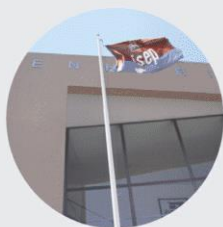




Algoritmo de Projeto e Gestão de Subsistema de Alimentação Baseado em Energia Solar para Redes de Sensores Sem Fios

BRUNO MELO DE SOUZA

julho de 2018



Algoritmo de Projeto e Gestão de Subsistema de Alimentação Baseado em Energia Solar para Redes de Sensores sem Fios

BRUNO MELO DE SOUZA

Julho de 2018

ALGORITMO DE PROJETO E GESTÃO DE SUBSISTEMA DE ALIMENTAÇÃO BASEADO EM ENERGIA SOLAR PARA REDES DE SENSORES SEM FIOS

Bruno Melo de Souza



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia

2018

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Bruno Melo de Souza, Nº 1170131, 1170131@isep.ipp.pt

Orientação científica: Nuno Gomes, nbg@isep.ipp.pt

Empresa: EQS-Serviços De Engenharia, Qualidade e Segurança Lda

Supervisão: Carlos Gouveia, carlos.gouveia@eqs-global.com



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2018

Ao meu pai, por acreditar em meus sonhos.

Agradecimentos

Ao longo do período de desenvolvimento dessa dissertação foram muitas pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a finalização da mesma. Em especial, gostaria de agradecer:

Ao Professor Nuno Gomes, pela orientação científica.

Aos colegas da empresa EQS, pelo companheirismo e diligência. Especialmente meu supervisor Carlos Gouveia, pelo excelente direcionamento profissional, que foi essencial no desenvolvimento desta tese.

Às minhas eternas professoras, Dora Melo e Nazaré Cavalcante, por tudo que me ensinaram e ensinam até hoje.

Aos amigos Alex Salomon e Rafael Queiroz, por me obrigarem a sair de casa eventualmente.

A Beatriz Melo pela paciência, compaixão e apoio em todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

E por último, mas não menos importante, aos acreanos de Taubaté, nomeadamente: Ana Paula, Arquiney Augusto, André Lucas, Dany Prisley, Gabriel Mota, Laura Nadyne e Nina Veras por suportarem os desabafos e loucuras em geral.

Resumo

Redes de Sensores sem Fios são dispositivos compostos de um conjunto de sensores e atuadores, que tem como objetivo observar fenômenos e enviar as informações aferidas à uma estação geograficamente distante para processamento, análise e armazenamento dos dados aferidos. O subsistema de alimentação é um limitante no projeto de uma rede de sensores sem fios. Esse trabalho é um relatório do estágio curricular realizado e tem como objetivo expor o estado da arte das três principais etapas de projeto do subsistema de alimentação de uma rede de sensoriamento com coleta solar, nomeadamente: aferição das disponibilidades energéticas, dimensionamento da capacidade nominal do banco de baterias e sistema de gestão adaptativo de bateria, visando compor um algoritmo para servir de diretriz no dimensionamento deste subsistema.

A partir do estudo da bibliografia, foi desenvolvido um algoritmo que calcula a capacidade mínima de armazenamento do banco de baterias em função do arranjo solar escolhido, das características meteorológicas do sítio em estudo e da energia demandada pela rede de sensores sem fios. Além de dimensionar o armazenamento necessário para o banco de baterias, o algoritmo ainda simula o comportamento do estado de carga da bateria ao longo do tempo para as condições meteorológicas estabelecidas com e sem um sistema de gestão de baterias adaptativo e apresenta a dinâmica simulada do estado de carregamento da bateria no período em estudo por meio de gráficos.

O algoritmo foi validado através de uma simulação em *Matlab* usando como base uma rede de sensores sem fios teórica. Para os dados de dimensionamento propostos e as condições energéticas sugeridas o sistema se manteve estável ao longo dos 10 anos simulados, sem a inserção do sistema de gestão. Após a adição de um algoritmo de gestão adaptativo, observou-se um aumento de mais de 30% da performance média do sistema, em troca de 309 dias com ciclo de trabalho de 0%, durante os 3.650 dias simulados.

Palavras-Chave

Redes, algoritmo, sensores, alimentação, bateria, energia, gestão, simulação.

Abstract

Wireless Sensor Networks are devices composed of a set of sensors and actuators, that aim to analyze phenomena and send the measured information to a geographically distant station for processing, further analysis and storage of measured data. The power subsystem is a limiting factor in the design of a wireless sensor network. This work is a report of the activities carried out during an internship and aims to bring to light the state of the art of the three main design stages of the power subsystem of a sensing network with solar harvesting, aiming to compose an algorithm to serve as a guideline in the design of this subsystem. The aforementioned 3 main design stages are assessment of energy availability, dimensioning of the nominal capacity of batteries and battery management systems.

From the study of bibliography, an algorithm was developed that calculates the minimum storage capacity of the battery bank based on the chosen solar arrangement, the meteorological characteristics of the site under study and the energy demanded by the wireless sensor network. In addition to dimensioning the storage required for the battery bank, the algorithm simulates the behavior of the battery's state of charge over a period of time to the established weather conditions with and without an adaptive battery management system and presents the simulated dynamics of the state of charge in the proposed period by means of graphs.

The algorithm was validated through a "Matlab" simulation based on a theoretical wireless sensor network. For the proposed design data and suggested energy conditions, the system remained stable for the 10 simulated years without the insertion of the adaptive management system based on the battery storage level. After the addition of the adaptive management system, there was an increase of more than 30% of the average performance of the process. Consequently, a 0% duty cycle for 309 days over the 3650 days simulated was observed.

Keywords

Networks, algorithm, sensors, power, battery, energy, management, simulation.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ACRÓNIMOS	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.ENQUADRAMENTO	2
1.2.OBJETIVOS	2
1.3.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. REDE DE SENSORES SEM FIOS	5
2.1.TOPOLOGIA DO SUBSISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIOS COM COLETA AMBIENTAL DE ENERGIA	7
2.2.SUBSISTEMA DE COLETA AMBIENTAL DE ENERGIA	8
2.3.SUBSISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	10
2.4.REDES DE SENSORES SEM FIOS COMO CARGA ELÉTRICA	11
3. ALGORITMO DE DIMENSIONAMENTO DO SUBSISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIOS	13
3.1.CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA	14
3.2.MODELOS ASTRONÔMICOS	16
3.3.BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS E PV_LIB	20
3.4.DIMENSIONAMENTO DE BATERIAS PARA REDES DE SENSORES SEM FIOS	24
3.5.ALGORITMO PROPOSTO	26
4. GESTÃO DE BATERIA PARA SUBSISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO COM COLETA FOTOVOLTAICA	31
5. SIMULAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO	39
6. CONCLUSÃO	47
6.1.TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	51
ANEXO A. ESTUDO ENTRE OS PRINCIPAIS PROGRAMAS DE DIMENSIONAMENTO	57

Índice de Figuras

Figura 1.1: Logomarca EQS.	2
Figura 2.1: Topologia do subsistema de alimentação de uma RSSF.	8
Figura 3.1: Etapas da estimação de disponibilidades energéticas	15
Figura 3.2: Comparação entre o modelo astronômico [19] e o banco de dados PVGIS-CMSAF.	19
Figura 3.3: Estágios do cálculo da disponibilidade energética pelo PV_LIB.	23
Figura 3.4: Comportamento da energia gerada em um sistema fotovoltaico com carga fixa [3].	25
Figura 3.5: Fluxograma do algoritmo de dimensionamento proposto.	26
Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo de dimensionamento de bateria proposto (*).	27
Figura 4.1: Fluxograma do algoritmo de dimensionamento e gestão proposto.	37
Figura 5.1: Disponibilidades energéticas calculadas.	42
Figura 5.2: Comportamento da bateria simulada durante 4 anos com condições meteorológicas iguais às de dimensionamento.	42
Figura 5.3: Comportamento da bateria sem sistema de gestão em 10 anos.	44
Figura 5.4: Comportamento da bateria simulada com sistema de gestão em 10 anos.	44
Figura 5.5: Análise do ciclo de trabalho da RSSF para as condições expostas.	45

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Comparação de performance de algumas técnicas de coleta energética [10]	9
Tabela 3.1: Dados da situação simulada	18
Tabela 3.2: Comparação dos dados de radiação estimados por satélite e medidos em estações meteorológicas	21
Tabela 5.1: Dados de entrada do algoritmo de cálculo das disponibilidades energéticas	39
Tabela 5.2: Dados de entrada do algoritmo de dimensionamento de bateria	41
Tabela 5.3: Dados de entrada do algoritmo de gestão energética	43

Acrónimos

- RSSF – Rede de Sensores Sem Fios
- RSSFs – Redes de Sensores Sem Fios
- DE – Disponibilidades Energéticas
- P_{cc} – Potência Dissipada pelo Controlador de Carga
- P_{rt} – Potência Dissipada pelo Regulador de Tensão
- P_g – Potência Dissipada em Perdas Gerais do Sistema
- P_{on} – Potência que Representa a RSSF Ligada
- P_{off} – Potência que Representa a RSSF Desligada
- E_{PV} – Energia Coletada pelo Painel Fotovoltaico
- B_{nom} – Capacidade Nominal de Armazenamento da Bateria
- u_t – Ciclo de Trabalho da Rede de Sensores sem Fios

1. INTRODUÇÃO

O recente avanço nas tecnologias de sensoriamento e manipulação de informação tiveram um impacto significativo na forma que o ser humano vê o universo. Em meio à era da *BIG DATA*, obter dados precisos está se tornando cada vez mais importante no processo de tomada de decisão nas mais variadas áreas do conhecimento. Nesse contexto, o estudo de técnicas de aquisição de informação nunca foi tão importante, e assim as Redes de Sensores sem Fios (RSSFs) se tornaram alvo de pesquisa para as mais diversas aplicações.

As RSSFs são compostas por um conjunto de sensores e atuadores, que trabalham de forma conjunta com objetivo de monitorar processos e fenômenos, esses componentes são organizados em nós que se comunicam entre si e com uma estação de processamento. Dessa forma, é possível processar, analisar e tomar decisões em função dos dados aferidos. Atualmente, as RSSFs são implementadas com as mais diversas finalidades, que variam desde à área médica, até a avaliação física de estruturas.

Um dos principais limitantes no projeto de uma Rede de Sensores sem Fios (RSSF) é o subsistema de alimentação, responsável por suprir as necessidades energéticas desta. Uma vez que boa parte das aplicações em RSSFs envolve a instalação destas em sítios de difícil acesso, em geral, elas são alimentadas a partir de bancos de baterias. Visto que baterias não recarregáveis diminuem expressivamente o tempo de vida do sistema, trabalhos recentes em RSSFs tem usado tecnologias de coleta ambiental em conjunto a baterias recarregáveis como forma de diminuir os custos de manutenção e aumentar a expectativa de vida útil dos sistemas de sensoriamento.

1.1. ENQUADRAMENTO

A empresa EQS-Serviços De Engenharia, Qualidade e Segurança Ltda atua no domínio da gestão de ativos fixos, desenvolvendo serviços de ensaios, inspeção, certificação, monitorização, consultoria, formação e *outsourcing*. A figura 1 mostra a logomarca da companhia.



Figura 1.1: Logomarca EQS.

Um dos serviços prestados pela empresa é a avaliação de risco de estruturas físicas. Com o objetivo de implementar diversas RSSFs para aferir e processar dados, de forma a verificar constantemente a situação das estruturas em estudo, a empresa requisitou que fosse desenvolvido um algoritmo de dimensionamento e gestão do subsistema de alimentação de uma RSSF alimentada por painéis fotovoltaicos, baseado em literatura existente, objetivando garantir um funcionamento autônomo a longo prazo da rede de sensoriamento.

1.2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver um algoritmo composto das três etapas necessárias para o dimensionamento de um subsistema de alimentação de RSSFs, nomeadamente:

- Avaliação de disponibilidades energéticas (DE).
- Cálculo da capacidade de armazenamento mínimo da bateria.
- Gestão energética através de um algoritmo de controle do estado de carga de bateria.

A avaliação de DE refere-se a parte do algoritmo que tem como finalidade realizar uma estimativa da energia elétrica disponível ao longo do ano para o subsistema de alimentação

em estudo, usando como base as informações meteorológicas e geográficas do sítio de instalação, além das características de coleta de energia elétrica definidas pelo usuário.

O cálculo da capacidade de armazenamento mínimo da bateria é função direta das DE do sítio em estudo e da carga demandada pelo sistema. Esta parte do algoritmo utiliza de alguns critérios de forma a se estimar um valor mínimo de armazenamento de energia elétrica para o banco de baterias de forma que o sistema possa funcionar de maneira contínua e ininterrupta a longo prazo, levando em conta a variabilidade da fonte de coleta.

A gestão energética é um sistema adaptativo que varia o ciclo de trabalho do sistema de forma a alocar melhor os recursos energéticos. Nesse trabalho um modelo da bibliográfica foi utilizado para mostrar as melhorias advindas da implementação de um sistema de gestão adaptativo ao subsistema de alimentação de uma RSSF.

Assim, a partir do estudo do estado da arte, foi proposto um algoritmo que além de projetar a capacidade nominal de armazenamento de energia da bateria para uma RSSF em função do local de instalação desta e o arranjo de painéis solares instalados, simula o comportamento da bateria ao longo do ano, dada as DE, com e sem um sistema de gestão de baterias. O algoritmo foi implementado no software *Matlab* e sua validação foi aferida a partir de simulações.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Esse trabalho é foi estruturado em 6 capítulos. O primeiro é a introdução do trabalho, que tem como objetivo contextualizá-lo, além de expor os objetivos e estruturação do projeto.

O segundo capítulo é uma revisão geral dos principais componentes do subsistema de alimentação de uma RSSF.

O terceiro capítulo mostra o estado da arte em cálculo de DE para sistemas solares e dimensionamento de capacidade de armazenamento para o subsistema de alimentação de uma RSSF além de justificar as decisões tomada na seleção dos modelos selecionados.

O quarto capítulo expõe o estado da arte em gestão de sistemas de baterias para sistemas de coleta fotovoltaica e justifica a adoção do modelo escolhido.

O quinto capítulo é uma simulação do algoritmo proposto para uma RSSF teórica.

E por último, o sexto capítulo é composto pelas conclusões e considerações finais do trabalho apresentado.

2. REDE DE SENSORES SEM FIOS

Sensores são fundamentais para qualquer sistema de controle ou observação, eles são usados desde o momento em que se verifica a necessidade de realizar medições para tomadas de decisões [1]. Com o avanço da eletrônica, a importância dos sensores cresceu e assim seu conceito foi reelaborado. Em uma abordagem geral, sensores são dispositivos que recebem e respondem a um sinal ou estímulo [2]. No âmbito tecnológico, eles são a ligação do mundo físico com o digital [1], pois convertem os fenômenos do mundo real em dados que podem ser facilmente examinados, armazenados e processados.

Os recentes avanços nas tecnologias de semicondutores e de integração em larga escala diminuiram expressivamente o tamanho e preço dos sistemas de sensoriamento [1]. Atualmente, esses dispositivos são empregados em grandes redes, compostas de arranjos (ou nós) de sensores individuais que podem variar sua função de simplesmente medir variáveis fundamentais como umidade, temperatura e pressão atmosférica até aplicações mais complexas como sensoriamento de sistemas audiovisuais [3].

Quando surge a necessidade de enviar as informações aferidas pelos sensores a uma estação de processamento geograficamente distante, a tecnologia *wireless* é largamente empregada.

A junção destas tecnologias resulta nas RSSF, definidas em [1] como sensores que se comunicam não apenas entre si, mas também com uma estação, que processa, analisa, e armazena os dados aferidos da forma que melhor for conveniente para a aplicação.

Os trabalhos envolvendo o aperfeiçoamento das técnicas de RSSF iniciaram a partir da década de 80 [1]. Em 1978 a *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) organizou um *workshop* de redes de sensores distribuídos, onde foram estudados alguns desafios da época, nomeadamente técnicas de processamento de dados e sinais [1]. Hoje, as RSSF já são largamente utilizadas em aplicações comerciais e acadêmicas que vão desde a área médica até previsão meteorológica em locais de difícil acesso. Existem inúmeros trabalhos em diversas áreas do conhecimento que usam RSSFs. Alguns exemplos notáveis são:

1. [4] em que uma RSSF foi implementada com objetivo de monitorar variáveis de relevância agrônômica.
2. [5] em que foi desenvolvido um sistema baseado em RSSF para aferir variáveis físicas industriais e exibir os resultados em *smartwachs*.
3. [6] que usou a mesma tecnologia para propor um sistema de monitoramento de vias de condução de óleo e gás.

Esses, porém, são apenas três exemplos do grande número de trabalhos na área de RSSF.

Mesmo com os avanços nas tecnologias de sensoriamento e técnicas de aquisição e manipulação de sinais, o subsistema de alimentação sempre foi um limitante para as RSSFs [7]. Uma vez que a maior parte desses sistemas são instalados em locais pouco acessíveis, em que não existe disponibilidade de uma rede convencional de energia elétrica, bancos de baterias são usados para suprir a demanda energética dos dispositivos da RSSF [3]. Uma troca constante dos bancos de baterias é inviável financeira e ecologicamente em alguns casos, nesse contexto, as RSSFs com coleta ambiental de energia se tornaram populares [7].

O projeto de uma RSSF pode ser dividido vários subsistemas, desde a estratégia de comunicação e processamento de dados até a disposição dos sensores. Este trabalho se limita a estudar o subsistema de alimentação (coleta e armazenamento de energia) de uma RSSF com coleta ambiental de energia por meio de painéis fotovoltaicos, visando propor um algoritmo para dimensionamento e gestão do subsistema de alimentação que visa o

funcionamento contínuo e ininterrupto da RSSF a longo prazo. A seguir será feita uma breve introdução dos principais componentes deste subsistema.

2.1. TOPOLOGIA DO SUBSISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIOS COM COLETA AMBIENTAL DE ENERGIA

O subsistema de alimentação é parte fundamental do projeto de qualquer sistema elétrico. Um planejamento subdimensionado certamente causará problemas no funcionamento em determinado momento, enquanto um superdimensionado, pode tornar o projeto inteiro inviável, se levado em conta o peso e o preço dos componentes envolvidos.

No âmbito de RSSF, devido a questões como: previsibilidade de carga, baixa potência dos componentes e a possibilidade de instalação destes em sítios afastados, onde não existe integração com a rede convencional de energia elétrica, uma prática comum é a instalação de bancos de baterias para suprir a demanda energética à curto prazo [3]. Conforme foi explanado anteriormente, uma vez que as baterias atuais possuem limites de operação, que se ultrapassados, podem comprometer o tempo de vida do componente e que a troca constante do banco de baterias é inviável financeiramente e ecologicamente em alguns casos, uma estratégia comumente usada nas RSSF para sobrepor essa deficiência é a coleta de energia do ambiente [3]. Assim, com um subsistema baseado em coleta ambiental e armazenamento de energia é possível:

- (I) Estabelecer um funcionamento contínuo e autônomo da RSSF
- (II) Prolongar o tempo de vida dos componentes do sistema.

Levando em conta essas considerações, a topologia do subsistema de alimentação de uma RSSF com coleta ambiental de energia é descrita por [3], conforme mostra a Figura 2.1, onde as setas representam o fluxo de potência dentro do composto.

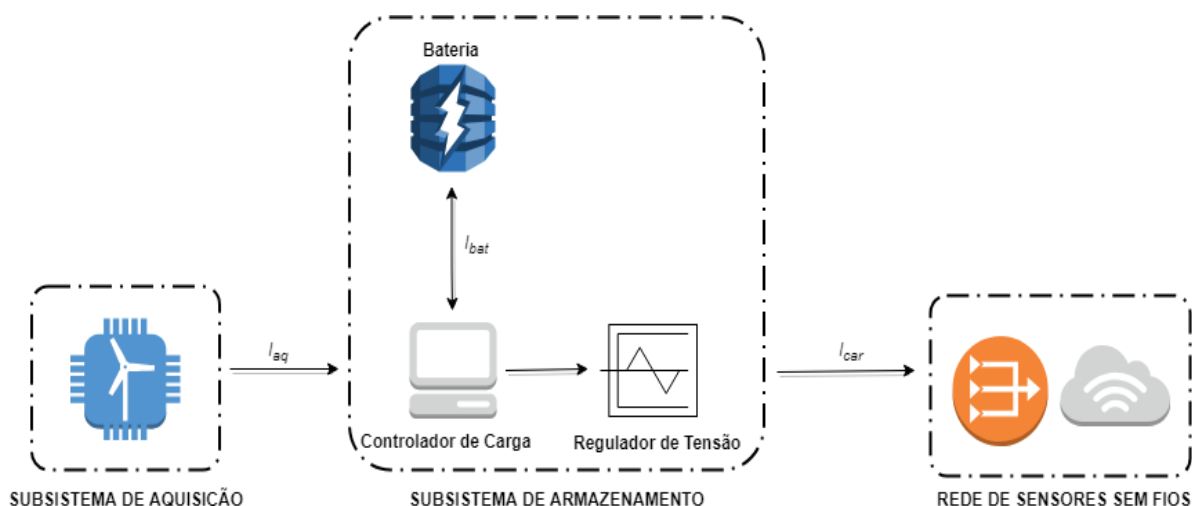


Figura 2.1: Topologia do subsistema de alimentação de uma RSSF.

2.2. SUBSISTEMA DE COLETA AMBIENTAL DE ENERGIA

A primeira questão no projeto de um subsistema de alimentação de uma RSSF com coleta ambiental de energia é a averiguação da disponibilidade energética do sítio de instalação [3]. Assim, um estudo das diversas fontes de coleta ambiental e suas aplicações em RSSF se torna necessário. Existem diversas técnicas de coleta de energia elétrica do ambiente sendo estudadas e desenvolvidas atualmente, a coleta de rádio frequência e a coleta térmica, são alguns exemplos destas. Porém, por questões econômicas, é mais interessante trabalhar com tecnologias em estado de desenvolvimento mais avançado. Em [8] cita-se as tecnologias micro eólica e solar fotovoltaica como fontes de coleta mais adequadas para a variação usual de necessidade energética de uma RSSF.

A coleta micro eólica se baseia na conversão eletromecânica da energia captada pelas pás eólicas em energia elétrica [9]. Apesar desta ser uma das fontes renováveis para geração de energia elétrica mais utilizadas em larga escala, quando se reduzem as economias de escalas das grandes instalações o custo benefício da coleta eólica diminui consideravelmente [10]. Outro indício da não viabilidade de coleta eólica para aplicações em RSSF é que existem poucos exemplos na bibliografia de trabalhos usando esta tecnologia, como exemplo pode-se citar [11], que faz um estudo de viabilidade de implementação de coleta micro eólica para alimentação de uma RSSF instalada em uma ponte.

Em contraponto, a coleta fotovoltaica é baseada na técnica de absorção e conversão de energia solar a partir do comportamento de semicondutores quando são iluminados por fótons [10]. Uma das grandes vantagens desta tecnologia é o comportamento contínuo da

corrente de saída (CC), dessa forma, não há necessidade de retificadores e afins [10]. Em termos financeiros, a coleta fotovoltaica é beneficiada ainda pelo recente amadurecimento da tecnologia, que de forma geral diminuiu os custos dos sistemas solares [12].

A tabela 1 mostra uma comparação entre a área ocupada e a performance média de algumas das técnicas citadas. Nela é possível observar a grande densidade superficial energética da tecnologia fotovoltaica em comparação com as demais técnicas de coleta ambiental de energia.

Tabela 2.1: Comparação de performance de algumas técnicas de coleta energética [10]

Fonte de Energia	Condições	Performance
Solar (fotovoltaica)	Ar livre	7500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Solar (fotovoltaica)	Interior	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Rádio Frequência	WiFi	0.001 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Rádio Frequência	GSM	0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Termoelétrica (<i>Peltier</i>)	$\Delta T = 5^\circ\text{C}$	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Mesmo levando em conta a característica estocástica da coleta fotovoltaica, os trabalhos recentes mostram que a energia solar ainda é a melhor solução para as instalações ao ar livre [3]. As principais justificativas para isso são:

1. O amadurecimento recente da tecnologia fotovoltaica.
2. O custo benefício dos equipamentos envolvidos na instalação.
3. Apesar de ser notoriamente uma fonte estocástica de energia, o sol apresenta ciclos anuais e diários que podem ser estimados com certa precisão [3].

Portanto, para este trabalho será considerado uma RSSF com coleta de energia fotovoltaica.

2.3. SUBSISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

O subsistema de armazenamento da topologia mostrada na Figura 2. é composto por um controlador de carga, um banco de baterias e um regulador de tensão. O controlador de carga, tem como funções principais: (I) regular a taxa de carga e descarga da bateria e (II) manter os níveis de armazenamento dentro das especificações, garantindo a segurança do conjunto e aumentando o tempo de vida útil da bateria [13].

Em coleta energética por meio de painéis fotovoltaicos o controlador de carga na maioria das aplicações vem acompanhado da função de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Esta função força o arranjo de painéis a trabalhar no ponto de tensão e corrente em que há a maior transferência de potência, aumentando assim a eficiência de conversão radiação-elétrica do arranjo [13].

Uma vez que a escolha do controlador de carga e o regulador de tensão são intrinsicamente ligadas aos parâmetros do arranjo de baterias e painéis selecionados para o sistema, este trabalho, apesar de considerar suas ineficiências nos modelos que serão demonstrados posteriormente, não se aprofundará nas tecnologias e demais questões envolvendo estes dispositivos.

No âmbito da escolha do arranjo de baterias, existem duas abordagens [14]:

1. Baterias recarregáveis
2. Baterias não recarregáveis.

Embora baterias não recarregáveis tenham algumas vantagens na eficiência de descarga e perda diária de carga [14] e sejam úteis para aplicação em RSSFs que tem tempo de vida pré-definidos [1] elas serão desconsideradas neste trabalho, uma vez que objetiva-se propor uma metodologia de dimensionamento de subsistemas de alimentação que garanta o funcionamento contínuo e ininterrupto de uma RSSF, o que intrinsecamente envolve um arranjo de baterias recarregáveis.

Entre as tecnologias de baterias recarregáveis existem diversas opções. Na bibliográfica podemos encontrar exemplos como [3] que optou por uma bateria de tecnologia AGM (*Absorbent Glass Mat*) recarregável, [15] em que foi implementado um arranjo composto por duas baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH) recarregáveis e [16] onde apenas uma

bateria de Li-SOCL₂ (*Primary cells Lithium Thionyl Chloride*) recarregável foi suficiente para a demanda energética, dentre outros.

Embora este trabalho limita-se em estudar a capacidade nominal de armazenamento de baterias, negligenciando até certo ponto, a tecnologia da mesma, é sabido que existem diversos outros fatores que devem ser levados em consideração na escolha da tecnologia de armazenamento adotada, [14] lista as principais:

1. Tensão máxima permissível no início da descarga.
2. Tensão normal no processo de descarga.
3. Tensão mínima de operação.
4. Características da corrente na carga e descarga.
5. Tempo de vida.
6. Características do ambiente que a bateria será armazenada.
7. Restrições de tamanho.
8. Requerimentos especiais.

A escolha do tipo de bateria é um dos tópicos mais sensíveis no dimensionamento de um subsistema de alimentação para uma RSSF [1]. A partir da análise da literatura, pode-se concluir que ainda não existe uma concordância absoluta em qual a melhor tecnologia para aplicação em sistemas de sensoriamento remoto. Sendo assim, embora a análise da bibliografia possa garantir uma boa direção na escolha da tecnologia a ser implementada, a seleção do melhor arranjo de baterias ainda depende principalmente da experiência do projetista.

2.4. REDES DE SENSORES SEM FIOS COMO CARGA ELÉTRICA

Uma RSSF é formada por um grande número de nós de sensoriamento. Em [17] define-se que cada um desses nós é composto por quatro subsistemas, nomeadamente: subsistema computacional, subsistema de comunicação, subsistema de sensoriamento e subsistema de fonte de energia (alimentação). O dimensionamento do subsistema de alimentação é intrinsecamente dependente das potências dos demais subsistemas e uma vez que este é o

subsistema mais crítico da RSSF [17], na maioria dos projetos é preciso realizar medições para estimar as necessidades energéticas reais dos componentes.

Em RSSFs não homogêneas, os nós de sensoriamento não têm a mesma capacidade computacional [17], e conseqüentemente, dependendo do tamanho desta discrepância, podem existir variações na demanda energética de cada nó. Assim, uma abordagem interessante para estimar o consumo energético da RSSF em estudo é realizar medições que visem aferir a demanda individual de cada nó, em função do ciclo de trabalho de projeto, e assim dimensionar o subsistema de alimentação de acordo com a potência demandada por estes nós.

A potência demandada por uma RSSF pode ser modelada em cinco componentes, sendo estes: (I) a potência dissipada pelo controlador de carga (**Pcc**), (II) a potência dissipada pelo regulador de tensão (**Prt**), (III) a potência dissipada em perdas gerais do sistema (**Pg**), (IV) a potência que representa a RSSF ligada (**Pon**) e (V) a potência que representa a RSSF desligada (**Poff**) [3]. A soma desses elementos corrigidos pelo ciclo de trabalho da RSSF e multiplicados pelo período temporal em que as potências são demandadas resulta na demanda energética para o período em estudo [3]. No capítulo 3, o modelo utilizado para simular o comportamento da RSSF do ponto de vista de carga será melhor detalhado.

A partir do entendimento básico dos componentes do subsistema de alimentação de uma RSSF, no capítulo 3 será feita uma análise da bibliografia disponível no âmbito do dimensionamento de subsistemas de alimentação para RSSFs e em seguida, baseado na literatura, um algoritmo será proposto para estimar a capacidade mínima de armazenamento da bateria, visando o funcionamento ininterrupto a longo prazo de uma RSSF alimentada por painéis fotovoltaicos.

3. ALGORITMO DE DIMENSIONAMENTO DO SUBSISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIOS

Neste capítulo serão desenvolvidas as etapas do processo de construção do algoritmo de dimensionamento de capacidade nominal de bateria de uma RSSF genérica com coleta ambiental por meio de painéis fotovoltaicos. O algoritmo aqui apresentado é dividido em duas etapas: (I) Cálculo das DE e (II) Dimensionamento da capacidade nominal mínima de armazenamento da bateria. Dessa forma, será feito um estudo do estado da arte de ambas as etapas para justificar as decisões tomadas no processo de construção do algoritmo.

3.1. CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA

Como já citado anteriormente, atualmente a tecnologia fotovoltaica apresenta o melhor custo benefício para aplicações em RSSFs [10]. Porém, o comportamento estocástico da radiação solar é uma dificuldade na estimação das DE do sítio em estudo. Dessa forma, encontrar o ponto ideal entre o superdimensionamento e o subdimensionamento do subsistema de armazenado pode ser uma tarefa árdua.

Contudo, embora a radiação solar apresente um comportamento de difícil previsão a curto prazo, o sol apresenta ciclos anuais e diários bem estabelecidos [18], que influenciam diretamente na incidência de radiação na superfície terrestre. Assim, dependendo do modelo adotado, é possível fazer uma estimativa relativamente precisa das DE para cada período do ano.

Um dos trabalhos mais recentes na área de previsão meteorológica para aplicação em previsibilidade energética, [19] faz uma revisão bibliográfica de estudos recentes na área e compara os resultados a partir da precisão obtida por testes estatísticos. Embora existam modelos sofisticados, baseados principalmente em lógica *fuzzy* e máquinas de aprendizado que obtiveram resultados satisfatórios (precisão de até 95% para as condições estipuladas) na previsão de radiação com resoluções de uma hora (previsão à médio prazo), estes modelos não estão disponíveis para uso público o que torna inviável a implementação deles no algoritmo de dimensionamento proposto.

Embora previsões de curto prazo sejam interessantes para gestão de energia, no quesito de dimensionamento do subsistema de armazenamento, onde a representatividade a longo prazo dos dados é mais importante que precisão a curto prazo, existem duas abordagens comumente propostas:

- (I) Utilização de banco de dados constituídos por meio de análise de satélites ou medições locais históricas.
- (II) Utilização de modelos matemáticos baseados na posição do sol para estimar a incidência de radiação [3].

Além dos dados meteorológicos de estimação da incidência de radiação, outra escolha necessária para o subsistema de cálculo das disponibilidades energética é o modelo que converte os dados de radiação solar em energia elétrica, a partir das características do arranjo

solar. Existem desde os aproximados, que usam apenas variáveis de eficiência simplificadas para representar as perdas gerais do circuito, até os extremamente sofisticados que levam em conta as características químicas do painel solar, dentre outros parâmetros físicos e elétricos.

Entre os modelos estudados, alguns usam como entrada apenas a radiação global horizontal incidente, já outros usam a decomposição em radiação normal direta e radiação difusa horizontal para obter melhores resultados. Dessa forma, além de obter modelos precisos, deve existir um acoplamento entre os dados de entrada do banco de dados meteorológico e o sistema de conversão. O modelo de conversão escolhido deve então: (I) ter disponibilidade, (II) ser preciso cientificamente e (III) apresentar compatibilidade com os dados de entrada disponíveis.

A figura 3.1 exemplifica o que foi exposto, mostrando as duas etapas principais do cálculo da disponibilidade energética de um sistema estocástico de coleta energética.

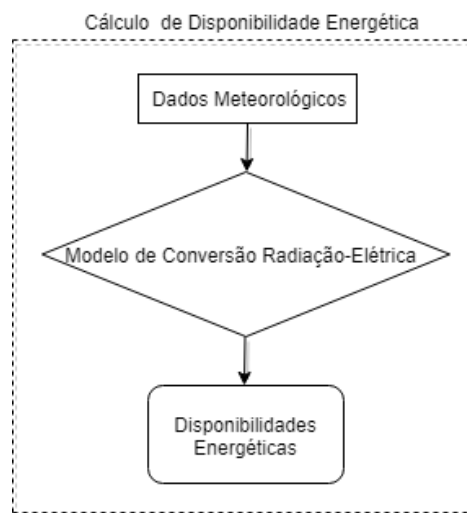


Figura 3.1: Etapas da estimação de disponibilidades energéticas.

Na bibliografia existem duas abordagens frequentemente utilizadas para converter a radiação solar incidente em energia elétrica disponível, sendo estas: (I) Uso de softwares de cálculo de energia elétrica em painéis fotovoltaicos e (II) Uso de equações simplificadas.

Em respeito a (I), o anexo A é composto por um estudo realizado junto a empresa EQS-Serviços De Engenharia, Qualidade e Segurança Ltda e traz uma análise comparativa dos principais *softwares open source* de estimação de energia para painéis fotovoltaicos. A seguir será feita uma descrição detalhada da metodologia de cálculo de DE, baseada na

biblioteca de funções matemáticas para cálculo de potências fotovoltaicos *PV_LIB*, selecionado no anexo A como opção mais viável para implementação neste trabalho.

Em relação a (II), pode-se citar o exemplo de [3], que usou a Equação 1 para determinar a disponibilidade energética diária.

$$E_{PV} = A_{PV} \cdot n_{cc} \cdot n_{PV} \cdot \sum_{t=0hr}^{t=23hr} \min(1hr * P_{PV}, E_{astro}(t)) \quad (1)$$

Onde:

- E_{PV} é a energia coletada no dia ($W \cdot h$).
- A_{PV} é a área do painel solar (m^2).
- n_{cc} e n_{PV} são as eficiências do controlador de cargas e do painel respectivamente
- E_{astro} é a energia solar incidente no painel fotovoltaico em ($W \cdot m^{-2}$), obtida pelo modelo matemático definido em [20].

O termo $\min(\cdot)$ da equação é usado para os momentos em que os valores de radiação solar ultrapassam a potência nominal do arranjo de painéis. A seguir, o modelo matemático astronômico de [20], para cálculo de incidência de radiação em uma superfície, o algoritmo de dimensionamento *PV_LIB* e alguns bancos de dados meteorológicos serão detalhados com mais cautela, afim de justificar as decisões de tomadas no projeto.

3.2. MODELOS ASTRONÔMICOS

Apesar de apresentar uma característica estocástica, a radiação solar incidente em uma região depende intrinsecamente da posição do sol em relação a terra [20] e como já foi dito, o sol tem ciclos diurnos e anuais bem estabelecidos e estudados. Baseando-se nessa característica cíclica do sol e nas propriedades da radiação emitida por ele, os modelos astronômicos estimam a incidência de radiação solar em uma localidade utilizando como entradas a localização geográfica e alguns outros parâmetros que serão explanados posteriormente [20].

A principal vantagem da utilização de modelos astronômicos para cálculo de disponibilidade energética em um sistema de coleta fotovoltaica é a independência de fontes externas para a obtenção de dados de radiação e uma vez que o algoritmo pode ser implementado em

sistemas desconectados à internet, a disponibilidade dos dados também se torna um ponto forte da metodologia.

Na bibliográfica existem diversos modelos astronômicos para o cálculo da incidência solar em uma determinada região, alguns exemplos podem ser encontrados em: [21] e [22]. Esses modelos, mesmo sendo relativamente mais precisos, apresentam difícil implementação e consomem muita capacidade computacional [20]. Ainda que seja antigo (1975), o modelo proposto em [20] é utilizado até hoje em diversos trabalhos para a estimação da disponibilidade energética em sistemas fotovoltaicos, principalmente por sua disponibilidade e facilidade de implementação, exemplos desses podem ser encontrados em: [23] e [24].

O modelo apresentado em [20] usa seis parâmetros de entrada para determinar a radiação incidente em uma superfície inclinada, sendo estes: (I) Latitude do local, (II) Inclinação angular do painel, (III) Ângulo azimutal do painel em relação ao norte, (IV) *Sky parameter* (k), (V) *Lambert reflectivity of the ground* (R) e (VI) *normal optical thickness of the atmosphere* (τ), além do dia e hora do ano do qual deseja-se estimar a radiação incidente. O modelo dimensiona a energia incidente na região como a soma de três componentes, sendo eles:

$$E_{sun} = I_o(n) \cdot \cos(\Theta) \cdot e^{-\tau \cdot \sec(\theta_s)} \quad (2)$$

$$E_{sky} = k \cdot I_o(n) \cdot \cos(\theta_s) \cdot [1 - e^{-\tau \cdot \sec(\theta_s)}] \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(\theta_p)) \quad (3)$$

$$E_{ground} = R \cdot I_o(n) \cdot \cos(\theta_s) \cdot [k + (k - 1) \cdot e^{-\tau \cdot \sec(\theta_s)}] \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(\theta_p)) \quad (4)$$

Onde:

- E_{sun} , E_{sky} e E_{ground} são as componentes direta, difusa e refletiva da radiação solar incidente, respectivamente ($W \cdot m^{-2}$).
- I_o é a intensidade da radiação solar na atmosfera ($W \cdot m^{-2}$).
- k , R e τ são as constantes descritas acima.
- Θ , θ_s e θ_p são os ângulos de relação entre a posição do sol e a inclinação e orientação do arranjo fotovoltaico (rad).

Para mais detalhes na sobre as variáveis do modelo, recomenda-se um estudo de [20].

Após implementação do modelo de [20] no *software Matlab*, alguns testes foram feitos para estimar sua precisão. De imediato, notou-se que devido à função secante presente nas Equações 2, 3 e 4, alguns valores de θ_s resultam em valores de radiação incidente muito elevados, tanto positivos quanto negativos (tendendo ao infinito). Em [3], essa discrepância foi corrigida com a função $\min(\cdot)$, que limita os valores de saída à capacidade máxima do painel solar. Apesar desta ser uma abordagem válida em sistema de baixa potência, em processos de potências elevadas, podem existir discrepâncias altas entre os valores reais e os calculados pelo modelo.

A tabela 3.1 mostra os dados de entrada de uma simulação realizada com o objetivo de comparar os resultados da radiação total obtida a partir do modelo astronômico [20] e os valores do banco de dados PVGIS-CMSAF (que será detalhado mais a frente) para o ano de 2016, o resultado se encontra na figura 3.2.

Tabela 3.1: Dados da situação simulada

Local	ISEP
Latitude	41,17°
Longitude	-8,60°
Inclinação	35,00°
Orientação	0,00°
τ	0,10
k	0,10
R	0,10

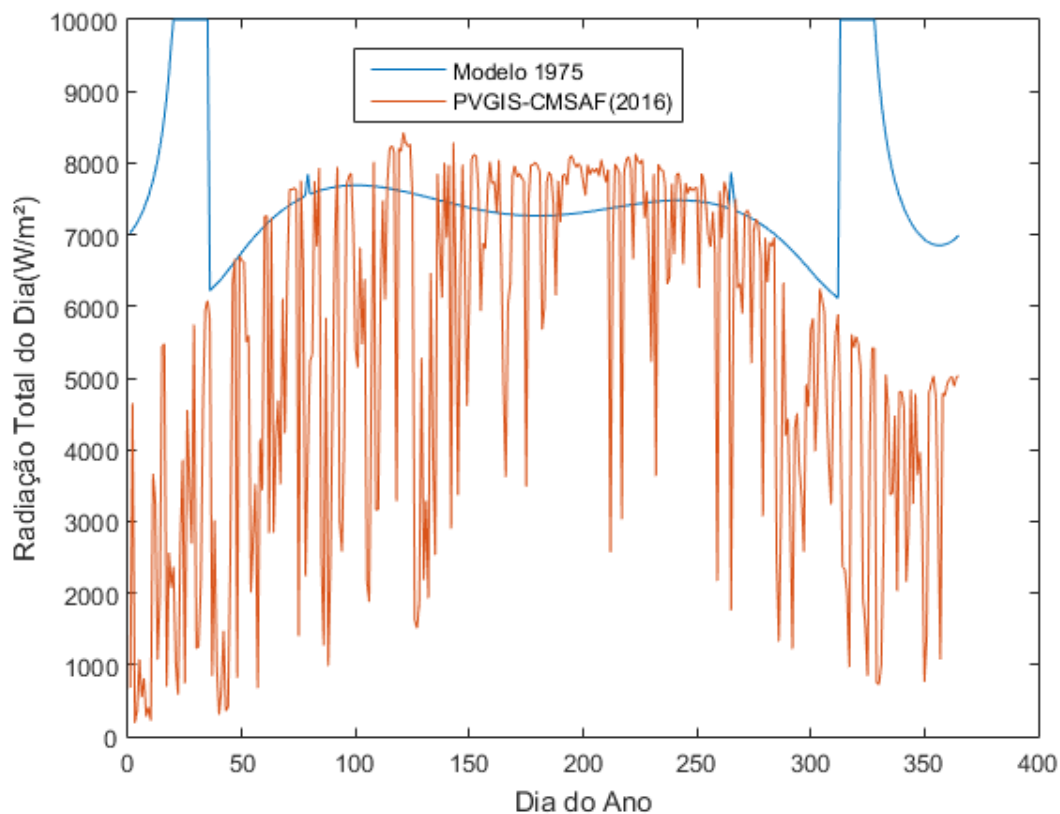


Figura 3.2: Comparação entre o modelo astronômico [20] e o banco de dados PVGIS-CMSAF.

Como foi citado anteriormente, para alguns dias as equações do modelo [20] apresentam como saída valores absurdamente altos, na faixa dos bilhões de $w \cdot m^{-2}$. Sendo assim, com o objetivo de enriquecer a comparação, esses valores foram limitados a $10.000 w \cdot m^{-2}$. Conforme mostrado na Figura 3.2.

Embora os valores de R , k e τ tenham sido escolhidos arbitrariamente, mesmo que as diversas simulações realizadas tenham mostrado que essas constantes influenciam muito pouco na soma diária da radiação disponível ao longo do ano, pela Figura 3.2 é possível notar que a saída do modelo de [20] apresenta um comportamento bem simplista para a radiação solar incidente durante o ano. O próprio autor de [20] reconhece esse fato quando cita que o modelo proposto é apenas uma aproximação bruta do comportamento real da radiação incidente e foi apresentado com o objetivo de mostrar o potencial da modelagem da radiação do ponto de vista atmosférico para estudos em energia solar.

Mesmo levando em conta as considerações feitas sobre o modelo proposto por [20], o mesmo ainda apresenta uma boa base para o comportamento da radiação solar, se levado em

consideração o ano em que foi publicado, a facilidade de implementação e o baixo custo computacional envolvido no processo e por isso, até hoje trabalhos utilizam versões modificadas deste modelo para calcular as DE de sistemas com coleta ambiental fotovoltaica.

Os trabalhos que utilizam o método apresentado em [20] para determinar as DE de um subsistema de alimentação em geral usam a Equação 1 ou similar, para determinar a energia elétrica gerada pelo arranjo fotovoltaico no dia. Essa abordagem apesar de conter diversas simplificações, obteve bons resultados em [3] (com uma versão modificada de [20]). No próximo capítulo será mostrado uma segunda abordagem para o cálculo das DE do subsistema de alimentação baseado em coleta energética.

3.3. BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS E PV_LIB

Uma alternativa ao uso de modelos astronômicos para o cálculo da radiação solar incidida sobre uma região e sucessivamente a disponibilidade solar energética desta é a utilização de um banco de dados de radiação solar junto à um *software* que calcula a energia elétrica produzida por essa radiação. O *software* é recomendado em casos onde se pretende utilizar banco de dados como entradas, uma vez que a radiação obtida por estes é decomposta em três componentes: (I) *Global horizontal irradiance*, (II) *Direct (beam) normal Irradiance*, e (III) *Diffuse horizontal irradiance*. Assim, é necessário um processamento mais meticuloso desses dados.

Existem diversos bancos de dados de radiação solar disponíveis na internet, tanto pagas quanto gratuitas. Esses dados podem ser obtidos a partir de estações meteorológicas, ou estimados a partir de algoritmos astronômicos baseados em informações de satélites. Dentre as versões gratuitas, o banco de dados do *photovoltaic geographical information system* (PVGIS) [25] foi a fonte mais fiável encontrada para propósitos acadêmicos. O PVGIS é um projeto com foco na pesquisa acadêmica e disseminação de recursos solares que está sendo desenvolvido a mais de 10 anos no *European Commission Joint Research Centre* (Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia) com sítio em Ispra, Itália.

No próprio site do PVGIS é possível encontrar uma tabela de validação dos dados meteorológicos baseadas em quatro trabalhos acadêmicos diferentes, sendo estes: [26], [27], [28] e [29]. O método de validação usado foi a comparação dos bancos de dados do PVGIS com dados de radiação aferidos em estações meteorológicas ao redor do mundo.

A tabela 3.2 é um resumo do esquema original disponível em [25] e é composta apenas das linhas de maior e menor diferença absoluta entre os dados medidos e estimado pelo algoritmo do PVGIS-CMSAF.

Tabela 3.2: Comparação dos dados de radiação estimados por satélite e medidos em estações meteorológicas em um período de um ano

Localidade	Latitude	Longitude	Diferença entre os dados estimados e medidos
Madrid (ES)	40.45N	3.72W	-0.3%
Sonnblick (AT)	47.05N	12.95E	-14.0%

Embora a radiação aferida em Sonnblick tenha variado significativamente dos modelos do PVGIS, em geral as variações rodam os valores de 2% a 5% para as demais localidades. Em [29], o autor conclui o trabalho comentando que, embora a variação das radiações medidas e estimadas tenham sido relativamente pequenas para maioria dos casos, o modelo não prevê um tratamento especial para regiões em que existe muita ocorrência de neve. Isso pode ter sido uma causa para o erro relativamente alto dos valores processados para esta região.

Neste trabalho, o PVGIS será usado como fonte de dados de radiação devido sua alta disponibilidade. Porém, o banco de dados de entrada para o modelo de cálculo de disponibilidade energética é escolha do projetista e pode variar de acordo com a aplicação ou região de interesse. A seguir serão feitas algumas considerações sobre a biblioteca de livre acesso de cálculo de energia solar do *Sandia National Laboratories*, o PV_LIB (*photovoltaic library*).

O PV_LIB é uma biblioteca para cálculo de potenciais elétricos em sistemas solares do *Sandia National Laboratories* disponível em *open source* em [30]. Ela é composta por um conjunto de funções que objetivam o cálculo de energia elétrica gerada por sistemas solares. Com um arranjo correto dessas funções é possível obter a disponibilidade energética dado as condições meteorológicas do sítio em estudo.

Além da pesquisa comparativa realizada no anexo A, existem outros trabalhos acadêmicos que validam o modelo do PV_LIB academicamente, um exemplos desses é [31] em que foi feita uma comparação entre os *softwares* de dimensionamento PVSyst, NREL, SAM e PV_LIB. Embora tenha se observado uma divergência de -5,07% entre os valores

verificados e estimados pelo PV_LIB, o autor concluí o trabalho reconhecendo a fiabilidade do PV_LIB e elogiando sua versatilidade e disponibilidade. É também possível argumentar que uma abordagem mais conservadora em relação à disponibilidade energética é vantajosa para o projeto, se levado em conta a característica estocástica da radiação solar.

A seguir as funções usadas e uma breve descrição destas serão expostas. Para mais detalhes a respeito do PV_LIB recomenda-se a leitura da documentação completa em [30].

- *pvl_sapmmoduledb*

Seleção do painel fotovoltaico do banco de dados de painéis *SandiaModuleDatabase*.

- *pvl_readtmy3*

Leitura e processamento do arquivo TMY (dados de radiação).

- *pvl_maketimestruct*

Construção de uma estrutura temporal (anual) para os dados meteorológicos.

- *pvl_makelocationstruct*

Construção de uma estrutura de localização de instalação do arranjo de painéis, baseados na altitude, longitude e altitude dados.

- *pvl_ephemeris*

Calculo da posição do sol baseado nas informações de localização e estrutura temporal.

- *pvl_absoluteairmass*

Calculo da massa de ar absoluta na localização informada.

- *pvl_isotropicsky*

Cálculo da radiação difusa que incide no arranjo fotovoltaico a partir do modelo de Hottel e Woertz's [32].

- *pvl_grounddiffuse*

Cálculo da radiação refletida que incide no arranjo fotovoltaico baseado no modelo de Loutzenhiser [33].

- *pvl_sapmcelltemp*

Cálculo da temperatura do arranjo fotovoltaico baseado na radiação solar, velocidade do vento e temperatura ambiente, baseado no modelo contido em [34].

- *pvl_sapm*

Cálculo da curva I-V (Corrente-tensão) do arranjo fotovoltaico com base nas informações anteriores, estimando assim a potência de saída. Baseado no modelo contido em [34]. Este modelo do PV_LIB simula um subsistema que contenha um controlador de carga com função MPPT.

Usando as funções expostas acima e algumas equações elementares, o algoritmo implementado para estimar as DE do sítio em estudo é dividido nas seis etapas mostradas na Figura 3.3.

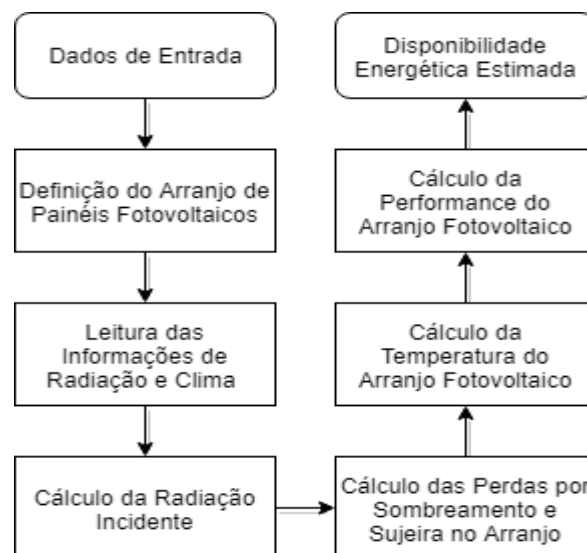


Figura 3.3: Estágios do cálculo da disponibilidade energética pelo PV_LIB.

Os dados de entrada do modelo serão detalhados mais à frente. A partir do estudo feito sobre as técnicas de análise da disponibilidade energética, em seguida serão estabelecidos alguns

critérios para o dimensionamento de baterias em subsistemas de armazenamento para RSSFs.

3.4. DIMENSIONAMENTO DE BATERIAS PARA REDES DE SENSORES SEM FIOS

Embora existam diversos artigos que mostram o desenvolvimento de projetos de RSSF com coleta energética, poucos trabalhos propõem uma metodologia sistemática para o dimensionamento do arranjo de baterias destes [3]. Os trabalhos atuais estão mais focados em estratégias para atenuar os efeitos de projetos subdimensionados, a partir de algoritmos de previsão meteorológica e gestão de baterias [3]. Aqui serão expostos três exemplos de metodologias para o dimensionamento da capacidade nominal da bateria para uma RSSF.

Em [23], o autor descreve o processo de projeto completo de um subsistema de alimentação para uma RSSF baseada em coleta solar. Para o cálculo das DE, ele usa o modelo astronômico de [20], já citado anteriormente. Ainda em [23], são feitas duas suposições em relação ao subsistema de alimentação: (I) O painel solar foi dimensionado para que em apenas 30 minutos de coleta solar diária, se tenha absorvido a energia equivalente a demanda energética do dia, e (II) A bateria foi projetada de forma que fosse possível suprir a demanda energética do sistema por 30 dias seguidos sem recarga. Essas suposições são deveras pessimistas, o que acaba causando o superdimensionamento do subsistema de alimentação.

Em [35], o autor não cita os critérios usados para dimensionar o arranjo solar. Porém, é citado que o banco de baterias foi escolhido de forma a suprir a demanda energética por três dias seguidos sem recarga. As abordagens de dimensionamento aplicadas em [35] e [23] são simplistas e se baseiam em suposições que nem sempre são verdadeiras.

Um tratamento mais sistemático é encontrado em [3]. Objetivando a operação ininterrupta do sistema a longo prazo, o autor propõe duas condições para o sistema de alimentação de uma RSSF: (I) A bateria deve armazenar energia suficiente para suprir a demanda energética nos dias em que a energia coletada é menor que o consumo da carga e (II) O sistema de coleta energética deve produzir energia suficiente para carregar a bateria nos dias em que a energia gerada é maior que a consumida. Essas condições são melhores explicadas pela Figura 3.4.

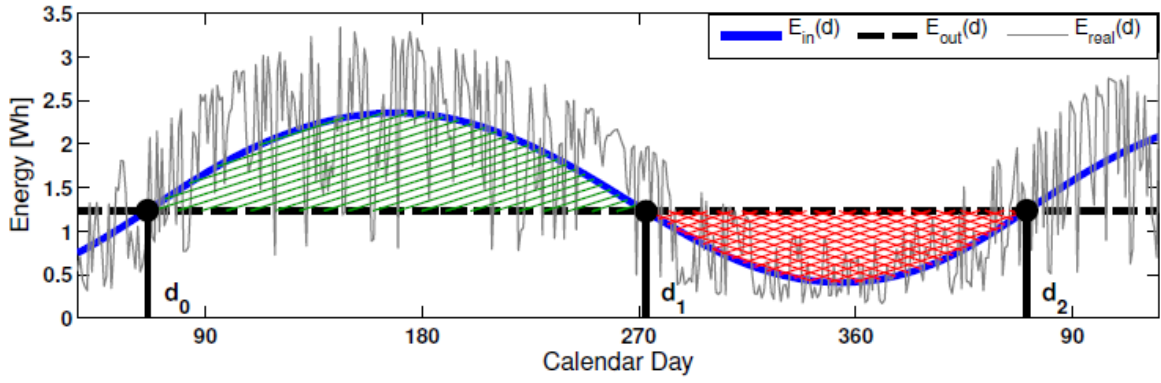


Figura 3.4: Comportamento da energia gerada em um sistema fotovoltaico com carga fixa [3].

A área vermelha, entre os dias d_1 e d_2 representa a região de déficit energético e consequentemente a quantidade mínima de capacidade nominal de armazenamento da bateria proposta por [3]. Isso pode ser descrito com a Equação 5.

$$\sum_{d_1}^{d_2} (E_{saída}(d) - E_{coleta}(d)) \leq Bnom \quad (5)$$

Onde:

- $E_{saída}$ e E_{coleta} são as energias demandada pela RSSF e coletada a partir do arranjo solar, respectivamente ($W \cdot h$).
- $Bnom$ é capacidade de armazenamento de energia do banco de baterias ($W \cdot h$).

A área verde do gráfico, entre os d_0 e d_1 representa a região de superávit energético. Para o funcionamento ininterrupto a longo prazo, o sistema de coleta deve ser capaz de carregar a bateria nesse período. Assim como mostrado na Equação 6.

$$\sum_{d_0}^{d_1} (E_{coleta}(d) - E_{saída}(d)) \geq Bnom \quad (6)$$

Por consequência dessas condições, em um ano período de superávit energético deve gerar uma quantidade maior de energia elétrica que o período de déficit energético. Assim, a bateria nominal estipulada por [3], objetivando a operação contínua a longo prazo, deve cumprir a Equação 7.

$$\sum_{d_0}^{d_1} (E_{coleta}(d) - E_{saída}(d)) \geq Bnom \leq \sum_{d_1}^{d_2} (E_{saída}(d) - E_{coleta}(d)) \quad (7)$$

Usando essa abordagem junto a um sistema de gestão energética que será discutido no capítulo 4, [3] comenta que a partir simulações com período temporal de 10 anos, foi possível concluir que esta metodologia ultrapassou o estado da arte em disponibilidade e redução do tamanho da capacidade nominal de armazenamento para o banco de baterias.

Uma vez que as estratégias disponíveis para o dimensionamento do subsistema de armazenamento foram expostas, o próximo passo é apresentar o algoritmo proposto e justificar as decisões tomadas para sua implementação, como consta a seguir.

3.5. ALGORITMO PROPOSTO

O seguinte algoritmo foi construído com base na bibliografia disponível e tem como objetivo calcular o valor mínimo da capacidade de armazenamento do arranjo de baterias de forma a garantir o funcionamento ininterrupto à longo prazo de uma RSSF com coleta fotovoltaica, tendo como entradas: (I) O arranjo fotovoltaico, (II) Informações sobre a carga e (III) A radiação típica incidente sobre a região em estudo. O algoritmo é dividido em duas etapas: (I) Cálculo das DE e (II) Dimensionamento da capacidade nominal mínima do banco de baterias. A figura 3.5 ilustra esse processo.

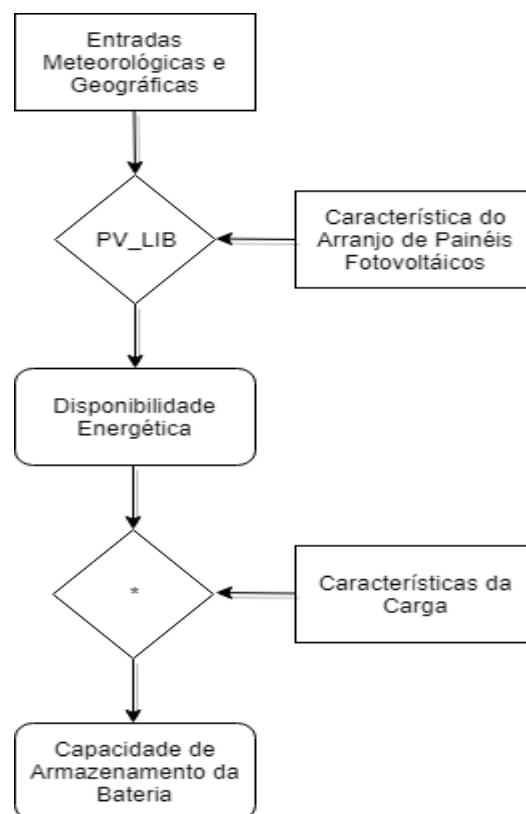


Figura 3.5: Fluxograma do algoritmo de dimensionamento proposto.

A metodologia adotada para o cálculo das DE foi: (I) Uso do banco de dados do PVGIS para obtenção do arquivo TMY (*typical meteorological year*) e (II) Uso do *software* PV_LIB para converter esses dados na estimação da energia elétrica coletada. Mais detalhes sobre o arquivo TMY estão disponíveis no anexo A. O código implementado pelo PV_LIB já foi detalhado anteriormente, e uma análise mais meticulosa dos dados de entradas do algoritmo será exposta posteriormente.

O asterisco (*) na figura 3.5, representa o modelo de cálculo da capacidade mínima de armazenamento do banco de baterias levando em consideração a entrada de energia por meio da coleta solar e a energia demandada pela carga. Ele é composto por uma versão modificada da metodologia apresentada em [3]. O fluxograma mostrado na Figura 3.6 é um resumo do funcionamento desta etapa do algoritmo.

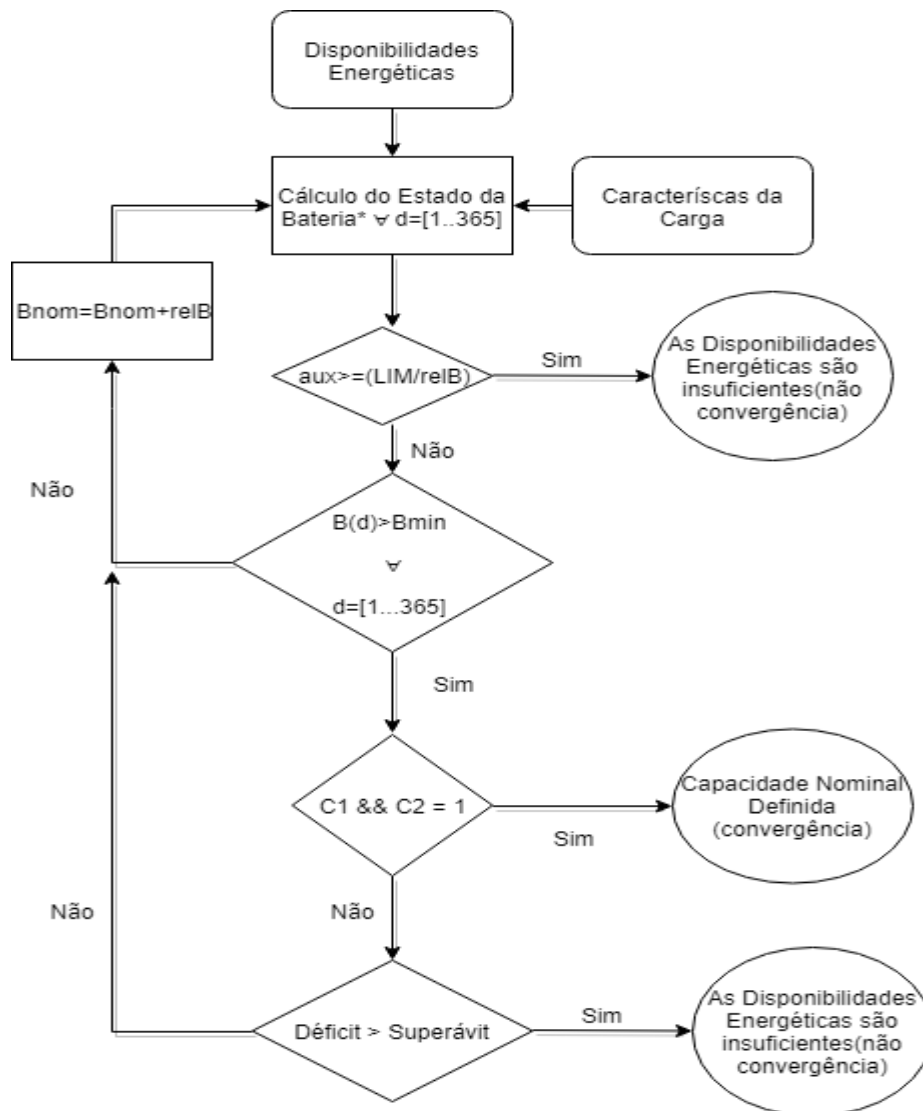


Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo de dimensionamento de bateria proposto (*).

O algoritmo é baseado no fluxo energético entre os subsistemas do subsistema de alimentação. O bloco de cálculo do estado da bateria é composto por quatro equações, sendo três semelhantes ao modelo apresentado em [3] e uma diferente. A seguir serão descritas as equações usadas no processo iterativo implementado para o cálculo do estado da bateria levando em consideração a energia coletada estimada pelo algoritmo de disponibilidade energética e a carga demandada pela RSSF.

$$E_{carga}(d) = 24 \cdot [P_{cc} + P_{rt} + P_g + \sum_i^M (DC_i \cdot P_{on_i} + (1 - DC_i) \cdot P_{off_i})] \quad (8)$$

$$E_{saída}(d) = \frac{E_{carga}(d)}{N_{saída}} + E_{vaz} \quad (9)$$

$$E_{coleta}(d) = \min(N_{entrada} \cdot E_{PV_{LIB}}(d), B_{nom} * N_{saída} + E_{saída}(d)) \quad (10)$$

$$B(d) = \min(N_{saída} \cdot B_{nom}, B(d - 1) + E_{coleta}(d) - E_{saída}(d)) \quad (11)$$

Esse modelo considera que toda a energia coletada pelo arranjo solar é armazenada na bateria antes de ser usada para suprir as necessidades energéticas da RSSF.

A Equação 8 refere-se ao dimensionamento da RSSF do ponto de vista de carga, nela:

- E_{carga} representa a energia demandada pela RSSF.
- P_{cc} é a potência dissipada pelo controlador de carga.
- P_{rt} é a potência dissipada pelo regulador de tensão.
- P_g é a potência de perdas gerais do subsistema.
- P_{on} e P_{off} os consumos de carga dos componentes ligados e desligados respectivamente.
- DC ou duty cycle (ciclo de trabalho) de operação do nó.
- M o número de nós da RSSF.

O dimensionamento de carga para RSSFs proposto por [3], prevê situações em que existem nós com demandas energéticas diferentes, em redes não homogêneas.

Na Equação 9:

- $E_{saída}$ representa a energia efetiva que sai da bateria.
- $N_{saída}$ é a eficiência de descarga da bateria.
- E_{vaz} é a perda diária de carga da bateria, considerada constante nesse modelo.

A Equação 10 teve que ser modificada em relação ao modelo de [3], uma vez que a partir de simulação concluiu-se que houve algum erro de digitação no trabalho original, já que o valor da energia coletada matematicamente estava fadado a resultar em valores negativos ou zero. Uma vez que não foi encontrado uma retratação pelo autor.

A Equação 10 foi desenvolvida baseando-se na teoria descrita por [3], nela:

- E_{coleta} representa a energia efetiva de entrada na bateria.
- $N_{entrada}$ a eficiência de carga da bateria.
- B_{nom} a capacidade de armazenamento de energia do arranjo de baterias.

Por fim, na Equação 11, B é a variável usada para estimar o estado da bateria durante todos os dias do ano.

Na Equação 10, o termo $\min(\cdot)$ é utilizado para limitar a quantidade de energia absorvida pela bateria se a mesma estiver cheia. Igualmente, na Equação 11 o $\min(\cdot)$ tem como objetivo de limitar o valor da variável de estado da bateria a capacidade máxima de armazenamento da mesma.

Conforme é mostrado na Figura 3.6, o algoritmo é um processo iterativo, em que B_{nom} é acrescido à cada iteração, até que as condições propostas em [3], descritas aqui pelas Equações 5(C1) e 6(C2), sejam cumpridas. No algoritmo, a variável aux é usada para limitar o número de iterações, caso o programa entre em um loop infinito, onde LIM é uma entrada definido pelo usuário para determinar o número máximo de iterações. Caso seja observado que a energia disponível nos dias de superávit energético é menor que a demandada nos períodos de déficit, o algoritmo conclui que as DE são insuficientes para manter uma operação contínua a longo prazo da RSSF, logo é necessário aumentar a potência do arranjo solar ou diminuir as necessidades de carga.

As entradas do algoritmo são divididas em duas etapas: (I) Entradas do algoritmo de dimensionamento da disponibilidade energética (PV_LIB) e (II) Entradas do algoritmo de cálculo da capacidade mínima de armazenamento de bateria.

As entradas de (I) são: (I) Inclinação do arranjo fotovoltaico, (II) Orientação Azimute do arranjo fotovoltaico, (III) Número de painéis em série, (IV) Número de painéis em paralelo, (V) Coeficiente de reflexão (albedo), (VI) Fator de sombreamento, (VII) Seleção do painel fotovoltaico de referência do banco de dados da *Sandia National Laboratories*. (VIII) Coeficiente de relação entre a temperatura do arranjo fotovoltaico e a radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente A, (IX) Coeficiente de relação entre a temperatura do arranjo fotovoltaico e a radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente B e (X) Arquivo TMY.

As entradas de (II) são: (I) Resolução do dimensionamento da bateria, (II) Nível mínimo do armazenamento da bateria, (III) Eficiência de carga da bateria, (IV) Eficiência de descarga da bateria, (V) Valor inicial de capacidade de armazenamento da bateria, (VI) Limitador do número de iterações do algoritmo, (VII) Dados da demanda energética da RSSF (ciclo de trabalho, potência ligada e desligada dos componentes e número de componentes), (VIII) Potência dissipada por perdas gerais, (IX) Potência dissipada pelo regulador de carga e (X) Potência dissipada pelo regulador de tensão.

Como saída, o algoritmo calcula o valor nominal mínimo da capacidade do banco de baterias que cumpre os requisitos de [3]. Na implementação prática, para efeito de comparação, foi adicionado uma variável que armazena o valor mínimo de capacidade de armazenamento o qual respeite apenas a condição de não ultrapassar o valor mínimo do estado da bateria estabelecido pela entrada (II) de (II).

No capítulo 4, será realizado um estudo dos sistemas de gestão de baterias para RSSF disponíveis na bibliografia, e em seguida um modelo será selecionado para implementação no algoritmo proposto.

4. GESTÃO DE BATERIA PARA SUBSISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO COM COLETA FOTOVOLTAICA

Um subsistema de alimentação bem dimensionado é fundamental para o funcionamento correto de uma RSSF. Porém, devido a característica estocástica da radiação solar, garantir um funcionamento contínuo e ininterrupto sem recorrer a suposições como a adotada em [23], que levam a um superdimensionamento dos componentes do circuito, pode ser uma tarefa árdua.

Uma solução comumente usada na bibliografia para lidar com a variabilidade da radiação durante os anos é um sistema de gestão de bateria adaptativo, que varia o consumo da RSSF, em função das DE [36]. Essa metodologia tem como objetivo otimizar a performance geral do sistema, sem pôr em risco o funcionamento ininterrupto a longo prazo do mesmo [18].

A gestão de bateria de um sistema estocástico de coleta energética tem duas funções principais: (I) Garantir a operação neutra energética, ou em inglês (*energy neutral operation*) e (II) Obter a máxima performance do sistema, sem comprometer (I) [18].

A operação neutra energética refere-se à capacidade do sistema de gestão de variar o consumo de carga de forma que a energia usada seja sempre menor que a energia coletada pelo meio ambiente, garantindo assim o funcionamento contínuo do sistema [18]. Uma vez que para garantir a operação neutra de energia, muitas vezes é necessário variar a performance da RSSF, o sistema de gestão baseado em coleta ambiental deve ainda garantir que a RSSF funcione com a máxima performance possível para cada situação meteorológica.

Os algoritmos de gestão adaptativos regulam o ciclo de trabalho da RSSF em função das DE. Diminuir o ciclo de trabalho de uma RSSF, significa diminuir a performance do conjunto em troca de uma diminuição do consumo de energia do mesmo. Em subsistemas estocásticos de coleta de energia, onde a variação de DE é de difícil previsão à longo prazo, os algoritmos de gestão energética adaptativos são muito importantes, uma vez que são usados para compensar esta variabilidade de forma a garantir os requisitos do projeto além de prolongar a vida dos componentes.

Existem diversas abordagens para algoritmos de gestão de bateria de sistemas com coleta ambiental, as duas metodologias mais utilizadas serão abordadas nesse trabalho, sendo elas:

- (I) Gestão de energia baseada em estimativa de condições meteorológicas
- (II) Gestão de bateria baseada no estado de carga da bateria.

É possível dividir (I) em duas subcategorias: (I) Gestão baseada em previsões meteorológicas e (II) Gestão baseada em condições meteorológicas observadas em tempo real. Através da análise da bibliografia, foram selecionados três trabalhos da área de gestão de baterias para sistemas com coleta ambiental de energia. A seguir será feita uma análise superficial dos modelos apresentados em [18] e [3] e [36].

Em [18], o autor divide as técnicas de coleta de energia do ambiente em quatro subgrupos, sendo eles: (I) Não controláveis, mas previsíveis, (II) Não controláveis e não previsíveis, (III) Totalmente controláveis e (IV) Parcialmente controláveis. Partindo desse princípio ele desenvolve um algoritmo de gestão para subsistemas de coleta do tipo (I), o exemplo mais notável de estratégia de aquisição energética do tipo (I) é a coleta fotovoltaica.

Apesar de ter sido proposto em 2007, o algoritmo de [18] é usado até hoje como referência para os recentes trabalhos na área de gestão de bateria. Ele se baseia na diferença entre a energia esperada pelo sistema, que foi usada para o dimensionamento do mesmo, e a energia prevista para o horizonte de tempo em estudo. A partir dessa diferença, o algoritmo faz um processo iterativo, de forma a determinar o ciclo de trabalho que compensa essa variação, procurando sempre obter a melhor performance possível e garantindo a operação neutra energética, citada acima.

Como dados precisos de previsão meteorológica para o cálculo de DE futuras não estão disponíveis para todos os sítios do mundo, os autores de [18] utilizam uma variação da técnica estatística de médias móveis exponencialmente ponderadas para estimar a energia prevista no horizonte de tempo de gestão. Embora o sol apresente ciclos diários e anuais bem estabelecidos, a metodologia usada por [18] é limitada a baixos intervalos de previsão, já que para previsões à longo prazo, o modelo se mostrou muito impreciso [18]. Logo, embora o algoritmo cumpra com a condição de operação neutra energética, ele é limitado pela precisão dos dados de previsão meteorológica.

Usando como base o trabalho de [18], em [3] propõe-se uma solução para o problema da necessidade dos dados de previsão meteorológica. Ao invés de usar como entrada dados futuros de energia, o modelo de [3], compara a energia estimada no dimensionamento do subsistema de alimentação, com a energia efetiva observada no período de tempo em estudo, e assim varia a performance do sistema de forma a compensar a diferença. Assim, o autor conclui que o algoritmo proposto supera a performance média de [18] e ainda aumenta a fiabilidade do sistema, uma vez que os dados são aferidos através de um subsistema de aferição meteorológica instalado junto a RSSF.

Uma abordagem completamente diferente para a gestão de bateria é proposta em [36]. Ao invés de se basear na análise das condições meteorológicas, o algoritmo de [36] usa como entradas alguns parâmetros de regulação e duas características do subsistema de alimentação, sendo elas: (I) O estado de carga atual da bateria e (II) O estado de carga alvo da bateria. O algoritmo é baseado em técnicas de otimização e controle e neste contexto, o estado de carga alvo é a referência do sistema de controle. Assim, varia-se o ciclo de trabalho da RSSF de forma a manter o estado atual de carga da bateria, rodando em valores próximos ao estado alvo da bateria. Os valores de (II), variam de 0 a 1, onde 0 representa a bateria

completamente descarregada e 1 representa a bateria completamente carregada. Em [36], o autor propõe valores entre 0.5 e 0.75 para (II), de forma a otimizar a performance do sistema.

O algoritmo de gestão de [36] é apoiado em um processo com base nas seguintes equações:

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \frac{\mu}{\phi_t^T \cdot \phi_t} \cdot \phi_t \cdot (B - \theta_t \cdot \phi_t^T) \quad (12)$$

$$u_{t+1} = \frac{B_{target} - \theta_{t+1}(0) \cdot B_t + \theta_{t+1}(2) \cdot B_{target}}{\theta_{t+1}(1)} \quad (13)$$

$$\phi_{t+1} = [B_{t+1}, u_{t+1}, -B_{target}] \quad (14)$$

Onde:

- B_t é o estado de carregamento de 0 a 1.
- u_t é o ciclo de trabalho da RSSF de 0 a 1.
- B_{target} é o valor alvo para o estado de carregamento de 0 a 1.
- ϕ_t é um vetor auxiliar que determina o estado atual das variáveis do algoritmo.
- θ_t é um vetor construído com base na teoria de controle e determina o passo do algoritmo.
- μ é a constante de passo, em geral 1.

O autor ainda propõe uma função para não permitir que os valores de u_t ultrapassem os limites lógico além de uma função de ponderação que objetiva diminuir a variação do ciclo de trabalho.

Baseando-se em simulações, o autor concluí que o algoritmo proposto em [36], supera a metodologia de [18] tanto em performance média, quanto no tempo de funcionamento morto, que neste contexto significa períodos onde a RSSF deve ser completamente desligada para poupar energia (0% de duty cycle).

Em ambos os três trabalhos estudados, existe uma diferença na performance estimada pelos autores em seus respectivos algoritmos. Porém, visando obter um algoritmo o mais genérico

possível, o fator determinante na escolha do modelo foi a disponibilidade dos dados de entrada destes.

O modelo proposto em [18] é baseado em dados de previsão meteorológica. Como já foi citado anteriormente, a previsão à curto prazo de radiação solar ainda é uma área em estudo, e os trabalhos disponíveis em versões gratuitas não apresentam resultados precisos o suficiente de forma a justificar sua implementação. Existem, porém, diversas empresas que usam modelos sofisticados para realizar previsões a curto prazo de radiação, como exemplo pode-se citar [37].

A estratégia usada por [18] para estimar as condições da radiação futura é uma aproximação baseada em médias móveis exponencialmente ponderadas, embora essa estratégia consiga refletir bem os ciclos anuais e diários do sol, ela falha em estimar com precisão os valores futuros da radiação incidente a longo prazo [18]. Outra solução seria instalar a RSSF em sítios próximos a estações meteorológicas ou localidades onde esses dados de previsão de radiação estejam disponíveis. Essa segunda estratégia reduz significativamente a aplicabilidade da RSSF, uma vez que a maior parte das aplicações destas envolvem locais de difícil acesso.

Segundo [3], seu algoritmo obteve resultados em performance que superaram o estado da arte para todas as simulações realizadas. Porém, da mesma forma que em [18], os dados de entrada necessários em seu modelo limitam o tipo de RSSF em que este pode ser implementado. Em RSSFs que tem como um dos objetivos aferir radiação solar, o modelo é uma boa escolha, porém para os demais casos, instalar um sistema de aferição de radiação apenas para propósitos de gestão de bateria é muitas vezes inviável financeiramente. As mesmas estratégias citadas no parágrafo anterior poderiam ser implementadas em conjunto ao modelo de [3] para garantir o funcionamento do sistema de gestão, contudo, isso também limitaria a extensão das aplicações da RSSF.

Por ser baseado em técnicas de controle, a única entrada dinâmica do modelo de [36] é o nível de carregamento bateria. As duas técnicas mais usadas na atualidade para aferir o estado de carga da bateria em um determinado momento são: (I) algoritmos de estado de carga da bateria, em inglês (*state of charge algorithms (SOCa)*) e (II) Componentes dedicados. Ambas essas soluções, não limitam o sítio de instalação da RSSF ou o propósito da mesma, além de serem relativamente mais acessíveis financeiramente que um subsistema

de aferição de radiação, ou a assinatura de um serviço de previsão meteorológica de radiação. Por conta disso, o modelo proposto em [36] foi implementado junto ao algoritmo de dimensionamento de subsistema de alimentação proposto no Capítulo 3.

Sendo assim, o algoritmo completo proposto para dimensionamento de um subsistema de alimentação baseado em coleta fotovoltaica para uma RSSF está mostrado na Figura 4.1, nela, o asterisco (*) se refere ao modelo de cálculo da capacidade mínima de armazenamento do banco de baterias levando em consideração a entrada de energia por meio da coleta solar e a energia demandada pela carga, composto por uma versão levemente modificada da apresentada em [3] e o asterisco duplo (**) Referência o algoritmo de gestão de bateria apresentado em [36].

No capítulo 5, será exposta uma simulação realizada para verificar o funcionamento do subsistema de alimentação de uma RSSF baseada em coleta fotovoltaica dimensionada a partir do modelo proposto, buscando mostrar a eficácia da metodologia apresentada.

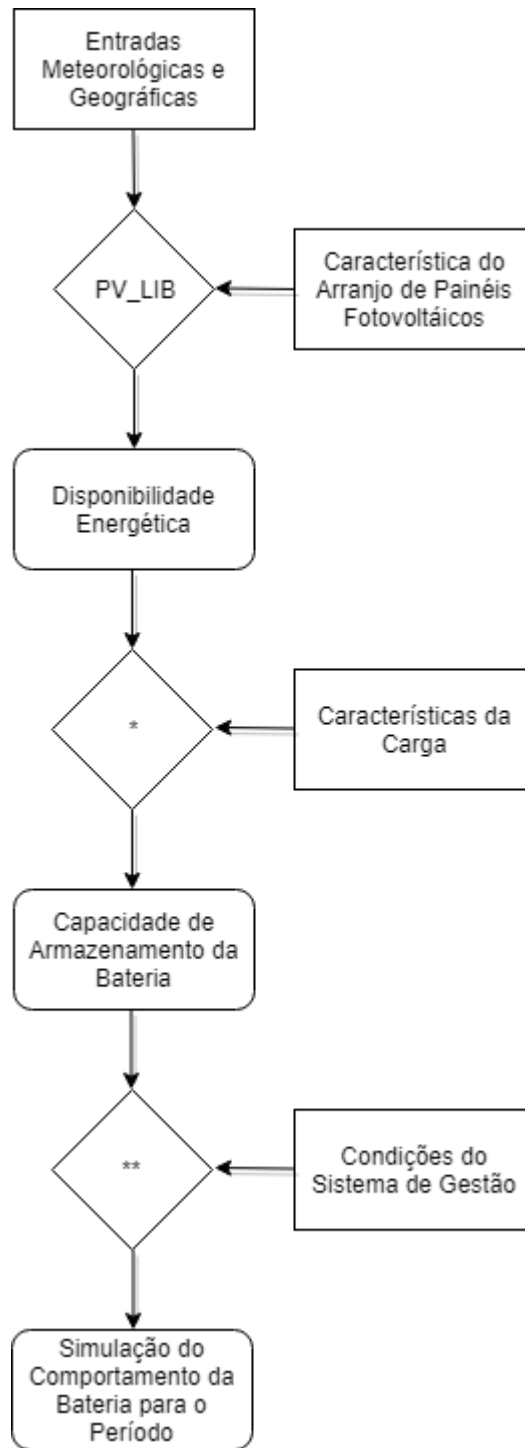


Figura 4.1: Fluxograma do algoritmo de dimensionamento e gestão proposto.

5. SIMULAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

Nesse capítulo, será apresentada uma simulação do algoritmo proposto no decorrer deste trabalho.

Seguindo o fluxograma da Figura 4.1, o primeiro passo será avaliar as DE do sítio em estudo. A Tabela 5.1 apresenta os dados de entrada para o algoritmo de cálculo de DE.

Tabela 5.1: Dados de entrada do algoritmo de cálculo das disponibilidades energéticas

Sítio em estudo	ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto
Latitude	41,17°
Longitude	-8,60°
Altitude	134.00 m
Fonte Dos Dados Geográficos	Banco de Dados PVGIS
Inclinação do Painel Solar	35,00°

Orientação Azimuth do Pannel Solar	180°
Modelo do Pannel Solar	Canadian Solar CS5P-220M (220W)
Número de Painéis em série	1,00
Número de Painéis em paralelo	1,00
Coeficiente de Relação Entre a Temperatura do Arranjo Fotovoltaico e a Radiação A	-3,56
Coeficiente de Relação Entre a Temperatura do Arranjo Fotovoltaico e a Radiação B	-0,075
Arquivo TMY	PVGIS (2007-2016)
Coeficiente de Reflexão (Albedo)	0,20
Coeficiente de Sombreamento	0,90

Tendo como entrada as variáveis da Tabela 5.1, e o algoritmo proposto para a averiguação das DE, apresentado na Figura 3.3 estimou-se a energia disponível para coleta durante o ano. A dinâmica da energia disponível estimada é representada na Figura 5.1.

Com as DE estabelecidas, o próximo passo é estimar a capacidade mínima de armazenamento do arranjo de baterias de forma a garantir o funcionamento a longo prazo da RSSF. Para isso, a Tabela 5.2 simula as necessidades energéticas de dimensionamento de uma RSSF teórica, composta de um módulo de sensoriamento apenas, para efeito de simplificação do problema.

Tabela 5.2: Dados de entrada do algoritmo de dimensionamento de bateria

Potência do Módulo Ligado - P_{ON}	20 W
Potência do Módulo Desligado - P_{OFF}	1 W
Potência de Perdas do Controlador - P_{CC}	2 W
Potência de Perdas Gerais do Sistema - P_G	2 W
Potência de Perdas do Regulador - P_{RT}	2 W
Ciclo de Trabalho de Dimensionamento	40%
Perda Diária de Carga da Bateria	3 Wh
Resolução do Algoritmo	5 Wh
Eficiência de Carga da Bateria	0.8
Eficiência de Descarga da Bateria	0.7

A partir dos dados da Tabela 5.2 e a Equação 8, o algoritmo estima as necessidades energéticas da RSSF, e calcula a bateria mínima de forma a cumprir com as condições impostas em [3]. As saídas dessa etapa do algoritmo são: (I) O comportamento da bateria selecionada ao longo do tempo e (II) a capacidade mínima de armazenamento da bateria.

Para o caso simulado, a capacidade mínima de armazenamento da bateria foi estipulada em 18.930,00 Wh e a Figura 5.2 mostra o comportamento do estado de carga da bateria para durante um período de 4 anos, caso a energia disponível fosse idêntica aos valores de projeto.

Duas considerações podem ser feitas sobre esse resultado: (I) O algoritmo prevê que a bateria selecionada tenha um ciclo anual de descarga, levando em conta que tecnologias de armazenamento recentes suportam até 100 ciclos de descarga, essa característica do modelo proposto por [3] colabora com o funcionamento à longo prazo da RSSF. (II) Se o exemplo proposto fosse um caso real, seria mais viável financeiramente aumentar o arranjo fotovoltaico, para que houvesse maior disponibilidade energética no sistema e assim fossem diminuídas as necessidades de armazenamento, uma vez que bancos de baterias com a faixa de capacidade de armazenamento apresentada acima são pouco acessíveis financeiramente.

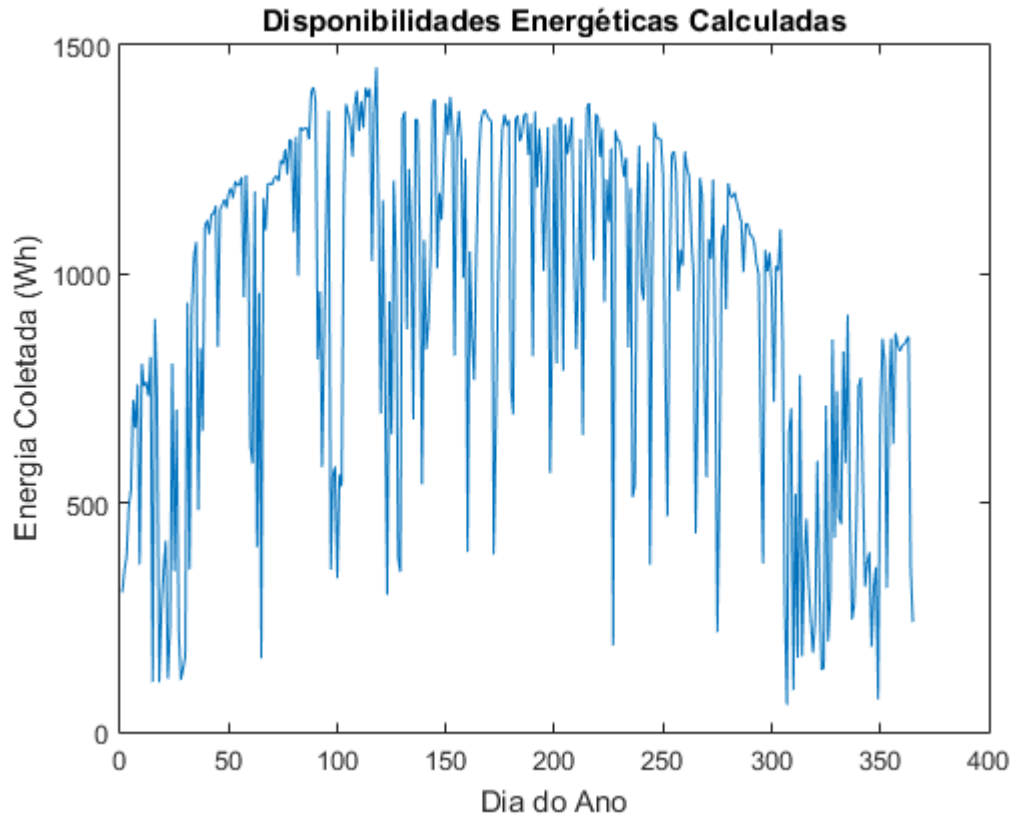


Figura 5.1: Disponibilidades energéticas calculadas

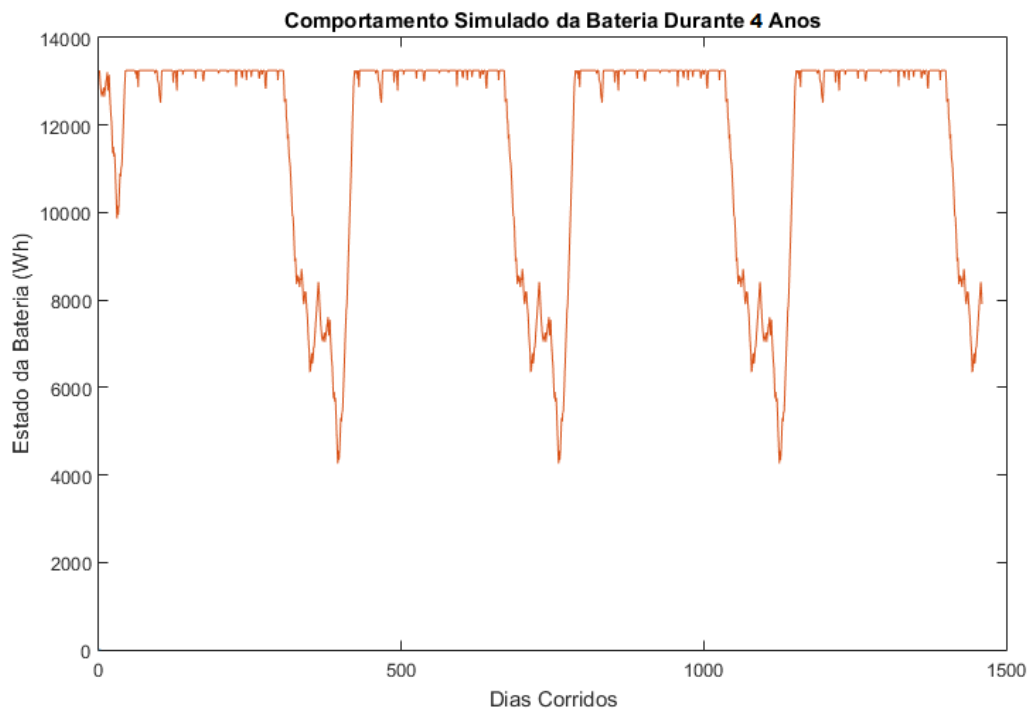


Figura 5.2: Comportamento da bateria simulada durante 4 anos com condições meteorológicas iguais às de dimensionamento.

O último passo da simulação será estimar o comportamento da bateria e a performance desta, levando em conta variações meteorológicas. Essa simulação será feita em duas etapas, sendo elas: (I) Sem sistema de gestão de bateria e (II) Com sistema de gestão de bateria. Em seguida os resultados serão avaliados.

Idealmente, para simular o efeito da variabilidade das condições meteorológicas no comportamento da bateria ao longo dos anos, a disponibilidade energética do período deveria ser calculada usando como base valores de radiação solar aferidos no passado para um período temporal estabelecido. Porém, não foi possível encontrar um banco de informações com dados de radiação, que ao mesmo tempo tivesse os dados de radiação decompostos nos componentes de entrada do software de cálculo de disponibilidade energética e abrangesse um período temporal maior que dois anos.

A solução encontrada para simular a característica estocástica da radiação solar foi usar o arquivo meteorológico de dimensionamento como base e aplicar uma função randômica normal diária nos dados de saída do algoritmo de cálculo de DE, de forma que a disponibilidade energética possa variar 50% em volta dos valores de dimensionamento, ao longo de 10 anos de simulação. Apoiando-se na característica cíclica do sol, a função randômica foi projetada de forma a ter um comportamento estatístico normal. Dessa forma, apesar de existir variações diárias elevadas, a radiação solar incidente total de cada ano tende a ser igual a dimensionada. O resultado da simulação realizada se encontra na Figura 5.3.

Embora tenha se notado a variação dos dados de disponibilidade energética no comportamento do estado da bateria durante os 10 anos simulados, não se verificou risco de descarga completa da bateria. A próxima simulação realizada simula o comportamento da bateria após a implementação do sistema de gestão no algoritmo proposto.

A Tabela 5.2 mostra, os valores de entrada para o sistema de gestão de [36] e o resultado da simulação é mostrado na Figura 5.4.

Tabela 5.3: Dados de entrada do algoritmo de gestão energética

Estado de Carga Alvo	0,55
Parâmetro de Suavização	0,25
Parâmetro de Troca	1,00

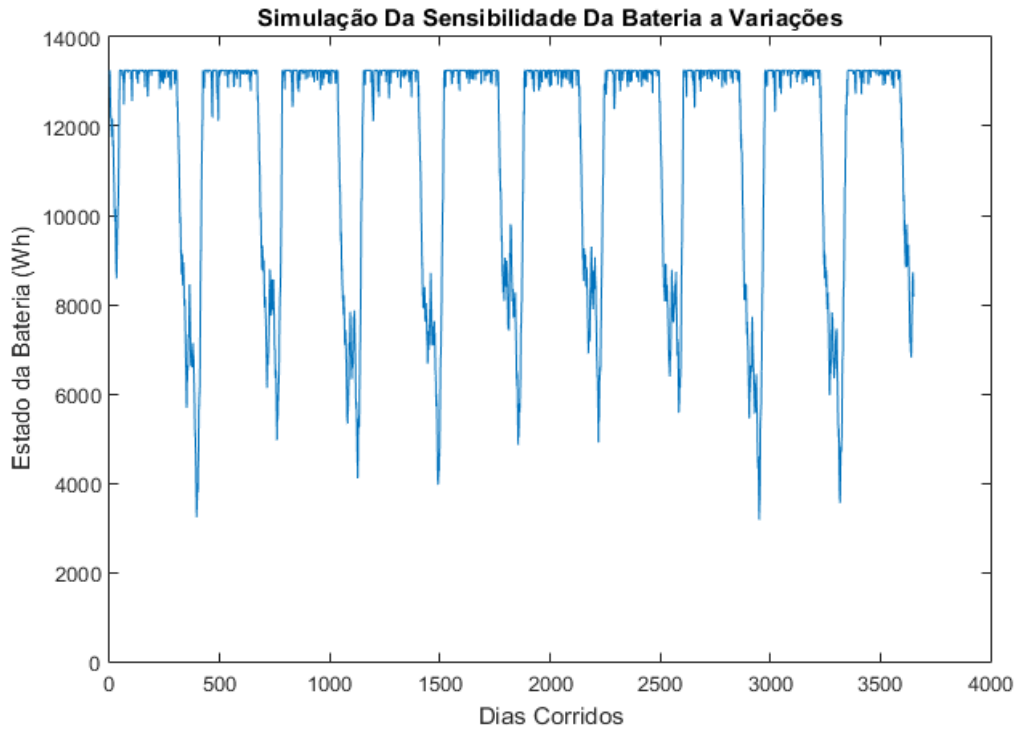


Figura 5.3: Comportamento da bateria sem sistema de gestão em 10 anos.

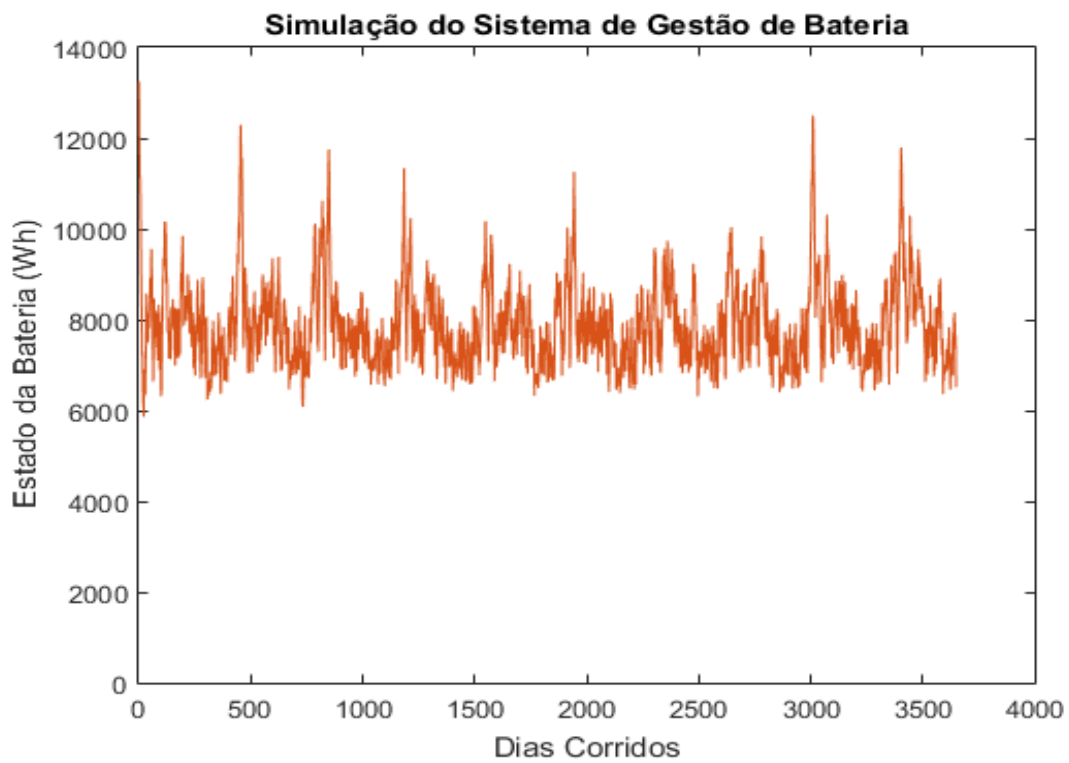


Figura 5.4: Comportamento da bateria simulada com sistema de gestão em 10 anos.

Algumas considerações podem ser feitas a respeito do resultado da simulação do sistema de gestão de baterias: (I) O sistema de gestão resulta em um melhor uso dos recursos energéticos

disponíveis. A bateria foi projetada de forma que a RSSF trabalhasse com 40,00% da performance total, nesta simulação, o sistema de gestão obteve um ciclo de trabalho médio de 72,46%. (II) Embora se tenha atingindo um ciclo de trabalho médio maior, a partir da análise da Figura 5.5 é possível notar que em 309 dias dos 10 anos simulados, a RSSF foi completamente desligada (ciclo de trabalho de 0%). O comportamento do sistema de controle varia de acordo com os parâmetros mostrados na Tabela 5.2, a partir deles é possível eliminar esse tempo morto observado em troca de diminuir a performance média do sistema. A escolha desses parâmetros é intrinsicamente ligada à função da RSSF. Para algumas aplicações, obter uma performance média maior é mais importante que o funcionamento diário da RSSF. (III) O autor de [36], propõe que o passo do sistema de controle seja de 10 minutos. Porém, devido ao restante do algoritmo proposto ser dimensionado para obter dados diários de carga e disponibilidade energética, nessa simulação foi adotado um passo diário, numa implementação real, com um passo temporal menor, espera-se obter melhores resultados.

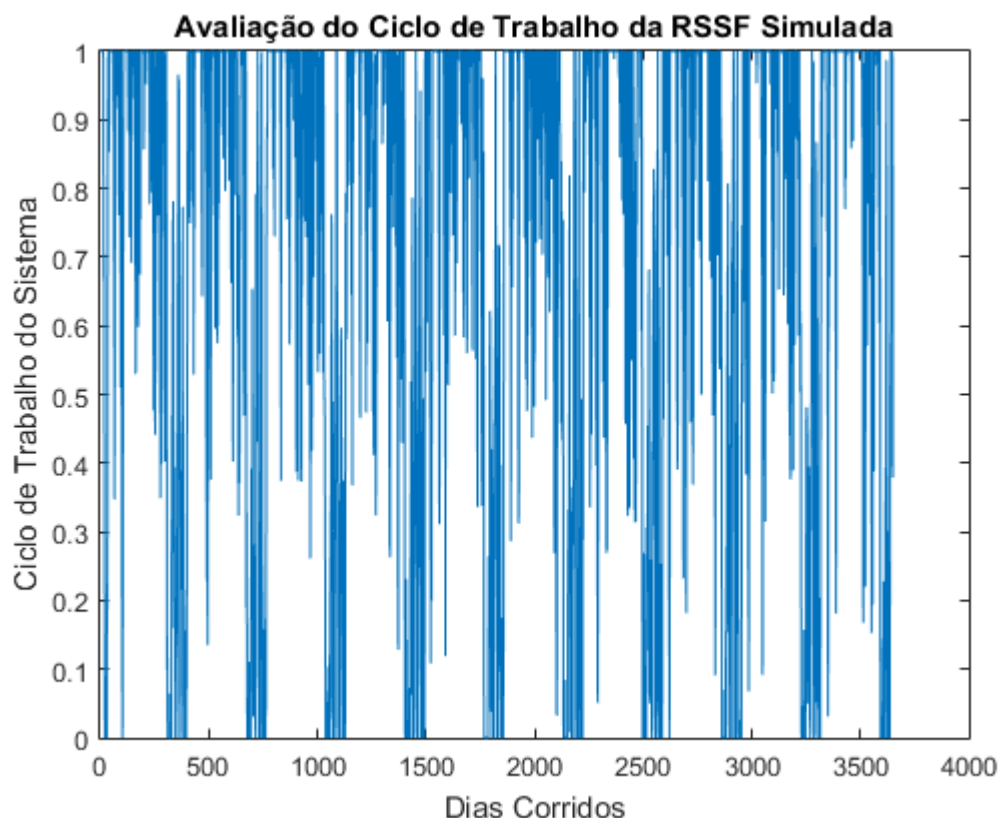


Figura 5.5: Análise do ciclo de trabalho da RSSF para as condições expostas.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo justificar as decisões de projeto adotadas no desenvolvimento de um algoritmo de dimensionamento e gestão de baterias para RSSFs com coleta fotovoltaica, visando um funcionamento ininterrupto e autônomo a longo prazo. Observou-se que esse processo pode ser dividido em três etapas: verificação das DE, cálculo da capacidade de armazenamento mínimo do banco de baterias e gestão da bateria através de um sistema de controle adaptativo. Dessa forma, o algoritmo proposto é o resultado da combinação de três modelos adaptados disponíveis na bibliografia.

A simulação realizada no Capítulo 5 mostrou a eficácia do modelo proposto para as condições traçadas. Uma variação diária aleatória com distribuição normal entre 150% e 50% das DE de projeto não foi o suficiente para desestabilizar o comportamento da bateria no decorrer dos 10 anos simulados. Isso significa que para essas condições, apenas o banco de baterias e o arranjo solar proposto seria suficiente para garantir o funcionamento ininterrupto a longo prazo da RSSF simulada.

Mesmo que as condições de funcionamento contínuo tenham se verificada na simulação do sistema sem adição do algoritmo de gestão de bateria, o acréscimo deste aumentou a performance média do circuito em mais de 30%, em troca de 309 dias em um período de 3.650 dias que a rede de sensores sem fios ficou completamente desligada. Isso pode ser

interpretado tanto como bom resultado, quanto como ruim, dependendo da aplicação da RSSF. O tempo morto registrado pode ser diminuído ou completamente eliminado a partir da variação dos parâmetros de entrada do sistema de gestão. Dessa forma o sistema de gestão além de adicionar um certo controle de como as DE serão alocadas, protege o sistema de baterias de condições de radiação extremamente adversas, não representadas nos dados de dimensionamento, aumentando assim a segurança e o tempo de vida útil dos componentes da RSSF.

A principal contribuição deste estudo para o estado da arte é a inclusão de um algoritmo preciso dedicado ao cálculo das DE com base em banco de dados meteorológicos para dimensionamento de subsistema de alimentação em RSSF. Embora essa metodologia seja largamente empregada para sistemas de potências elevadas como, por exemplo, sistemas solares residenciais, na bibliografia estudada não foi encontrado outro trabalho que tenha adotado esta metodologia para aplicações em redes de sensoriamento remoto. Essa inclusão melhora a precisão das informações de DE, porém, impõe a necessidade de um banco de informações meteorológicas precisas para o projeto. Felizmente, atualmente esses bancos estão disponíveis para quase todas as localidades do mundo em versões gratuitas e pagas.

O algoritmo proposto neste trabalho é uma metodologia sistemática e genérica e foi desenvolvido de forma que possa ser usada baseando-se apenas nas características elétricas do sistema. Assim, o algoritmo apresentado pode ser usado para o dimensionamento do subsistema de alimentação de qualquer rede de sensores sem fios com coleta solar, independentemente de suas funções ou objetivos.

Em termos de limitações, o algoritmo apresentado seleciona apenas o arranjo solar e a capacidade nominal de armazenamento do banco de bateria para o subsistema de alimentação de uma RSSF, negligenciando a seleção da tecnologia da bateria e dos demais componentes deste subsistema (controlador de carga e regulador de tensão).

Outra limitação é o comportamento simplificado adotado para simular a dinâmica de carga e descarga da bateria na etapa do dimensionamento da capacidade de armazenamento mínima. Embora tenham sido implementadas variáveis que simulem as ineficiências de carga e descarga, é sabido que o comportamento de uma bateria é muito mais complexo do que o modelo implementado e depende intrinsecamente da tecnologia de armazenamento escolhida.

O algoritmo proposto utiliza um número muito pequeno de simplificações científicas se comparado ao estado da arte e é genérico o suficiente de forma que pode ser usado para dimensionar qualquer subsistema de alimentação de RSSFs baseado em coleta solar, salvo exceções. Por isso, entende-se que os objetivos desta dissertação foram cumpridos e os resultados satisfatórios.

6.1. TRABALHOS FUTUROS

Levando em consideração as limitações, para trabalhos futuros na área de dimensionamento de subsistemas de alimentação para RSSFs, se sugere:

- Estudo de um modelo matemático que represente melhor as características de carga e descarga da bateria.
- Estudo de um modelo que permita avaliar as características de desgaste dos componentes do sistema em função do tempo.
- Validação da metodologia para outras fontes de coleta ambiental de energia, modificando o algoritmo de cálculo de DE.
- Validação prática do algoritmo para verificar a eficácia do modelo em um sistema real.

Referências Documentais

- [1] W. DARGIE, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, WILEY, 2010.
- [2] J. FRADEN, *Handbook of modern sensors: physics, designs and applications*, Springer, 2010.
- [3] B. R. BUCHILI, “Power Subsystem Design and Management for Solar Energy,” Zurique, 2015.
- [4] J. Caicedo-Ortiz, E. De-la-Hoz-Franco, R. Ortega, G. Espitia, H. Combita-Niño, F. Estévez e A. Cama-Pinto, “Monitoring system for agronomic variables based in WSN technology on cassava crops,” *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 275-281, 2018.
- [5] P.S e Sandra, “WSN Based Industrial Parameter Monitoring Using,” em *2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Kollam, 2017.
- [6] H. YU e M. GUO, “An Efficient Oil and Gas Pipeline Monitoring Systems based on Wireless Sensor Networks,” *IEEE*, 2012.
- [7] X. Fafoutis, D. Vuckovic, A. Di Mauro, N. Dragoni e J. Madsen, “Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks,” em *9th European Conference on Wireless Sensor Networks*, Trento, 2012.
- [8] S. BASAGNI e M. CONTI, *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*, 2013.
- [9] P. R. Rodrigues, *Energias Renováveis: Energia Eólica*, JELARE , 2011.
- [10] S. AKBARI, “Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks Review,” em *Proceedings of the 2014 Federated Conference on*, Warsaw, 2014.

- [11] J.-W. PARK, H.-J. JUNG, H. Jo e B. F. Spencer, “Feasibility Study of Micro-Wind Turbines for Powering Wireless Sensors on a Cable-Stayed Bridge,” *Energies*, pp. 3450-3464, 2012.
- [12] K. FAISAL, “Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review,” *Elsevier*, p. 1041–1054, 2016.
- [13] K. Jäger, O. Isabella, A. H.M. Smets e M. Zeman, *Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems*, Delft: Delft University of Technology, 2014.
- [14] T. Crompton, *Battery Reference Book Third Edition*, Reed Educational and Professional Publishing, 2000.
- [15] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman e S. Mani, “Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless,” *IEEE*, 2005.
- [16] S. G. ., A. H. R. L. A. M. C. P. I. T. L. T. C. T. M. W. M. Y. Jan Beutel, “PermaDAQ: A Scientific Instrument for Precision Sensing and Data Recovery in Environmental Extremes,” 2009.
- [17] P. S. SAUSEN, “Gerenciamento Integrado de Energia e Controle de Topologia em Redes de Sensores Sem Fio,” Campina Grande, 2008.
- [18] A. KANSAL, J. HSU, S. Z. ZAHEDI e M. B. SRIVASTAVA, “Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks,” *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, pp. 6-32, 2007.
- [19] M. Yesilbudak, M. Colak e R. Bayindir, “What are the Current Status and Future Prospects in Solar Irradiance and Solar Power Forecasting?,” *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, pp. 636-648, 2018.
- [20] J. V. DAVE, P. HALPERN e M. H. J., “Computation of Incident Solar Energy,” *IBM Journal of Research and Development* , 1975.

- [21] J. A. DUFFIE e W. A. BECKMAN, “Calculations of Reflected and Transmitted Radiance for Earth's Atmosphere,” *OPT* 7, 1968.
- [22] J. V. DAVE e J. Gazdag, “A Modified Fourier Transform Method for Multiple Scattering Calculations in a Plane Parallel Mie Atmosphere,” *OPT*. 9, 1970.
- [23] J. TANEJA, J. JEONG e D. CULLER, “Design, Modeling, and Capacity Planning for Micro-Solar Power Sensor Networks,” em *International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, St. Louis, 2008.
- [24] M. MIOZZO, D. Z. ZORDANT, P. D. DINI e M. ROSSI, “SolarStat: Modeling Photovoltaic Sources through Stochastic Markov Processes,” em *ENERGYCON 2014*, Dubrovnik, 2014.
- [25] PVGIS, “PVGIS,” European Commission, [Online]. Available: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_static/about_pvgis.html. [Acesso em 10 06 2018].
- [26] R. Müller, C. Matsoukas, A. Gratzki, H. Behr e R. Hollmann, “The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance—A LUT based eigenvector hybrid approach,” *Remote Sens. Environ*, vol. 113, pp. 153-163, 2009.
- [27] R. Müller, T. Behrendt, A. Hammer e A. Kemper, “A new algorithm for the satellite-based retrieval of solar surface irradiance in spectral bands,” *Remote Sens*, nº 4, pp. 662-447, 2012.
- [28] T. Huld e R. G. A. Müller, “A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa Solar Energy,” *Solar Energy*, vol. 86, pp. 1803-1815, 2012.
- [29] A. Gracia Amillo, T. Huld e R. Müller, “A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation,” *Remote Sens*, vol. 6, p. 8165–8189, 2014.

- [30] S. N. Laboratories, “PV Performance Modeling Collaborative,” Sandia National Laboratories, 2018. [Online]. Available: <https://pvpmc.sandia.gov/>. [Acesso em 10 06 2018].
- [31] T. Gurupira e A. Rix, “PV SIMULATION SOFTWARE COMPARISONS: PVSYS, NREL SAM AND PVLIB,” Stellenbosch, 2014.
- [32] H. C. HOTTEL e B. B. WOERTZ, “The Performance of Flat Plate Solar-Heat Collectors,” *Transactions of the ASME*, vol. 64, pp. 64-91, 1942.
- [33] P. Loutzenhiser, “Empirical validation of models to compute,” *Solar Energy*, vol. 81, pp. 254-267, 2007.
- [34] D. KING, “Sandia Photovoltaic Array Performance Model,” SAND Report 3535, Albuquerque, 2004.
- [35] P. Zhang, C. M. SADLER, S. A. LYON e M. MARTONOSI, “Hardware,” *Sensys*, 2004.
- [36] C. M. VIGORITO, D. GANESAN e A. G. BARTO, “Adaptive Control of Duty Cycling in Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks,” em *2007 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, San Diego, 2007.
- [37] SolarGIS, “SolarGIS,” SolarGIS, [Online]. Available: <https://solargis.com/>. [Acesso em 16 06 2018].
- [38] T. Gurupira e A. .. Rix, “PHOTOVOLTAIC SYSTEM MODELLING USING PVLIB-PYTHON,” Stellenbosch, 2015.



ANEXO A

Estudo Entre os Principais Programas de Dimensionamento de Disponibilidades Energéticas Livres

1. INTRODUÇÃO

Na primeira etapa do estágio curricular realizada entre os dias 07 à 28 de março de 2018, junto à empresa **EQS- Serviços De Engenharia, Qualidade e Segurança Lda – Maia**, estabeleceu-se os objetivos do projeto e o cronograma de atividades a serem realizadas no decorrer do primeiro semestre de 2018. Nesse momento definiu-se que a meta final do trabalho é o desenvolvimento de um algoritmo de previsão e gestão energética para um sistema de alimentação de baixa potência baseado em tecnologia fotovoltaica. Com foco nisso, o primeiro passo foi um estudo aprofundado do estado atual da tecnologia em energia fotovoltaica, seguido de uma pesquisa entre as principais soluções de dimensionamento e previsão de sistemas de energia solar, finalizando com um estudo comparativo entre os *softwares* de simulação selecionados, usando como métricas: entradas necessárias e saídas (energia anual produzida).

Seguindo a pesquisa afim de verificar a fiabilidade das soluções e entender melhor os algoritmos implementados, foi necessário um estudo superficial dos arquivos meteorológicos usados como base (entrada) para os modelos científicos. Dessa forma, este relatório terá como propósito apresentar brevemente os conjuntos de dados meteorológicos estudados, além de expor o desenvolvimento e as conclusões do estudo comparativo realizado entre os programas de simulação selecionados.

2. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção serão expostos os estudos realizados até o momento, além da metodologia de pesquisa adotada para a análise comparativa dos *softwares* de simulação selecionados.

2.1. Apresentação dos Arquivos de Dados Meteorológicos

Observou-se que uma característica comum entre todos os *softwares* de simulação estudados é a necessidade de um arquivo com dados meteorológicos do sítio onde será instalado o sistema fotovoltaico. Esses arquivos, em geral apresentam informações meteorológicas dos últimos 10 a 12 anos do local em estudo, com uma resolução de uma hora (8760 linhas de dados por arquivo).

Existem diferentes técnicas que os fornecedores usam para obtenção desses dados, tais como: análises estatísticas de dados de satélites, generalização de dados aferidos em locais próximos, algoritmos de aproximação e etc. Embora a precisão possa ser prejudicada nesses processos (com exceção de uma medição local ortodoxa), é possível encontrar esses dados com facilidade na internet, tanto de fornecedores pagos quanto gratuitos.

Em geral, os arquivos meteorológicos são construídos com base nos moldes do distribuidor e distribuídos nos formatos *.csv* e *.epw*. Existem diversos conjuntos de dados disponíveis na internet, geralmente nos moldes TMY (*typical meteorological year*), um modelo de apresentação de dados meteorológicos proposto pela National Renewable Energy Laboratory (NREL). Os TMY distribuídos pela NREL consistem em um conjunto completo de dados meteorológicos aferidos nas principais cidades norte americanas e processados estatisticamente, objetivando apresentar valores com uma boa exatidão para simulações à longo prazo (buscando simular um “ano médio, ou típico”), mais tarde, outros distribuidores aderiram a este modelo para outros lugares do mundo. Hoje, os arquivos TMY são entradas padrão em todos os programas estudados.

Apesar de bem aferidos e completos, os arquivos TMY distribuído pela NREL são limitados aos estados americanos, portanto, não serviram para o propósito deste trabalho, porém existem outros bancos de dados meteorológicos que fornecem arquivos TMY para o restante do mundo. Nesse trabalho foram usados dados fornecidos pelo *Photovoltaic Geographical Information System 5.0* (PVGIS 5.0) e pelos dados internos internacionais (INTL) do *System Advisor Model* (SAM 2017.9.5), cuja a origem não foi especificada na documentação do *software*.

A figura 1 mostra o típico formato inicial do arquivo TMY (PVGIS 5.0) de Maia, visualizado a partir do MS Excel (formato .csv).

Latitude: 41.233002					
Longitude: -8.628000					
Elevation: 84.000000					
Month, Chosen year					
1,2007					
2,2009					
3,2009					
4,2013					
5,2013					
6,2006					
7,2013					
8,2009					
9,2006					
10,2007					
11,2015					
12,2007					
Date&Time (UTC),Dry bulb temperature (deg. C),Relative Humidity (%), Cloud					
01/01/2007 00:00:00,10.03,98.28,0.00,-0.00,0.00,264.35,2.05,18,102820					
01/01/2007 01:00:00,10.14,98.89,0.00,-0.00,0.00,267.25,2.16,16,102800					
01/01/2007 02:00:00,10.25,99.51,0.00,-0.00,0.00,270.14,2.26,14,102780					
01/01/2007 03:00:00,10.36,100.00,0.00,-0.00,0.00,273.03,2.37,15,102761					
01/01/2007 04:00:00,10.47,100.00,0.00,-0.00,0.00,275.92,2.48,15,102741					

Figura 1. Formato típico de um arquivo TMY.

Por fim, por orientação da NREL, os arquivos TMY ainda que sejam boas aproximações para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos por apresentarem resultados plausíveis em médio e longo prazo, não devem ser usados isoladamente para gestão energética a curto ou curtíssimo prazo por conta das imprecisões geradas na generalização dos dados e da variação estocástica anual. Isso cria a necessidade de procurar por uma fonte de dados mais fiel para curtos períodos de tempo.

2.2.Principais Soluções Disponíveis para Simulação de Sistemas Fotovoltaicos

Inicialmente foi realizada uma pesquisa nos principais mecanismos de busca, visando obter a maior quantidade de *softwares* de previsão que fosse possível. Logo depois, as aplicações que não se encaixavam nos propósitos do projeto foram

excluídas. Com o objetivo final em mente, foi dada prioridade a aplicações *open source*.

Os principais aplicativos, usando como critérios: credibilidade acadêmica (citações em artigos e trabalhos de validação científica do modelo usado), periodicidade de atualização e disponibilidade do código fonte ou documentos que expliquem os modelos usados, foram os seguintes: SAM 2017.9.5, PVGIS 5.0, RETScreen, PVSyst 6.68 e CASSYS 1.3.0, além de uma biblioteca de funções e classes para simulação de sistemas fotovoltaicos: PVLIB 1.36, disponível em *Python* e *Matlab*.

É importante ressaltar que muitos softwares não foram selecionados por possuírem objetivos muito distantes do propósito do estudo. Existem, por exemplo, muitos *softwares* que dimensionam sistemas fotovoltaicos a partir das necessidades da carga e das condições climáticas, selecionando os componentes físicos de acordo. A perspectiva desse trabalho é um pouco diferente, objetiva-se encontrar programas que calculem a saída de energia dadas as respectivas condições físicas do sistema eletro solar.

A partir de agora será feita uma descrição sucinta de cada uma das ferramentas estudadas.

2.2.1. *System Advisor Model 2017.9.5*

Desenvolvido pela NREL em colaboração com o Sandia National Laboratories (SNL) em 2005 visando realizar cálculos internos, o SAM é um dos softwares mais usados atualmente em artigos acadêmicos como referência para dimensionamento de centrais de produção de energia fotovoltaica. Em 14 de janeiro de 2014 a NREL publicou um documento de descrição, onde define seu *software* como um “modelo de suporte para pessoas envolvidas na indústria de energia”. Um dos principais marcos na história recente do SAM foi a abertura de seu código fonte em 2017.

Além de ter funcionalidade para cálculo de produção fotovoltaica, com o SAM é possível realizar dimensionamento de diversas outras fontes de energia renováveis e ainda avaliar um conjunto de análises financeiras relativamente complexas.

A última versão do SAM apresenta duas opções ao usuário no módulo de cálculos fotovoltaicos: o PVWatts (apelidado aqui de modelo simplificado), e o modelo detalhado. Embora ambos os modelos usem os mesmos arquivos meteorológicos, o modelo detalhado vai além dos dados nominais dos dispositivos, uma vez que recorre à um banco de dados de características específicas dos componentes que compõem o sistema solar. A partir dos resultados do estudo percebeu-se que o simplificado apresenta resultados bem mais conservadores em relação a produção anual de energia, quando comparados aos resultados do modelo completo.

O algoritmo do SAM, em geral segue o diagrama de blocos apresentado na figura 2.

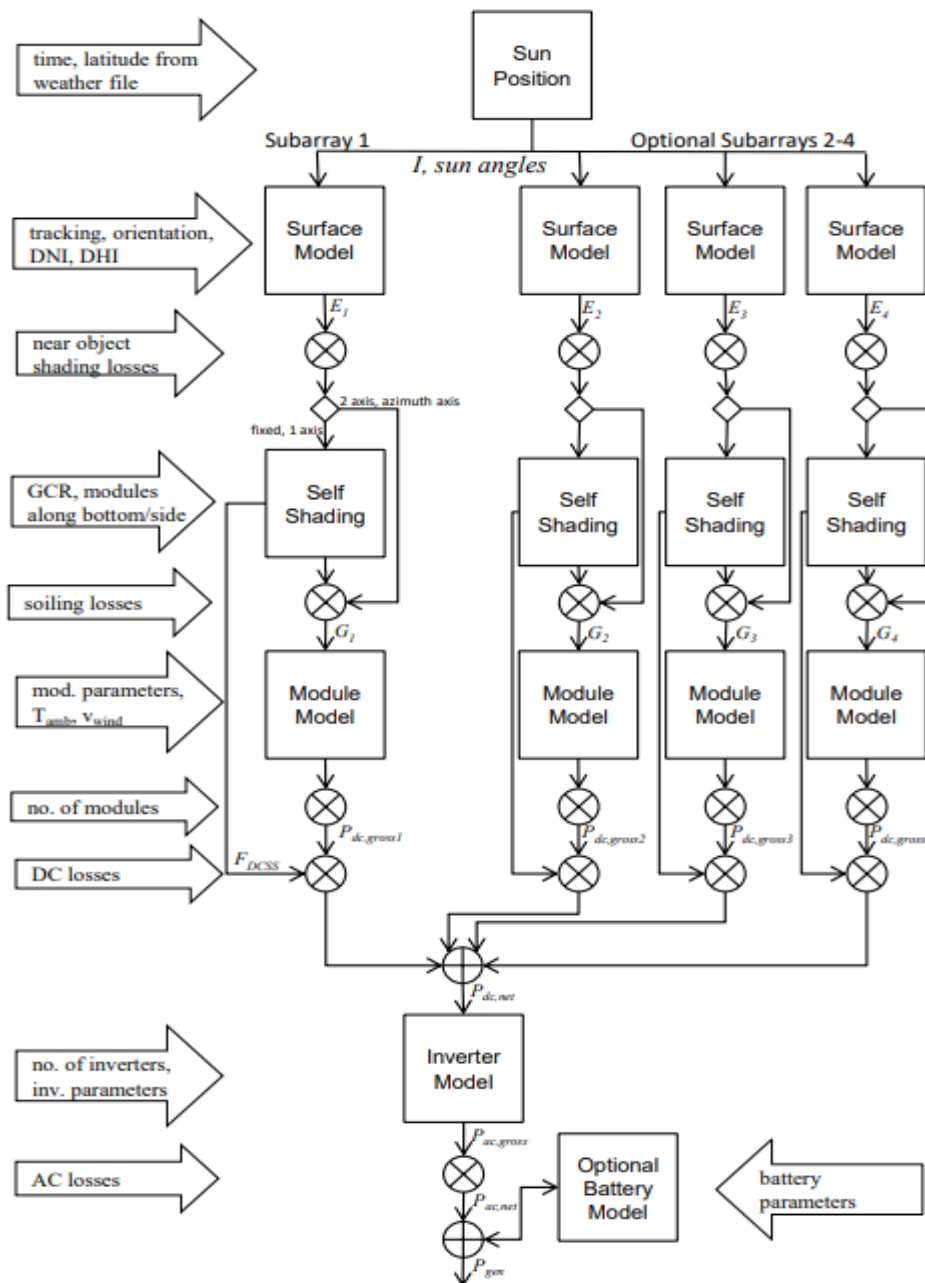


Figura 2. Diagrama sequencial do modelo fotovoltaico do SAM (retirado da documentação do programa).

2.2.2. Photovoltaic Geographical Information System 5.0

O PVGIS é um projeto que está sendo desenvolvido pela Comissão Europeia *Joint Research Centre* a mais de 10 anos e tem como objetivos a disseminação de conhecimento em tecnologias fotovoltaicas e dados de suporte para projetos de energia solar. Atualmente, em sua quinta versão, o PVGIS se

tornou uma ferramenta web de fácil utilização, com entradas simplificadas e com um banco de dados que cobre a maior parte do mundo.

Apesar de não ter código aberto, a documentação do PVGIS explicita basicamente todo o processo de cálculo de saída, usando como base para isso artigos acadêmicos publicados em revistas de renome. Diferente dos outros *softwares* com a mesma função, o PVGIS apresenta um número muito reduzido de entradas, provavelmente com o objetivo de simplificar a utilização do usuário.

Embora não seja a aplicação mais precisa no cálculo de energia, o PVGIS é uma fonte confiável e global de arquivos meteorológicos para vários sítios no mundo inteiro. Neste trabalho, o banco de dados PVGIS foi usado como padrão para dados meteorológicos de entrada.

Atualmente, em sua quinta versão, o PVGIS consegue simular sistemas solares de diversas naturezas com pouquíssimos dados de entrada, inclusive, da lista dos *softwares* estudados, o PVGIS é o único com opção para sistemas *off-grid* com suporte para bateria.

2.2.3. RETScreen Clean Energy Management

O RETScreen é um software canadense de projeto para plantas de energias renováveis. A primeira versão do aplicativo foi lançado pelo Ministério de Meio Ambiente do Canadá em 1998 e recentemente foi destaque no Encontro Ministerial de Energia Limpa de 2016.

Apesar do recente destaque, o programa é pouco acessível (pago), além de ser *closed source* e não ser tão usado ou citado academicamente quanto os outros mencionados acima, por conta disso, decidiu-se excluí-lo desta análise.

2.2.4. PVSyst 6.68

O PVSyst é um programa de mais renome no projeto de sistemas fotovoltaicos atualmente. Ele é citado como referência em inúmeros trabalhos acadêmicos, e apresenta o banco de dados mais completo de todos os *softwares* estudados, compondo desde diversos modelos de módulos fotovoltaicos, inversores e até sistemas de baterias variáveis. Outro destaque do PVSyst em relação aos concorrentes é o sistema visual para o cálculo de sombreamento.

Devido a aplicação ser empresarial, *closed source* e paga, é muito difícil encontrar dados para complementar esse estudo. Aqui, o PVSyst será usado apenas como ferramenta de comparação com as demais aplicações.

2.2.5. CASSYS 1.3.0

O CASSYS é um software canadense *open source* em C# com interface baseada em MS Excel desenvolvido pela Canadian Solar O&M Inc. e disponibilizado no *Github*.

Em primeiro momento o CASSYS parecia promissor, uma vez que existem trabalhos que comparam sua precisão com casos reais e apresentam resultados satisfatórios, porém, o programa não funcionou corretamente nas diversas tentativas de simulação, o que inviabilizou o estudo mais aprofundado do mesmo.

Apesar disso, a documentação deste programa é bem completa e ao comparar o modelo de cálculo com os demais *softwares open source* estudados, percebe-se uma clara semelhança entre eles. Entende-se, portanto, que, adicionar o CASSYS na lista de softwares para o estudo comparativo, seria uma redundância desnecessária se levado em conta a dificuldade de simulação.

2.2.6. PVLIB 1.32

O PVLIB é uma biblioteca *open source* disponível tanto em versão para *Matlab* quanto em Python. O *software usa* as mesmas métricas dos softwares anteriores e seu algoritmo, segue de maneira genérica, o diagrama da figura 3.

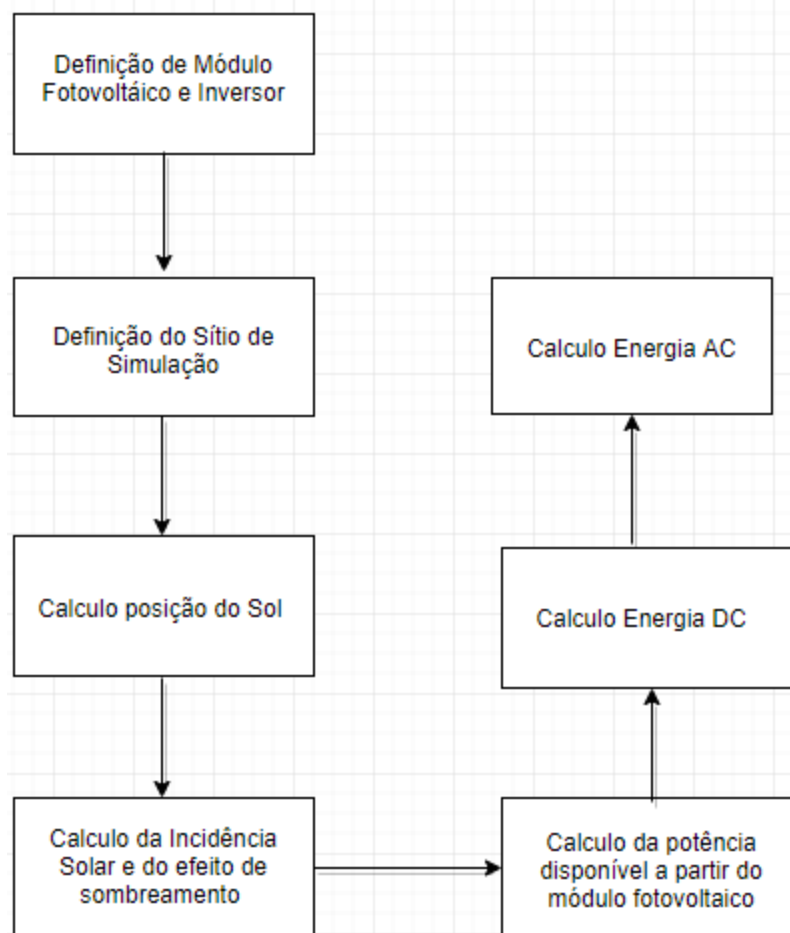


Figura 3. Diagrama sequencial do modelo fotovoltaico do PVLIB (flexível).

Ela foi desenvolvida pelo SNL com o objetivo de minimizar as diferenças nos dimensionamentos fotovoltaicos causados por uso de diferentes modelos. Para efeito deste trabalho, será usado o *script* em Matlab, disponível em <https://pvpmc.sandia.gov/>, modificado.

As principais vantagens desta biblioteca são: fiabilidade em relação as outras ferramentas, acessibilidade e flexibilidade.

Levando em consideração o que foi exposto e com os objetivos do projeto em mente, os softwares CASSYS 1.3.0 e RETScreen foram excluídos da lista de selecionados para a simulação comparativa, portanto, foi feita uma pesquisa entre as ferramentas: SAM 2017.9.5, PVLIB 1.32, PVGIS 5.0 e PVSyst 6.68, onde as duas primeiras serão usadas como objeto de estudo, e os dois últimos como fator comparativo. A seguir será demonstrada a metodologia e o resultado das simulações realizadas.

2.3. Metodologia do Estudo Comparativo

Uma vez que o objetivo deste trabalho é estudar os programas de cálculo energético disponíveis atualmente, afim de desenvolver uma ferramenta de gestão de energia baseada em energia solar, dos seis softwares pré-selecionados, foram selecionados os quatro mais relevantes em termos de fiabilidade e reconhecimento de mercado, dos quais dois são *open source* (que serão analisados mais detalhadamente no futuro) e dois são *closed source*, e, portanto, serão usados para efeito de comparação.

É sabido que outros trabalhos de comparação usam várias métricas para validar o estudo (como facilidade de uso, velocidade de processamento, etc.), porém com objetivo do projeto em mente esses softwares foram comparados apenas em dois aspectos: avaliação de entradas e energia anual (saída) produzida pelas mesmas condições.

Os sistemas foram simulados usando os parâmetros mostrados na Tabela

1.

Tabela 1 – Parâmetros Básicos de Simulação

Conexão com a rede	<i>Grid-Connect</i>
Potência Instalada	80/110/220 Wp
Perdas (quando simplificadas)	14%
Fonte de Dados Meteorológicos	TMY PVGIS CMSAF / INLT SAM
Tecnologia Fotovoltaica	Poly e mono Silício
Sítio de Simulação	MAIA (GMT 0)
Azimuth	0° (SUL)
Slope/Tilt	35°
Inversores	Diversos

A lista completa de inversores e módulos fotovoltaicos utilizados está disponível no anexo. Embora seja sabido que a utilização de diferentes módulos físicos possa afetar o resultado final, foi tomado um cuidado de forma a escolher módulos de tecnologias e características o mais semelhante possível. Não foi possível usar o mesmo modelo para todos os *softwares* devido a incompatibilidade das bibliotecas dos programas.

Usando esses dados como entrada nos *softwares*, os resultados serão aferidos, comparados (usando o *PVSyst* como base) e em seguida avaliados. Os dados que não estão contidos na tabela 1, foram deixados em padrão, ou zerados (quando necessário).

3. RESULTADOS

3.1. Entradas/Saídas

A tabela 2 resume os dados de entrada necessários para os quatro softwares estudados (cinco se considerar a separação entre o modelo detalhado e simplificado do SAM).

Tabela 2 – Dados de Entrada dos *Softwares* Estudados

<i>Software</i>	Dados de Entrada
SAM Detalhado	Dados meteorológicos, Modelo do inversor, Modelo do painel solar, Configuração de ligação dos painéis, Sombreamento, Albedo, Tilt, Azimuth, Perdas devido neve.
SAM Simplificado	Dados meteorológicos, Potência instalada, Razão DC/AC, Eficiência do inversor, Perdas gerais, Tilt, Azimuth.

PVLIB	Dados meteorológicos, Modelo do inversor, Modelo do painel solar, Configuração de ligação dos painéis, Sombreamento, Albedo, Tilt, Azimuth.
PVGIS	Dados meteorológicos, Tecnologia fotovoltaica, Potência instalada, Perdas gerais, Tilt, Azimuth.
PVSyst	Dados meteorológicos, Modelo do inversor, Modelo do painel solar, Configuração de ligação dos painéis, Sombreamento, Albedo, Tilt, Azimuth, Perdas detalhadas (opcional), sombreamento detalhado(opcional).

3.2.Avaliação da Energia Anual

Usando as métricas estabelecidas na etapa 2.3, obtiveram-se os seguintes resultados de energia anual produzida. A variação é referente aos resultados obtidos pelo PVSyst.

Tabela 3 – Resultados Simulação

<i>Software</i>	Dados Meteorológicos	Energia Anual (KWh)	Variação
PVGIS	PVGIS-CMSAF	124	-1,35%
SAM Simplificado	INTL	112	-10,90%
SAM Simplificado	TMY PVGIS	116	-7,72%
SAM Detalhado	INTL	134	6,60%
SAM Detalhado	TMY PVGIS	138	9,79%
PVLIB Matlab	TMY PVGIS	126	0,48%
PVSyst	PVGIS (estimativa mensal) CMSAF	125,7	0,00%

PVGIS	PVGIS-CMSAF	170	3,41%
SAM Simplificado	INTL	155	11,93%
SAM Simplificado	TMY PVGIS	159	9,66%
SAM Detalhado	INTL	165	6,25%
SAM Detalhado	TMY PVGIS	169	3,98%
PVLIB Matlab	TMY PVGIS	173,37	1,49%
PVSyst	PVGIS (estimativa mensal) CMSAF	176	0,00%
PVGIS	PVGIS-CMSAF	340	1,45%
SAM Simplificado	INTL	309	10,43%
SAM Simplificado	TMY PVGIS	318	7,83%
SAM Detalhado	INTL	334	3,19%
SAM Detalhado	TMY PVGIS	342	0,87%
PVLIB Matlab	TMY PVGIS	345,13	-0,04%
PVSyst	PVGIS (estimativa mensal) CMSAF	345	0,00%

4. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Com apoio no que foi exposto, agora serão evidenciadas algumas conclusões a respeito do estudo realizado.

Sobre os arquivos meteorológicos, chegou-se à conclusão que para os objetivos desse projeto é necessário o desenvolvimento de uma metodologia de forma a melhorar a precisão da previsão à curto prazo. Essa métrica pode ser

desenvolvida a partir de uma extrapolação de dados anteriores através de técnicas de análise de dados ou de uma aproximação estocástica usando modelos que exigem entradas mais simplificadas. Mais pesquisa deve ser feita nesse quesito.

Após o estudo das documentações dos softwares de simulação avaliados, observou-se uma similaridade em relação ao modelo físico usado para determinar os potenciais fotovoltaicos. Isso é observável também na análise de entradas, uma vez que a maior parte dessas aplicações usa os mesmos dados de entrada, as divergências se encontram apenas nas precisões de cada *software* (enquanto alguns usam modelos simplificados para avaliar as perdas, outros procuram detalhar melhor a situação).

A principal diferença entre o PVSyst e as demais ferramentas, no quesito de entrada de dados, apresenta-se na facilidade e clareza das informações somada a opção visual/gráfica para cálculo de sombreamento. Fora isso, é possível observar um mesmo número de variáveis de entrada que os demais *softwares* investigados. Já o PVGIS, apesar de ter o menor número de entradas de todos os *softwares* estudados apresentou uma ótima precisão, quando comparada ao PVSyst.

Em relação aos resultados em geral, observou-se uma diminuição das diferenças relativas entre os resultados dos *softwares* conforme a potência instalada foi aumentando.

A partir dos critérios utilizados nessa pesquisa, é possível confirmar que o *software* de simulação mais promissor é o *script* em Matlab que se apoia na biblioteca PVLIB do SNL. Ele usa a mesma quantidade de dados de entrada que as outras ferramentas, é bastante flexível, e apresenta resultados razoáveis em comparação ao PVSyst.

Como objetivos para o futuro, propõe-se um estudo mais aprofundado de técnicas de previsão de radiação solar à curto prazo, de forma a solucionar o problema de gestão energética.