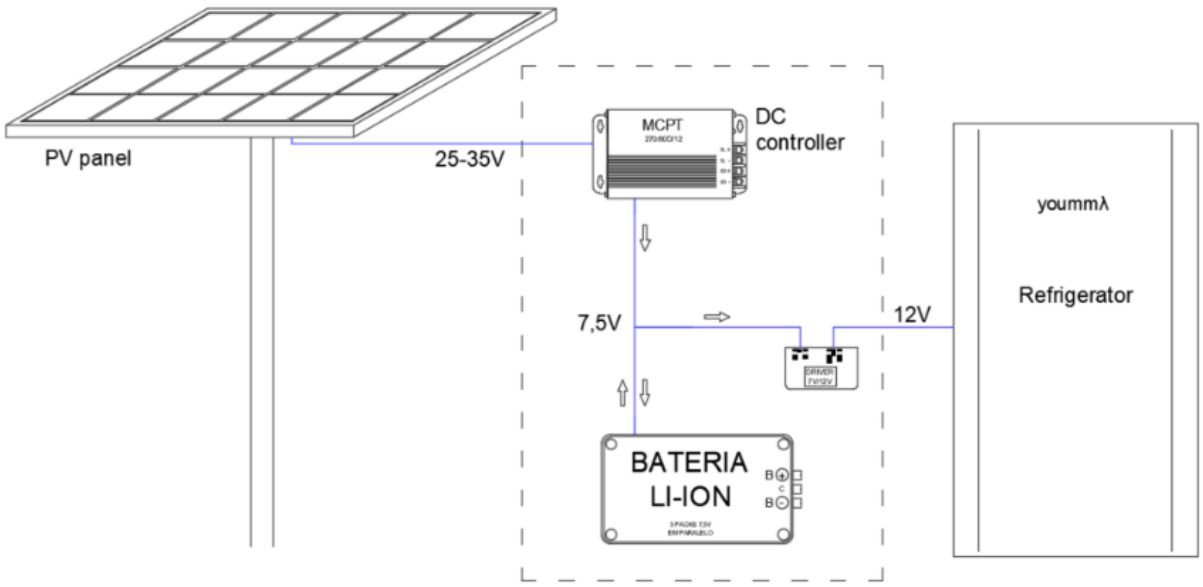


Figura 1 - Esquema simplificado do experimento.

Os componentes para o experimento, bem como para sua instrumentação, foram disponibilizados através de projeto do laboratório Fotovoltaica/UFSC em parceria com o laboratório Polo/UFSC. O experimento foi instalado, com auxílio da equipe do Fotovoltaica/UFSC.

O refrigerador utilizado no experimento e objeto de estudo é equipado com um compressor 12 V em corrente contínua, de frequência variável (inverter) e de deslocamento variável. De acordo com dados do fabricante, a potência nominal do equipamento é de 17,8 W e o consumo é menor do que 200 Wh/dia, considerando ensaio a temperatura ambiente de 32 °C (GLOBAL LEAP, 2019).

Na Figura 2 é apresentado uma visão geral da instalação, onde ao fundo, na área externa da edificação, se encontra o módulo fotovoltaico sobre um poste e, fixado no poste, uma caixa metálica onde estão instalados os controladores de carga e as baterias de íon de lítio. Na parte interna da edificação fica acondicionado o refrigerador. Na Figura 3 é apresentado com maiores detalhes o conteúdo da caixa metálica fixada ao poste.



Figura 2 - Visão geral do experimento. Ao fundo, na área externa, o módulo fotovoltaico e a caixa do controlador e baterias. Em frente, na área interna, o refrigerador.

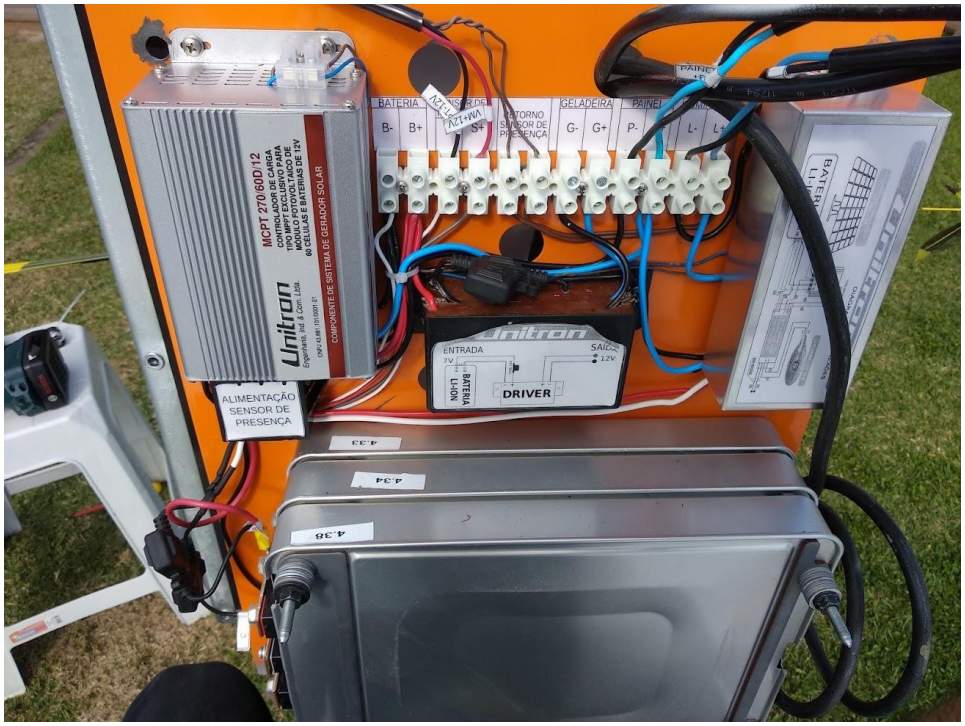


Figura 3 - Caixa do controlador e baterias.

Os equipamentos que compõem o experimento são apresentados na Tabela 1. O diagrama completo de instalação do sistema é apresentado no ANEXO A – Diagrama de instrumentação do experimento. Conforme é apresentado no diagrama, o sistema não possui conexão com a rede elétrica.

Tabela 1 – Lista e detalhamento de equipamentos utilizados no experimento.

Descrição	**Quantidade**
Refrigerador 100L 12VCC 18W. Modelo: Yomma Nilo 100	1
Painel fotovoltaico 255Wp. Modelo: Yingli YGE_YL255P	1
Bateria de íon de lítio 7,5VCC 500Wh. Modelo Nissan Leaf gen1	3
Conversor controlador MPPT. Modelo: Unitron MCPT 270/60D/12	1
Driver controlador Carga e descarga ion-litio. Fabricante: Unitron	1
Regulador de tensão 7,5VCC/12VCC. Fabricante: Unitron	1

3.3 INSTRUMENTAÇÃO DO EXPERIMENTO

Os dados necessários a serem medidos no experimento envolvem variáveis relacionadas a energia elétrica (tensão, corrente e potência) gerada, consumida e armazenada, irradiação solar e temperatura dos componentes e ambientes. Para realizar a medição desses dados, o experimento foi instrumentado com um sistema de aquisição de dados e sensores para as diferentes grandezas necessárias.

Os dados de energia que se deseja conhecer são referentes a energia gerada pelo gerador fotovoltaico, a energia consumida pela carga e a energia armazenada e cedida pela bateria. Para identificar todo o fluxo de energia desejado, optou-se por dividir o sistema em três subsistemas e medir o fluxo de energia na interface entre eles. Dessa forma, o sistema foi dividido em:

1. PC (Painel-controlador): engloba módulo fotovoltaico e controlador de carga
2. Bat (Bateria): Engloba as 3 baterias em paralelo
3. Carga: engloba o regulador de tensão 12V e o refrigerador

A medição de energia foi realizada na interface entre os três subsistemas, conforme é apresentado na Figura 4. A medida de tensão é a mesma para os 3 pontos (PC, Bat e Carga) e é adquirida através de um divisor de tensão 10:1, o qual reduz em dez vezes a tensão medida

pelo *datalogger*, de forma a ficar dentro do limite máximo permitido pelo equipamento. A corrente elétrica é medida nos 3 pontos (PC, Bat e Carga), através de um resistor shunt, de resistência conhecida. O *datalogger* adquire o valor da queda de tensão nesse resistor, e a corrente é então calculada segundo a lei de ohm, dividindo-se a tensão medida pelo valor de resistência conhecido (i = V/R). A potência elétrica é medida nos três pontos (PC, Bat e Carga), multiplicando-se os valores de corrente e tensão medidos. Posteriormente, os valores de energia elétrica (Wh) podem ser calculados através da integração dos valores de potência (W) medidos.

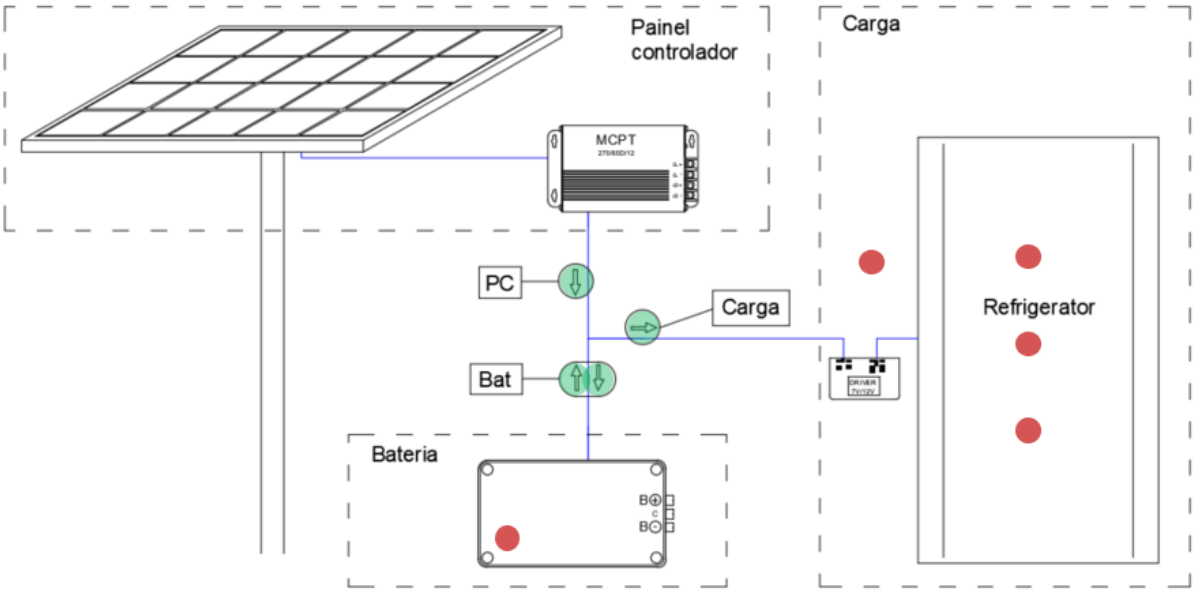


Figura 4 - Posicionamento dos sensores de instrumentação do experimento. Em verde os sensores de energia, em vermelho os sensores de temperatura.

A medição das temperaturas foi implementada através de sensores termopar tipo T (cobre-costantan), conectados ao *datalogger* através de um multiplexador de termopares. A função do multiplexador é possibilitar a utilização de diversos canais de termopares conectados a apenas uma entrada do *datalogger* e dessa forma, ampliar a quantidade de sensores instalados, visto que a quantidade de entradas no *datalogger* é limitada. Os termopares foram instalados em cinco pontos diferentes: três na parte interna do refrigerador (porção superior, média e inferior), um na sala e um conectado à bateria.

As medições de irradiância solar e temperatura do ambiente externo são coletadas pela estação solarimétrica instalada no mesmo laboratório, a cerca de 35 metros da sala onde está localizado o experimento. A irradiância é coletada com uso de um piranômetro, instalado

na mesma inclinação do módulo fotovoltaico utilizado no experimento (27°). A temperatura do ar do ambiente externo é coletada com uso de sensor de temperatura e umidade.

Tabela 2 - Lista de variáveis medidas e sensores.

Variável	Descrição	Sensor	Unidade
Vbat	Tensão elétrica - Baterias	Divisor de tensão	V
Vcell_A	Tensão elétrica - Baterias (célula negativa)	Divisor de tensão	V
VshuntPC	Tensão elétrica - Resistor shunt - Geração fotovoltaica	Resistor shunt	V
VshuntBat	Tensão elétrica - Resistor shunt - Bateria	Resistor shunt	V
VshuntCarga	Tensão elétrica - Resistor shunt - Carga	Resistor shunt	V
Te_Sala	Temperatura - Ambiente (sala)	Termopar tipo T	°C
Te_Ref_Sup	Temperatura - Refrigerador (superior)	Termopar tipo T	°C
Te_Ref_X	Temperatura - Refrigerador (meio)	Termopar tipo T	°C
Te_Ref_Inf	Temperatura - Refrigerador (inferior)	Termopar tipo T	°C
Te_Ref_Sup	Temperatura - Ambiente (externa)	Termopar tipo T	°C
TGIP_SMP11_VENT_Avg	Irradiância solar global plano inclinado 27°	Piranômetro	W/m²
TempAr_Avg	Temperatura do ar (ambiente externo)	Sens. de temperatura	°C

Tabela 3 - Lista de variáveis calculadas e forma de cálculo.

Variável	Descrição	Cálculo	Unidade
Vcell_B	Tensão elétrica - Baterias (célula positiva)	Vbat - Vcell_A	V
I_PC	Corrente elétrica - Geração fotovoltaica	R_shunt * VshuntPC	A
Ibat	Corrente elétrica - Baterias	R_shunt * VshuntBat	A
Icarga	Corrente elétrica - Refrigerador	R_shunt * VshuntCarga	A
P_PC	Potência elétrica - Geração fotovoltaica	Vbat * I_PC	W
Pbat	Potência elétrica - Baterias	Vbat * Ibat	W
Pcarga	Potência elétrica - Refrigerador	Vbat * Icarga	W

Tabela 4 - Lista e detalhamento dos equipamentos e sensores utilizados na instrumentação do experimento.

Descrição	**Fabricante e modelo**	**Quantidade**
Divisor de tensão 10/1	Campbell VDIV10.1	1
Resistor shunt	Ohmite 15FR010E 0,01ohm 5W 1%	3
Termopar tipo T	Omega	6
Datalogger	Campbell CR1000X	1
Multiplexador de termopares	Campbell AM25T	1
Bateria recarregável e fonte	Campbell CH150	1
Piranômetro	Kipp & Zonen SMP11	1
Sensor temperatura e umidade	PTB110	1

Na Tabela 2 e Tabela 3 são apresentadas as listas de variáveis medidas e calculadas, respectivamente. Na Tabela 4 é apresentada a lista e o detalhamento dos equipamentos e sensores utilizados na instrumentação do experimento. A aquisição e armazenamento dos dados é realizada por equipamento *datalogger* da fabricante Campbell Scientific. Todas as medidas são realizadas com intervalo de aquisição de um segundo e então é calculada a média para um minuto. O sistema registra duas bases de dados, uma com intervalo de um segundo e uma com intervalo de um minuto. O *datalogger* é conectado à internet e os dados podem ser baixados de forma remota. Todos os detalhes técnicos da configuração do plano de instrumentação estão apresentados no diagrama no Anexo A - Diagrama de instrumentação do experimento.

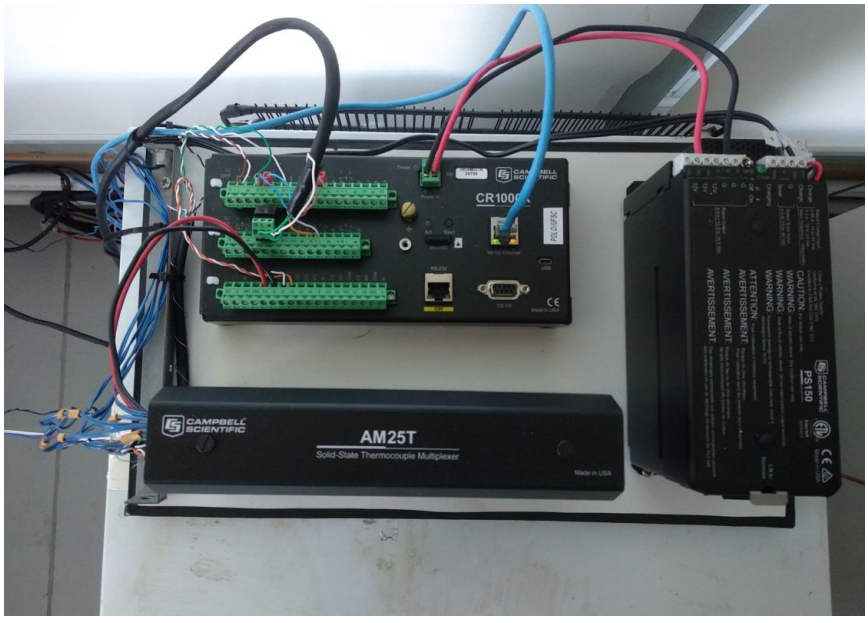


Figura 5 - Sistema de aquisição e registro de dados.

Na Figura 5 é apresentado uma visão geral do sistema de aquisição de dados: na parte superior se encontra o *datalogger*, na direita a bateria (exclusiva do sistema de aquisição) e na parte inferior o multiplexador de termopares.

3.4 ANÁLISE DE DADOS E VALIDAÇÃO DO MODELO

Na etapa de análise de dados serão utilizados os resultados das duas etapas anteriores. O objetivo é realizar a validação do modelo matemático através da comparação dos resultados simulados no modelo com os resultados medidos no experimento.

Para realizar esse comparativo, estão planejadas as seguintes etapas:

1. Aquisição de dados do experimento
2. Aquisição de dados climáticos da estação solarimétrica
3. Tratamento e comparação dos dados
4. Comparação dos resultados simulados com os dados adquiridos no experimento

Para as etapas de aquisição de dados do experimento e dados climáticos, o experimento e a instrumentação devem estar em pleno funcionamento e expostos de forma contínua (24 horas por dia, todos os dias da semana) pelo período de pelo menos 30 dias. Esse período mínimo é necessário visto que o ciclo de funcionamento é diferente nos períodos da noite e do dia, e que está sujeito às variações climáticas. Dessa forma, o registro de diversos dias permite uma melhor avaliação do comportamento do sistema. A verificação do funcionamento da coleta de dados deve ser realizada com frequência para evitar a perda de dados.

Os dados coletados devem ser posteriormente extraídos e tratados para análise e cálculo das variáveis desejadas. Os dados medidos serão registrados em base de um minuto. As variáveis abaixo serão calculadas e comparadas em base diária e horária.

- Energia fornecida pelo gerador fotovoltaico
- Energia armazenada na bateria
- Energia fornecida pela bateria à carga
- Energia consumida pela carga (refrigerador)
- Estado de carga da bateria
- Irradiação global

- Temperatura da sala

Após o tratamento dos dados medidos, o modelo matemático será rodado utilizando como dados de entrada (irradiância e temperatura do ar) os valores medidos. Dessa forma será possível comparar os resultados medidos pelo experimento e os resultados simulados pelo modelo para as mesmas condições climáticas e assim identificar a aproximação dos resultados do modelo com os valores reais.

3.5 CRONOGRAMA

Algumas das atividades do trabalho já foram realizadas conforme apresentado no método. No cronograma está planejado a realização das atividades que ainda devem ser realizadas, bem como as etapas de redação e defesa da dissertação. O plano de atividades é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Cronograma de trabalho.

Etapa	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
Desenvolvimento do modelo matemático							
Revisão da literatura sobre modelagem e simulação de sistemas fotovoltaicos e de baterias	X	X	X	X			
Identificação das variáveis envolvidas	R						
Identificação dos bancos de dados climáticos disponíveis	R						
Desenvolvimento do modelo matemático	R						
Instalação do experimento							
Identificação e aquisição dos componentes necessários para instalação e instrumentação do experimento	R						
Montagem do experimento	R						
Instrumentação do experimento	R						
Acompanhamento e monitoramento da coleta de dados	R						
Análise de dados e validação do modelo							
Aquisição de dados do experimento	R						
Aquisição de dados climáticos da estação solarimétrica	R						
Tratamento e comparação dos dados	X	X					
Comparação dos resultados simulados com os dados adquiridos no experimento		X	X	X			
Dissertação							
Redação da dissertação				X	X	X	
Defesa							X

LEGENDA: R – realizado; X – a fazer

Conforme apresentado no cronograma, as atividades estão concentradas nas etapas de análise de dados e validação do modelo matemático e de redação e defesa da dissertação. Entende-se que a realização dessas etapas pode levar a aperfeiçoamentos no modelo matemático, e que a literatura deverá ser consultada em todos os momentos durante a etapa de validação, por isso está previsto a continuidade da revisão de literatura até o final dessa etapa.

4 RESULTADOS ESPERADOS

Está compreendido no escopo do trabalho a criação de modelo para dimensionamento de sistema de refrigeração com uso de energia solar fotovoltaica e validação do modelo através de análise comparativa com medições de geração e consumo realizadas em equipamento instalado. Espera-se, assim, obter um modelo confiável para o dimensionamento, bem como os parâmetros e requisitos necessários para o desenvolvimento de refrigerador para uso em sistemas fotovoltaicos off-grid, equipados com banco de bateria.

Com esse resultado, espera-se contribuir com a evolução e ampliação de oferta de equipamentos especialmente desenvolvidos para uso em sistemas off-grid. A disponibilidade de tais equipamentos de forma acessível e ampla tem potencial de impactar positivamente a vida de milhões de pessoas que não tem acesso a estrutura básica armazenamento de alimentos, bem como de incentivar o uso de fontes renováveis de energia em comunidades isoladas da rede.

REFERÊNCIAS

DUFO-LÓPEZ, R.; LUJANO-ROJAS, J. M.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. **Applied Energy**, v. 115, p. 242–253, 2014.

EFFICIENCY FOR ACCESS. Refrigeration Global Market Development Roundtable. n. June, 2018.

EFFICIENCY FOR ACCESS. **Off-Grid Refrigeration: Technology Roadmap**. [s.l: s.n.].

FREITAS, D. J. B. et al. **Validação do Modelo KiBaM para Predição do Tempo de Vida de Baterias Utilizadas em Dispositivos Móveis**. Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics. **Anais**...Gramado: 2017

GLOBAL LEAP. 2019 Buyer’s Guide for Outstanding Off-Grid Refrigerators. 2019.

KHATIB, T.; IBRAHIM, I. A.; MOHAMED, A. A review on sizing

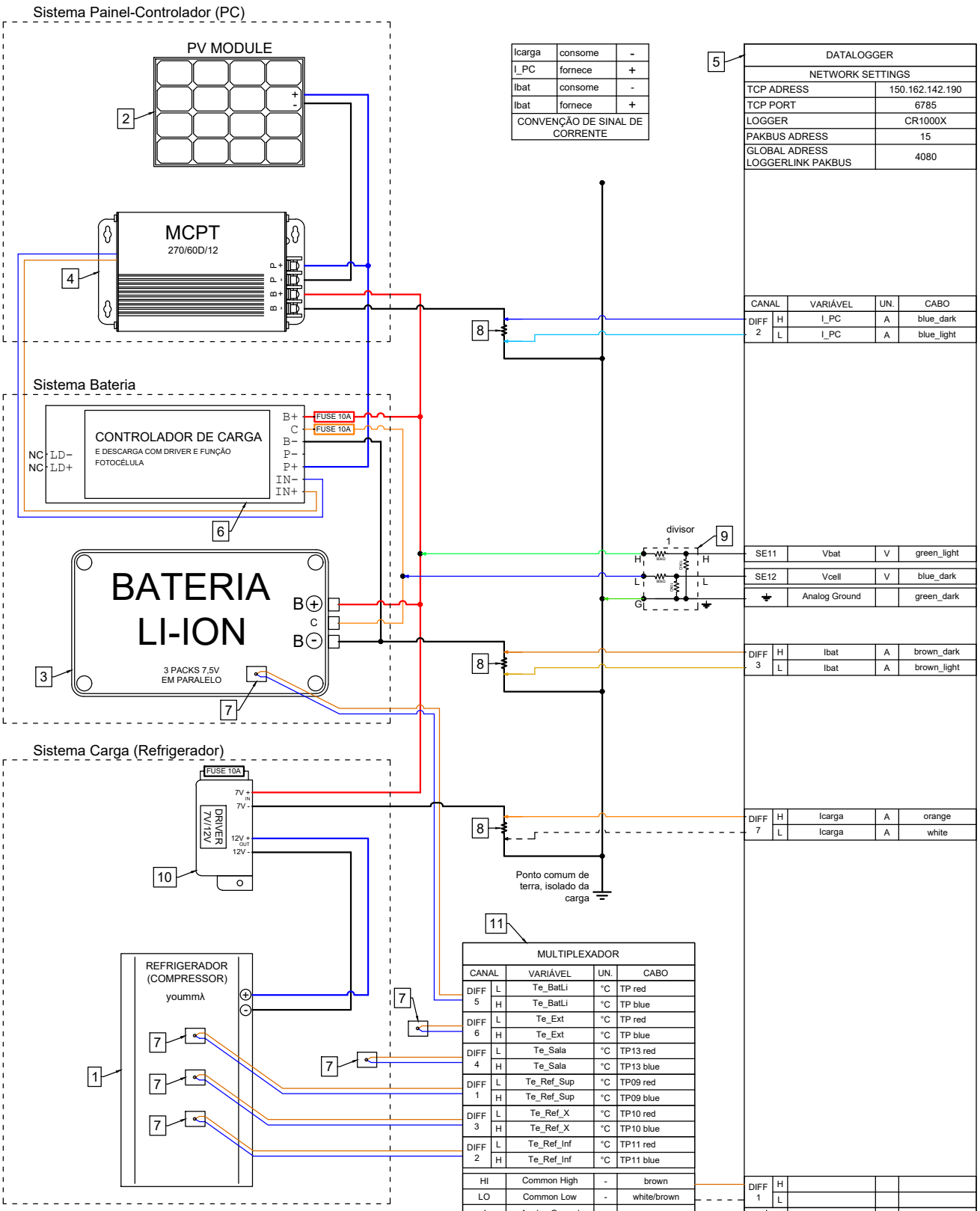
methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system. **Energy Conversion and Management**, v. 120, p. 430–448, 2016.

PAPST, A. L. Método Estimativo da Temperatura Interna de Edificações Residenciais em Uso. p. 179, 2004.

REN21. **Renewables 2020 Global Status ReportREN21 Secretariat**. Paris: [s.n.]. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf>.

WHO. **Introducing solar-powered vaccine refrigerator and freezer systems**. Geneva: [s.n.].

ANEXO A – Diagrama de instrumentação do experimento



Icarga	consome	-
I_PC	fornece	+
Ibat	consome	-
Ibat	fornece	+
CONVENÇÃO DE SINAL DE CORRENTE		

NETWORK SETTINGS	
TCP ADRESS	150.162.142.190
TCP PORT	6785
LOGGER	CR1000X
PAKBUS ADRESS	15
GLOBAL ADRESS LOGGERLINK PAKBUS	4080

CANAL		VARIÁVEL	UN.	CABO
DIFF 2	H	I_PC	A	blue_dark
	L	I_PC	A	blue_light
SE11		Vbat	V	green_light
SE12		Vcell	V	blue_dark
⏚		Analog Ground		green_dark
DIFF 3	H	Ibat	A	brown_dark
	L	Ibat	A	brown_light
DIFF 7	H	Icarga	A	orange
	L	Icarga	A	white

MULTIPLEXADOR				
CANAL		VARIÁVEL	UN.	CABO
DIFF 5	L	Te_BatLi	°C	TP red
	H	Te_BatLi	°C	TP blue
DIFF 6	L	Te_Ext	°C	TP red
	H	Te_Ext	°C	TP blue
DIFF 4	L	Te_Sala	°C	TP13 red
	H	Te_Sala	°C	TP13 blue
DIFF 1	L	Te_Ref_Sup	°C	TP09 red
	H	Te_Ref_Sup	°C	TP09 blue
DIFF 3	L	Te_Ref_X	°C	TP10 red
	H	Te_Ref_X	°C	TP10 blue
DIFF 2	L	Te_Ref_Inf	°C	TP11 red
	H	Te_Ref_Inf	°C	TP11 blue
HI		Common High	-	brown
LO		Common Low	-	white/brown
⏚		Analog Ground	-	green
CLK		Clock	-	white/orange
RES		Reset	-	orange
VX		PRT Excitation	-	white/green
12V		12VDC	-	black
G		Power Ground	-	red

DIFF 1	H	
	L	
⏚		
C1		
C2		
VX1		
12V		
G		

ITEM	DESCRIÇÃO	QTDE
11	Multiplexador de termopares - Campbell AM25T	1
10	Driver conversor tensão 7,5VDC-12VDC - Unitron	1
9	Voltage Divider 10/1 - Campbell VDIV10.1	1
8	Shunt resistor 0,01ohm 5W 1% - Ohmite 15FR010E	3
7	Termopar tipo T - Omega	6
6	Driver controlador carga e descarga Li-ion - Unitron	1
5	Datalogger - Campbell CR1000X	1
4	Conversor-Controlador - Unitron MCPT 270/60D/12	1
3	Bateria ion-Litio 7,5VDC - Nissan Leaf	3
2	Painel fotovoltaico 255W - YGE_YL255P	1
1	Refrigerador DC - Yomma Nilo 100	1

LISTA DE MATERIAIS

Projetista: Vinícius Cantú	Arquivo	Data: 28.06.2021	Escala

Universidade Federal de Santa Catarina
Fotovoltaica - UFSC
Av Luiz Boiteux Piazza, 1302, Lotes 114/115 - Florianópolis - SC
Tel: +55 (48) 3721-4598

Diagrama de circuito - experimento refrigerador solar FV

Rev	Folha
14	1