



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA EM LIXÕES NO BRASIL**

ANA LUÍSA ARDUINI FOLSTER

Brasília, dezembro de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA EM LIXÕES NO BRASIL**

ANA LUÍSA ARDUINI FOLSTER

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheira Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Rafael Amaral Shayani, D.Sc., UnB

Orientador

Sergio de Oliveira Frontin, M.Sc., UnB

Examinador interno

Prof. Antonio Cesar Pinho Brasil Junior, D.Sc., UnB

Examinador externo

FICHA CATALOGRÁFICA

FOLSTER, ANA LUÍSA ARDUINI

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM LIXÕES NO BRASIL [Distrito Federal] 2019.

xvi, 65 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheira, Engenharia Elétrica, 2019).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Potencial Energético

2. Lixão

3. Aterro Controlado

4. Geração Fotovoltaica

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FOLSTER, A.L.A. (2019). *POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM LIXÕES NO BRASIL*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: ANA LUÍSA ARDUINI FOLSTER

TÍTULO: POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM LIXÕES NO BRASIL.

GRAU: Engenheira Eletricista ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

ANA LUÍSA ARDUINI FOLSTER

Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento primeiro e maior é ao meu Deus e Senhor, por ter me dado a vida, o perdão e o Amor, também inteligência, força e perseverança em todos os momentos, principalmente nos últimos anos. À minha mãe, Maria Santíssima, um carinho especial, por ter me concedido como presente encontrar dados sem os quais não teria realizado este trabalho.

À minha família, por todo amor, cada qual de sua forma, que me deram tudo para chegar até aqui e continuar muito além, para onde Deus quiser.

Ao meu tão querido amigo, Thiago, por todo o apoio, amor, carinho, paciência e companheirismo nesses anos.

Ao professor Rafael Shayani, por todo o suporte e a ajuda para realização deste trabalho e por ser capaz de enxergar pessoas e suas necessidades.

Aos meus amigos Renata Tomé, Gustavo Leão e frei Rafael Dias, que sempre estiveram ao meu lado.

Aos professores Eleudo Esteves, Elaine Neiva e Marco Aurélio Gonçalves (*in memoriam*), que fizeram destes últimos anos um período melhor e me ensinaram muito mais que matéria.

A todos que estiveram presentes em minha vida e contribuíram de alguma forma com a minha formação, deixo aqui meu agradecimento.

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo estimativo de potencial de geração solar fotovoltaica em lixões. Primeiramente, foram estimados a quantidade de municípios que lançam seus resíduos em lixões ou aterros controlados no próprio município. Calculado um tamanho da amostra representativa dos lixões e aterros, foram medidas as áreas visualmente com o auxílio do *Google Earth* e determinada a área média. Determinou-se, então, a potência e a energia que um sistema fotovoltaico, ocupando diversos percentuais da área média, seria capaz de fornecer com os valores de irradiância e latitude das capitais do Brasil. Os dados das capitais foram extrapolados para as Unidades da Federação e, por fim, para o país todo. Com um aproveitamento de 25% de toda a área de lixões e aterros controlados no Brasil, ter-se-ia uma potência instalada de 1,52 GW e geração de 2,12 TWh/ano, capaz de suprir 0,45% do consumo energético do país em relação ao consumo de 2017.

Palavras-chave: Geração Fotovoltaica, Potencial Energético, Lixão, Aterro Controlado.

ABSTRACT

In this work an estimative study of the potential of photovoltaic solar generation in dumps was performed. First, the number of municipalities that dispose of their waste in controlled dumps or landfills in the municipality itself was estimated. Calculating a representative sample size of dumps and landfills, the areas were measured visually with Google Earth and the average area was determined. It was then determined the power and energy that a photovoltaic system, occupying several percentages of the average area, would be able to provide with the irradiance and latitude values of the capitals of Brazil. The data from the capitals were extrapolated to the Federation Units and, finally, to the whole country. With a 25% utilization of all dumps and controlled landfills areas, there would be an installed power of 1.52 GW and generation of 2.12 TWh/year, capable of supplying 0.45% of the country's energy consumption compared to 2017 consumption.

Keywords: Photovoltaic Generation, Energetic Potential, Dump, Controlled Landfill.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	A QUESTÃO DO LIXO	4
2.1.1	<i>Waste-to-Energy</i> NO MUNDO	5
2.1.2	PANORAMA BRASILEIRO	8
2.2	LIXÕES E ATERROS	9
2.2.1	ENCERRAMENTO DOS LIXÕES	11
2.3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	11
2.3.1	RADIAÇÃO SOLAR	12
2.3.2	EFICIÊNCIA E PERDAS	16
2.4	POTÊNCIA E ENERGIA	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	FLUXOGRAMA	19
3.2	METODOLOGIA	22
3.2.1	PARTE 1 - LIXÕES	22
3.2.2	PARTE 2 - SISTEMA FOTOVOLTAICO	26
3.3	FERRAMENTAS	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	DIMENSIONAMENTO DOS LIXÕES	32
4.1.1	QUANTIDADE DE LIXÕES	32
4.1.2	ÁREA DOS LIXÕES	33
4.2	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	36
4.2.1	POTÊNCIA	40
4.2.2	ENERGIA	43
4.3	ESTUDO DE CASO	46
5	CONCLUSÃO	49

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
APÊNDICES	53
I.1 DADOS OBSERVATÓRIO DOS LIXÕES	53
I.2 DADOS COLETADOS DOS LIXÕES	54
I.3 DADOS DE IRRADIAÇÃO	65

LISTA DE FIGURAS

1.1	Evolução da potência fotovoltaica instalada.	2
2.1	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ONU.	4
2.2	Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos na Europa em 2017.....	6
2.3	Usina fotovoltaica da base aérea Nellis em Las Vegas.	7
2.4	Usina fotovoltaica em Scituate.	8
2.5	Aterro sanitário em níveis.	10
2.6	Curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos.	12
2.7	Média anual da irradiação global.	14
3.1	Fluxograma - Parte 1.....	20
3.2	Fluxograma - Parte 2.....	21
3.3	Curva normal de distribuição de probabilidade.	24
3.4	Módulo fotovoltaico e variáveis de referência. Adaptado.	28
4.1	Medição de área de um lixão.	34
4.2	Histograma de frequência de área.	35
4.3	Curva de sensibilidade da potência.....	42
4.4	Curva de sensibilidade da energia.	44

LISTA DE TABELAS

3.1	Especificações do módulo fotovoltaico escolhido sob condições STC.	27
4.1	Estimativa do número de lixões no Brasil	33
4.2	Dados representativos das amostras dos lixões.....	34
4.3	Percentual de ocupação da área média.	36
4.4	Irradiação solar diária média anual [kWh/m ² .dia].....	37
4.5	Parâmetros de inclinação dos módulos.....	38
4.6	Quantidade de módulos com aproveitamento de 50% da área média.....	39
4.7	Potência instalada por lixão e por UF.....	41
4.8	Potência média das UFs e total do Brasil.....	41
4.9	Potência outorgada pelas fontes de energia existentes no Brasil. Dados de outubro de 2019..	42
4.10	Energia gerada por módulo, por lixão e por UF.....	43
4.11	Energia média das UFs e total do Brasil.....	44
4.12	Consumo por classe consumidora suprido para um aproveitamento de 25% do potencial de geração fotovoltaica em lixões. Valores referentes a 2017.	45
4.13	Consumo suprido de cada região para um aproveitamento de 25% do potencial de geração fotovoltaica em lixões. Valores referentes a 2017.	45
4.14	Consumo residencial médio suprido para um aproveitamento de 25% do potencial de geração fotovoltaica em lixões.	46
5.1	Potência e energia do Brasil.....	49
2	Dados do Observatório dos Lixões.....	53
3	Dados coletados dos lixões.....	54
4	Dados de irradiação das capitais.	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Sistemas Fotovoltaicos

α	Ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico [°]
η_m	Eficiência do módulo fotovoltaico
η_{perdas}	Perdas da usina fotovoltaica
A_{lix}	Área do lixão [m ²]
A_m	Área do módulo fotovoltaico [m ²]
d	Distância entre as fileiras de módulos [m]
E	Energia [Wh]
$E_{BR_real/ano}$	Energia realmente produzida no Brasil anualmente [Wh/ano]
$E_{lix_real/ano}$	Energia realmente produzida por lixão anualmente [Wh/ano]
$E_{m/ano}$	Energia idealmente produzida por módulo anualmente [Wh/ano]
$E_{m/dia}$	Energia idealmente produzida por módulo diariamente [Wh/dia]
$E_{m_real/ano}$	Energia realmente produzida por módulo anualmente [Wh/ano]
E_s	Irradiação diária [Wh/m ² /dia]
$E_{UF_real/ano}$	Energia realmente produzida por Unidade da Federação anualmente [Wh/ano]
I	Corrente [A]
I_{cc}	Corrente de curto-circuito [A]
I_{mp}	Corrente de máxima potência [A]
L_{lix}	Lado do quadrado representativo da área do lixão [m]
L_x, L_y	Dimensões do módulo fotovoltaico [m]
N_{lix}	Número de lixões/aterros controlados
N_m	Número de módulos fotovoltaicos
N_x	Número de fileiras de módulos
N_y	Número de módulos por fileira
P	Potência [W]
P_{lix}	Potência instalada por lixão [W]
P_{mp}	Potência de pico [Wp]
P_u	Potência da usina [W]

P_{UF}	Potência instalada por Unidade da Federação [W]
P_{BR}	Potência instalada no Brasil [W]
t	Tempo
V	Tensão [V]
V_{mp}	Tensão de máxima potência [V]
V_{oc}	Tensão de circuito aberto [V]
x	Projeção horizontal de L_x [m]
z	Projeção vertical de L_x [m]

Estatística e Probabilidade

ϵ	Erro máximo aceitável
μ	Média populacional
\bar{x}	Média amostral
σ	Desvio padrão
τ	Intervalo de confiança
$dm(x)$	Desvio médio
$f(x)$	Função densidade de probabilidade
n	Tamanho da amostra
N	Tamanho da população
N_{lix}	Número de lixões/aterros controlados
N_{mun}	Número de municípios que despejam lixo em lixão/aterro controlado
N_{outr}	Número de municípios que despejam lixo em outro município
N_{prop}	Número de municípios que despejam lixo no próprio município
p	Proporção esperada
$P(x)$	Probabilidade de ocorrência de um evento x
P_{prop}	Probabilidade do município despejar o lixo no próprio município
$var(x)$	Variância
x	Variável aleatória
z	Variável aleatória normalizada
Z_c	Valor crítico para curva normal padronizada

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais,
AM	<i>Air mass</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração da ANEEL
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEB	Companhia Energética de Brasília
CENSOLAR	<i>Centro de Estudios de la Energia Solar</i>
CEWEP	<i>Confederation of European Waste-to-Energy Plants</i>
CNM	Confederação Nacional de Municípios
CO ₂	Dióxido de carbono (gás carbônico)
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
GIS	<i>geographic information system</i>
GLD	Gás do Lixo
IEA	<i>Internacional Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LID	<i>Light Induced Degradation</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OdL	Observatório dos Lixões
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PLS	Projeto de Lei do Senado
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

PVC	Policloreto de polivinila
PVPS	<i>Photovoltaic Power Systems Programme</i>
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
UF	Unidade da Federação
WtE	<i>Waste-to-Energy</i>

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da temperatura mundial e suas inúmeras consequências no meio ambiente, como alterações climáticas e extinção de espécies animais e vegetais, cresceu na população a consciência ambiental de cuidados e preservação. Por outro lado, a demanda por energia cresce a cada ano e as fontes mais difundidas hoje são poluentes ou causadoras de algum tipo de impacto ambiental. A solução é a busca e investimento em energias limpas e renováveis. A própria ONU, em seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, frisou a importância de se buscar fontes de energia limpa.

Energia limpa é aquela que, durante seu processo de produção, fabricação ou consumo, libera poucos resíduos ou gases poluentes geradores do efeito estufa. São exemplos: solar fotovoltaica, eólica, maremotriz, geotérmica, hidráulica, biomassa e nuclear, apesar do risco de contaminação e da geração de resíduos radioativos. No Brasil, a maior parte da energia é proveniente de usinas hidrelétricas.

Conforme os dados da Agência Internacional de Energia - IEA em seu programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica - PVPS, do qual 32 países de todos os continentes fazem parte, não sendo o Brasil um deles, essa fonte de energia tem crescido em ritmo exponencial nos últimos anos, como se observa na Figura 1.1. Tal crescimento pode ser justificado por ser uma fonte de energia renovável e limpa, isto é, tem fonte primária inesgotável - o Sol - e baixa geração de poluentes se comparada a outras fontes de energia. Ademais, os sistemas fotovoltaicos podem ser instalados tanto na forma de grandes usinas quanto de mini e micro usinas, podendo ser instaladas em diversos locais e com aproveitamento da infraestrutura existente.

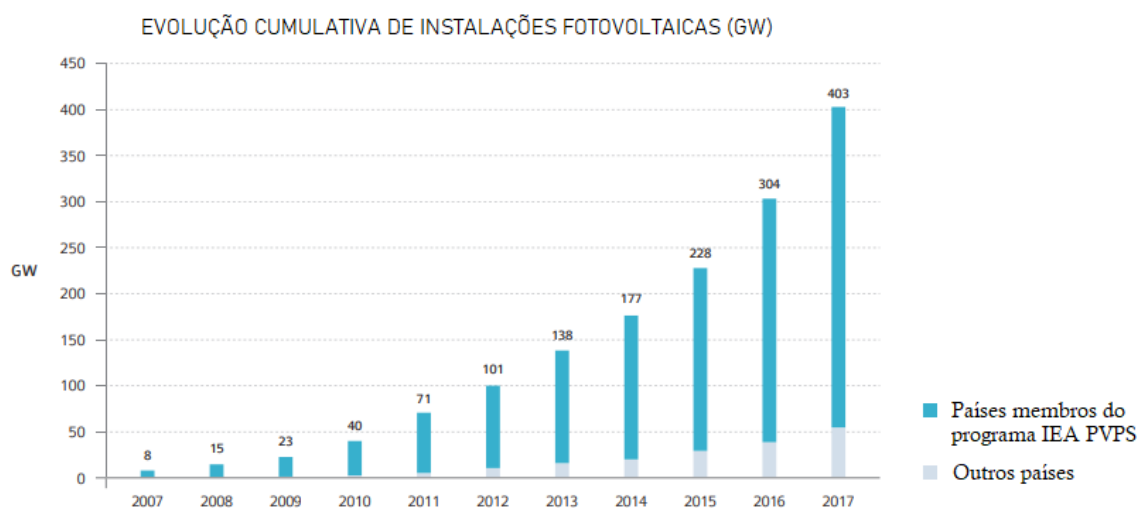


Figura 1.1: Evolução da potência fotovoltaica instalada [1].

Assim, a energia fotovoltaica deu força à geração distribuída e impulsionou a criatividade para alocação nos mais diversos locais. Com o fechamento de lixões, no Brasil devido à Política Nacional de Resíduos Sólidos, estes se tornaram áreas atrativas à instalação, isto porque se caracterizam como áreas potencialmente contaminadas - não podendo ser utilizadas para diversos fins -, desvalorizadas, sem sombreamento e próximas a centros urbanos.

Para determinação do potencial de geração solar fotovoltaica em lixões no Brasil é necessário determinar a área disponível e calcular a potência e a energia que podem ser geradas nesta área. A inexistência de dados precisos sobre cada lixão do país torna necessário o uso de meios estatísticos para definição de uma área média dada a inviabilidade, no âmbito deste trabalho, do estudo individual de cada um. Com a área foram calculadas potência e energia em cada capital, que foram extrapolados para as Unidades da Federação e para todo o país.

O presente trabalho é realizado no âmbito do Programa de P&D da ANEEL, por meio de convênio realizado entre a CEB Geração S.A., CEB Lajeado S.A. e a Fundação Universidade de Brasília para o desenvolvimento do projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado “Hibridização de fontes de geração de energia elétrica como alternativa tecnológica de remediação ambiental de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos – Estudo de caso: Aterro controlado do Jockey Clube”.

Para tanto, este trabalho se divide nas seguintes seções:

- Revisão Bibliográfica - revisão de assuntos e conceitos pertinentes e necessários para a compreensão

das etapas realizadas;

- Materiais e Métodos - descrição detalhada da metodologia e das ferramentas utilizadas;
- Resultados e Discussão - apresentação e discussão dos resultados obtidos e sua relevância.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A QUESTÃO DO LIXO

Um dos grandes problemas que têm atormentado a humanidade nos últimos tempos é a questão do lixo. Em 2018, foi estimado que eram produzidas mais de duas bilhões de toneladas de lixo por ano, quantidade essa que vem crescendo cada vez mais a cada ano e que, apesar de ser parcialmente reciclada, é em sua grande maioria descartada, seguindo para aterros e lixões. Estimou-se que, para suprir as demandas de recursos e absorver todo o lixo gerado, seria necessário cerca de 70% de um outro planeta [2]. A Organização das Nações Unidas – ONU incluiu essa questão em seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS pela promoção da sustentabilidade, tanto na produção e no consumo (ODS 12) quanto nas gestão e organização das cidades (ODS 11).



Figura 2.1: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ONU [3].

A ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, em 2017, revelou uma geração de 78,4 milhões de toneladas de lixo no Brasil entre Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Desse total, 8,80% não foi coletado e, consequentemente, teve um destino impróprio; 53,90% foi destinado a aterros sanitários e 37,30% seguiu para lixões ou aterros controlados. No mesmo ano, da média diária de 43.945 toneladas de embalagens recicláveis em geral (plástico, papel/papelão e alumínio) descartadas, apenas 13.969 toneladas foi de fato reciclado, o

corresponde a 31,79%. De 2016 para 2017 a população aumentou 0,75% enquanto a geração de lixo cresceu 1% [4].

Apresentado primeiramente na Conferência das Nações Unidas sobre o meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92), o chamado Princípio dos 3R's surgiu como uma proposta de solução à questão do lixo. A primeira etapa – Reduzir – consiste em ações que visem à diminuição da geração de resíduos, seja pela minimização do consumo ou pela redução do desperdício. A segunda etapa – Reutilizar – visa à reutilização de embalagens em outros fins, seja pela otimização da utilização antes do descarte final, seja pelo reenvio ao processo produtivo para reutilização no mesmo fim ou recolocação no mercado. Por último, a Reciclagem aparece como forma de aproveitamento dos materiais como matéria-prima para geração de novos produtos, retornando-os para o ciclo produtivo [5]. Futuramente foram acrescentados outros dois R's: repensar e recusar. O primeiro incentivando a reflexão sobre os hábitos de consumo e o segundo visando a recusa de produtos que prejudiquem a saúde e o meio ambiente.

No entanto, mesmo que o Princípio dos 5R's fosse aplicado idealmente em todo o planeta ainda restariam resíduos que seriam lançados em lixões ou aterros, poluindo o solo, a água e o ar presente nas proximidades. Para obter uma solução integrada e completa, surgiu o conceito *Waste-to-Energy* – WtE. Este introduz processos, como incineração controlada e captação dos gases liberados nos lixões, para produção de calor útil, eletricidade e combustível a partir de materiais não recicláveis. Desta forma, todo o lixo gerado, com exceção de lixos tóxicos ou perigosos, é aproveitado [6]. Cabe aqui ressaltar que a incineração de resíduos e outros processos térmicos utilizados resultam em emissões de CO₂ em vez de gás metano, liberado em lixões e aterros, que é vinte e uma vezes mais potente em termos de efeito estufa [7].

2.1.1 *Waste-to-Energy* no mundo

Na Europa, o tratamento do lixo é uma questão de necessidade: o espaço reduzido em relação à quantidade de habitantes torna inviável a existência de grandes lixões e aterros. A CEWEP – *Confederation of European Waste-to-Energy Plants* - é a associação europeia encarregada da operação dos centros WtE, responsáveis por mais de 80% da geração de energia a partir de resíduos no continente. Em sua publicação anual de 2017, a CEWEP contabilizou 96 milhões de toneladas de resíduos termicamente tratados em 492 centros [8]. A Figura 2.2 mostra o percentual de resíduos descartados em aterros (vermelho), aproveitados para geração de energia por *Waste-to-Energy* (amarelo) e reciclados ou compostados (verde) em cada um dos países membros da Confederação baseado nos dados de geração reportados por cada um.

Tratamento municipal de lixo em 2017

CEWEP (28 países) + Suíça, Noruega, Islândia

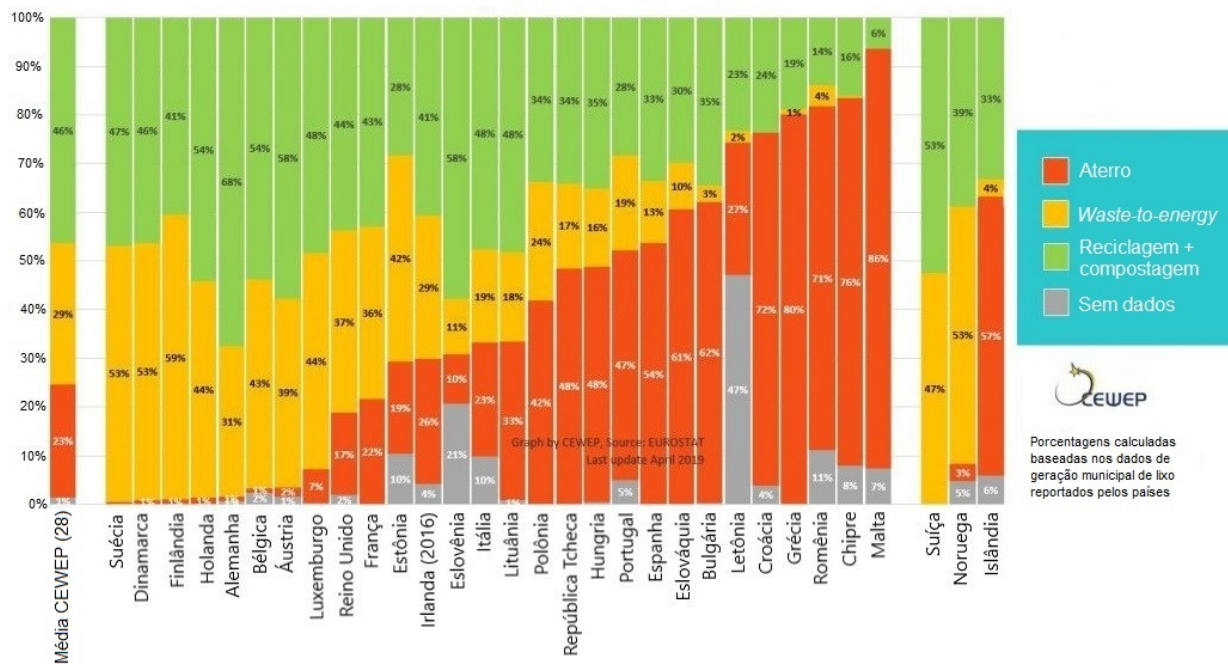


Figura 2.2: Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos na Europa em 2017 [8].

Observa-se, da Figura 2.2 que, da média dos 28 países que compõem a CEWEP, 46% do total de lixo gerado é reciclado ou compostado, 29% segue para ser transformado em energia em centros WtE e 23% é despejado em aterros. Vale observar que alguns dos países mais desenvolvidos, como Suíça, Suécia e Dinamarca tem quase 100% do seu lixo reaproveitado, sendo aproximadamente metade para WtE e metade para reciclagem e compostagem. Países menos desenvolvidos, como Chipre, Malta e Grécia, por outro lado, tem cerca de 80% do seus resíduos lançados em aterros e menos de 1% dos resíduos aproveitados na geração de energia.

Nos Estados Unidos, há atualmente 86 centros de recuperação de energia a partir de resíduos sólidos em 25 estados presentes principalmente no nordeste do país. Esses centros têm capacidade de produção anual de 2,72 GW de potência pelo processamento de mais de 28 milhões de toneladas de lixo. Em média, se produz 550 kWh por tonelada de lixo.

Apesar de ser um país de dimensões continentais, alguns fatores contribuíram para que essa fonte de energia não crescesse tanto quanto na Europa. Diferentemente do que ocorre nos países europeus e no Japão, os EUA são um país de dimensões continentais de modo que vastos aterros e lixões não representam um transtorno tão grande em questão de espaço. Outra questão importante é a rejeição da população uma

vez que nem sempre os centros fazem controle de emissão de fumaça, ganhando reputação de grandes poluentes [9].

Além de centros WtE, nos EUA têm se desenvolvido a implementação de usinas fotovoltaicas em aterros. Em 2013, a EPA – *United States Environmental Protection Agency* e a NREL – *National Renewable Energy Laboratory* publicaram um artigo com boas práticas para implementação de sistemas fotovoltaicos em aterros de RSU contendo direcionamentos de estudos técnicos e econômicos que devem ser feitos previamente.

A iniciativa *Re-powering America's Land* é uma proposta da EPA de instalação de sistemas de energia renovável em terrenos potencialmente contaminados, aterros e minas. Antigas refinarias de petróleo, minas de molibdênio, usinas produtoras de materiais radioativos como urânio e vanádio e aterros sanitários são alguns exemplos de locais cujo terreno foi reaproveitado para instalação de usinas fotovoltaicas nos Estados Unidos. A EPA estima que o potencial solar total dos locais estudados seja de 6,7 TW [10].

Em 2009, foi constatada a existência de mais de 2 mil aterros sanitários transformados em usinas fotovoltaicas. Um caso de sucesso é a *Nellis Air Force Base*, instalação localizada a nordeste de Las Vegas, Nevada. Ativo de 1958 a 1966, o aterro sanitário de 33 acres (0,13 km²) existente continha resíduos da demolição de edifícios, resíduo de tinta, construções de madeira e outros resíduos sólidos. Após encerrado, foi coberto com solo nativo e poços para monitoramento de água que foi dada como contaminada em 2005. Em 2006, a declaração de impacto ambiental determinou que a área do aterro, juntamente com a área desértica adjacente, era adequada para abrigar a usina. Foram instalados 72.416 painéis fotovoltaicos em uma área de 140 acres (0,57 km²) totalizando uma capacidade de 140 MW [11]. A Figura 2.3 mostra a instalação existente.



Figura 2.3: Usina fotovoltaica da base aérea Nellis em Las Vegas [11].

Outro caso de sucesso é o aterro sanitário da cidade de Scituate, Massachusetts. Ativo entre 1976

e 1999, o aterro recebeu resíduos sólidos urbanos, resíduos de construção e resíduos de uma estação de tratamento de águas próxima. Em 2000, foi fechado, sendo instalada uma cobertura e uma estação de transferência de lixo foi construída na propriedade. A proposta inicial de aproveitamento para usos recreacionais com a construção de um campo de basebol foi rejeitada e optou-se pela instalação de uma usina solar fotovoltaica, considerada pela população como uma opção mais viável e economicamente atrativa, pois transformaria um centro de custos em uma fonte de receitas. Em uma análise técnica, o local se apresentava como atrativo para a instalação da usina por ser relativamente plano, sem sombra e levemente inclinado para o sul. Foram instalados 10.560 painéis fotovoltaicos em 12,5 acres (0,05 km²) totalizando 3 MW [12]. A Figura 2.4 mostra a disposição da instalação.



Figura 2.4: Usina fotovoltaica em Scituate [12].

2.1.2 Panorama brasileiro

No Brasil, existem pesquisas e estimativas a respeito do potencial energético do biogás, gás produzido a partir da decomposição de matéria orgânica por bactérias. Este pode ser produzido pela combustão direta, pela gaseificação ou pela decomposição anaeróbica estimulada artificialmente. Segundo o BIG – Banco de Informações de Geração [13] da ANEEL, existem, em 2019, 22 usinas termelétricas de biogás produzido a partir de resíduos urbanos que fornecem 170,25 MW.

No Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de 2014 [7] da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, foram apresentados os resultados das pesquisas do potencial energético de RSU para geração de eletricidade. O potencial a partir da recuperação do Gás do Lixo (GDL) depende de vários fatores

como sua produção e recuperação, mas, conforme modelo do IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, assume-se um fator de recuperação de 20% de GLD para aterros sanitários, o que representa uma quantidade considerável dado que 90% do lixo gerado vai para lixões ou aterros. O potencial a partir da digestão anaeróbica acelerada, tecnologia na qual se aproveita o lixo orgânico e que apresenta como co-produto um composto orgânico que pode ser utilizado como biofertilizante, é de 0,109 MWh/t. Por fim, o potencial a partir da incineração, que consome parte dos materiais recicláveis (principalmente os que possuem alto poder calorífico) juntamente com uma fração de lixo orgânico, considerando uma eficiência de 20%, é de 0,398 MWh/t para um percentual de 86,5% de plásticos e papéis.

A respeito do potencial energético fotovoltaico, a ANEEL informa que há, em 2019, 3.103 usinas em operação que representam, em conjunto, 2,27 GW de potência instalada. No entanto, não há nenhum dado ou estudo do potencial fotovoltaico em lixões ou aterros no Brasil.

2.2 LIXÕES E ATERROS

O lixo gerado diariamente nas residências é coletado pela empresa local contratada e levado, quando não há reciclagem, para ser despejado em lixões ou aterros. Esses locais não estão muito distantes dos centros urbanos, visto que o trajeto de ida e volta é realizado frequentemente, mas também não muito próximos, devido ao incômodo gerado por questões sanitárias, além da desvalorização dos imóveis das proximidades.

Esses depósitos de resíduos urbanos podem ser de três tipos: lixão, aterro sanitário ou aterro controlado. Os lixões são grandes depósitos de lixo a céu aberto cujo solo não sofreu nenhum tratamento prévio e onde há queima indiscriminada de resíduos. Ademais, o chorume - líquido resultado da decomposição dos resíduos - penetra no solo podendo contaminar, além do próprio terreno, um possível lençol freático existente. Além disso, devido à exposição dos resíduos, o local atrai urubus, ratos e moscas, pondo em risco a saúde de catadores informais ali existentes e de moradores das proximidades.

O segundo tipo existente é o aterro sanitário. Diferentemente do que ocorre nos lixões, o solo recebe tratamento prévio como nivelamento, compactação e impermeabilização com materiais inertes como argila e mantas de PVC. Além disso, contam com captação de chorume para tratamento e de gases liberados, como metano, para posterior queima. Conjuntamente, é necessário que haja constante monitoramento do tipo de resíduo que chega para que não receba lixos perigosos, e do solo e da água próximos para garantir

a pureza destes.

Os aterros controlados representam situações intermediárias entre lixões e aterros sanitários, sendo normalmente um lixão que sofreu remediações como cercamento e algum tipo de cuidado com os novos resíduos que chegam, como proibição de lixo radioativo ou alocação do lixo hospitalar em uma zona específica para proteção dos catadores. Não tendo nenhum tipo de preparação prévia do terreno, aqui também há contato direto do lixo com o solo, mas há captação do chorume que, apesar de não ser tratado, é levado à superfície, evitando a contaminação do solo e de água nas proximidades. A superfície recebe diariamente uma cobertura de argila ou saibro de modo que o lixo não fica exposto, evitando assim o mau cheiro e a presença de animais [14].

Por uma questão de espaço e estabilidade, aterros e lixões, quando recebem algum tipo de cuidado, têm o formato chamado "bolo de noiva": o lixo é compactado, coberto com resíduos de construção e arranjado em níveis cujo diâmetro dos superiores é menor que dos inferiores e de bordas inclinadas, chamadas taludes, em até 45° dependendo da estabilidade do solo. A Figura 2.5 é um exemplo de aterro sanitário cuja construção foi bem-feita em níveis com taludes.



Figura 2.5: Aterro sanitário em níveis [15].

No entanto, é importante citar que existem muitos lixões que não recebem nenhum tipo de cuidado, tendo o lixo simplesmente lançado em montes pelo terreno.

2.2.1 Encerramento dos lixões

Em 2010, foi aprovada a lei nº 12.305 [16] voltada para criação de planos de gestão de RSU, nos quais devem conter obrigatoriamente "metas para eliminação e recuperação de lixões", isto é, os lixões devem ser fechados e substituídos por aterros sanitários ou, ao menos, transformados em aterros controlados. Ademais percebe-se um incentivo ao WtE por metas de "aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos". O prazo inicial de quatro anos para adequação à Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS foi estendido pelo projeto de lei PLS 425/2014 para até 2021, com datas distintas para municípios de diferentes tamanhos [17].

Apesar da extensão do prazo, diversos lixões vêm sendo fechados pelo país e Planos de Gestão de Resíduos Sólidos estaduais e municipais sendo postos em prática. O fechamento de um lixão implica não apenas o cessamento de recebimento de resíduos mas alguns cuidados com o solo e com o lixo, já que este continua sendo um risco à saúde. Exceto no caso da realocação dos resíduos para um aterro sanitário, no encerramento é feita uma cobertura de solo e de vegetação, além da instalação de sistemas de captação de gás e chorume, permitindo uma futura utilização do espaço [18].

Por essa conjuntura de fatores, se iniciaram pesquisas, no âmbito do Programa de P&D da ANEEL, como o Projeto RAEESA - Remediação Ambiental Energética e Sustentável para Aterros, da Companhia Energética de Brasília em parceria com a Universidade de Brasília, que estuda a implementação de fontes de energia renováveis, como usinas fotovoltaicas, em áreas de lixões encerrados e que inspirou a realização do presente trabalho.

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Base de todo o sistema, o efeito fotovoltaico consiste na transformação da radiação eletromagnética proveniente do Sol em energia elétrica por meio da criação de uma diferença de potencial entre materiais semicondutores colocados juntos formando uma célula. Os semicondutores são dopados, um positivamente e o outro negativamente, gerando uma zona de depleção, a qual os elétrons são capazes de atravessar quando são excitados pela energia oriunda do Sol. Se houver um caminho elétrico ligando dois eletrodos colocados um em cada semicondutor surgirá uma corrente elétrica. O semicondutor em questão pode ser de diversos materiais, sendo geralmente de silício policristalino: formação mais economicamente viável que praticamente domina o mercado atual.

Os módulos, placas ou painéis fotovoltaicos são formados por várias células fotovoltaicas ligadas em série e disponíveis comercialmente. Estes, por sua vez, podem ser conectados a outros em série ou em paralelo para se conseguir a corrente e a tensão desejadas para a usina projetada. Cada módulo tem corrente, tensão e potência especificados pelo fabricante e, assim como qualquer componente eletrônico, quando colocados em série somam-se as tensões e em paralelo somam-se as correntes [19].

Em suas fichas técnicas, são encontrados os valores de corrente de curto-circuito I_{cc} , tensão de circuito aberto V_{oc} , potência de pico P_{mp} , corrente de máxima potência I_{mp} e tensão de máxima potência V_{mp} . As curvas IV e PV dos módulos presentes na Figura 2.6 descrevem a correlação entre esses valores. Grande parte dos inversores – equipamento utilizado para transformação de corrente contínua CC gerada pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada CA compatível com a rede elétrica – possuem um controlador integrado responsável por maximizar a potência gerada pela usina pelo controle da tensão e da corrente de saída, mantendo-os sempre próximos de V_{mp} e I_{mp} . Esse controlador é chamado de rastreador de máxima potência – MPPT.

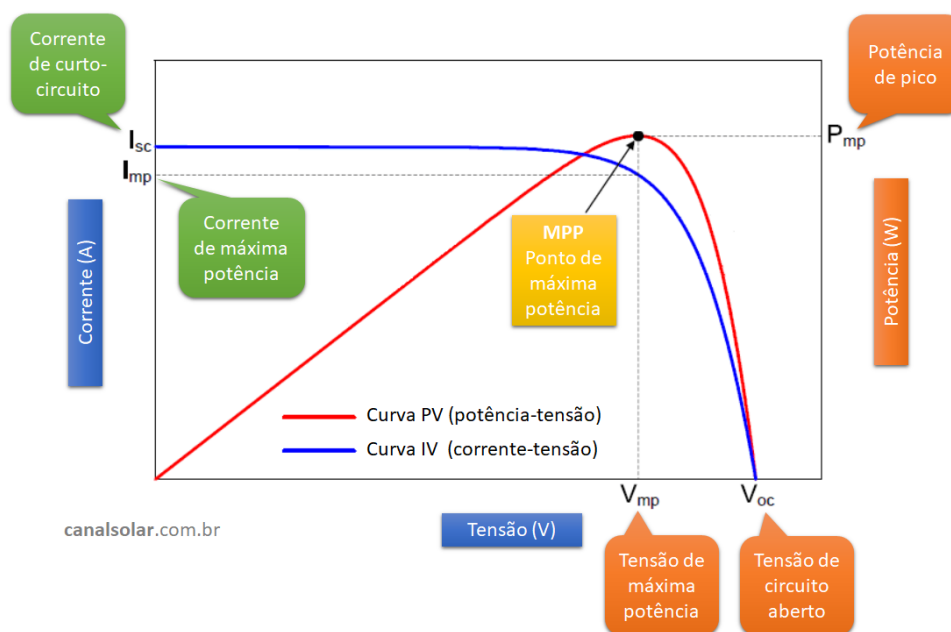


Figura 2.6: Curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos [20].

2.3.1 Radiação solar

A radiação solar é a fonte primária da geração fotovoltaica. A chamada radiação global é a soma da radiação direta e da radiação difusa. A primeira se refere ao conjunto de raios solares paralelos que atingem a superfície terrestre com diferentes inclinações dependendo da localidade e a segunda se refere aos raios

solares que chegam indiretamente devido a difrações e reflexões sofridas na atmosfera.

A radiação é descrita por duas grandezas: irradiância e irradiação. A irradiância solar, expressa em W/m^2 , é a grandeza que descreve a potência recebida por metro quadrado de superfície plana. A irradiação, expressa em Wh/m^2 , expressa a quantidade de energia solar incidente sobre determinada área de superfície plana ao longo de determinado intervalo de tempo, isto é, a densidade de energia por área por tempo [19].

Existem diversos bancos de dados com os valores médios das irradiações de todo o planeta. No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE lançou um Atlas Brasileiro de Energia Solar [21] no qual descreve todo o processo e os resultados dos trabalhos para obtenção de mapas solarimétricos, como o mostrado na Figura 2.7. Outro banco de dados é o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito – CRESEB [22], plataforma digital que oferece os dados de irradiação triangulados de estações meteorológicas espalhadas pelo país para qualquer localização brasileira cujas coordenadas geográficas sejam inseridas.

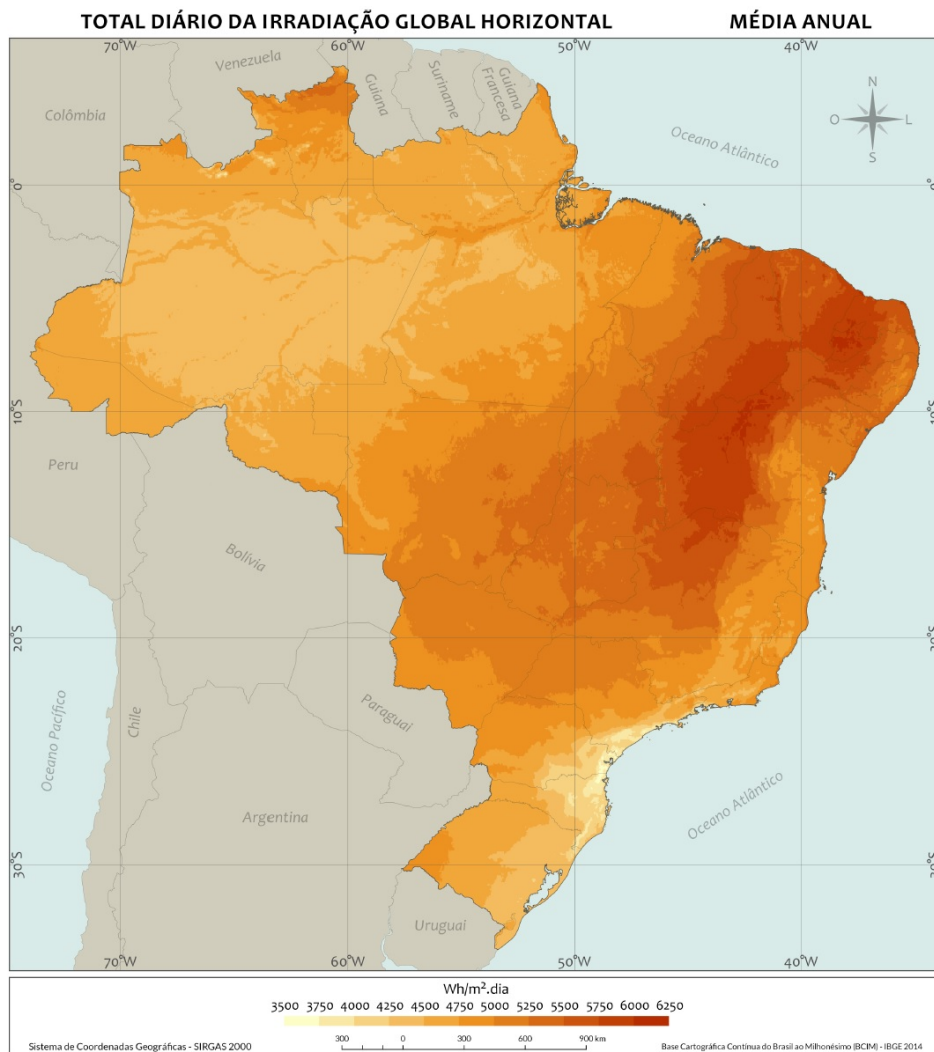


Figura 2.7: Média anual da irradiação global [21].

2.3.1.1 Ângulo azimutal

Ângulo azimutal é o ângulo horizontal entre a posição do Sol e o norte geográfico, para observadores no hemisfério sul, ou entre a posição do Sol e o sul geográfico, para observadores no hemisfério norte. O momento em que esse ângulo é nulo corresponde à metade da jornada solar, não necessariamente meio-dia do relógio. Considerando essa variação, a posição de instalação dos painéis, quando não se têm rastreadores solares, deve ser tal que esteja ao máximo voltada para o Sol.

Se um módulo for instalado para o leste, os raios solares do período da manhã serão bem aproveitados, mas, no período da tarde, serão desperdiçados por incidirem na parte de trás do módulo. Da mesma forma, um módulo voltado para oeste maximizará o aproveitamento no período da tarde e terá baixo ou nenhum rendimento pela manhã. Uma solução é apontar para o norte geográfico, no caso do hemisfério sul, de

modo que aproveitará principalmente a parte central do dia, mas sem desprezar o período da manhã ou da tarde. Essa posição corresponde ao ângulo azimutal nulo [19].

2.3.1.2 Ângulo de inclinação

É importante também observar a melhor inclinação dos módulos a fim de maximizar a geração. O melhor aproveitamento da energia solar ocorre quando os raios incidem perpendicularmente à superfície. Um módulo de área A_m com inclinação α tem, para fins de incidência solar vertical, uma área útil de $A_m * \cos(\alpha)$ que é maximizada quando $\alpha = 0^\circ$.

No entanto, devido ao formato da Terra, os raios solares incidem com diferentes angulações em cada latitude. Não há um consenso sobre a angulação ideal para a instalação dos módulos fotovoltaicos. Alguns autores sugerem que a angulação seja igual à latitude, outros propõem soma de constantes à latitude, pode-se ainda se basear no ângulo de maior irradiação média local quando se tem tal informação.

2.3.1.3 Altura solar

Além disso, deve-se observar também a alteração da altura solar (ângulo vertical entre a trajetória do sol e o plano horizontal que o observador se encontra) ao longo do ano. Nos meses de verão, o Sol percorre uma trajetória mais alta, incidindo mais perpendicularmente sobre a superfície terrestre. Já no inverno, o Sol percorre uma trajetória mais próxima à linha do horizonte. Isso ocorre em consequência da inclinação do eixo de rotação da Terra e, por isso, ocorre a incidência perpendicular dos raios solares sobre o Trópico de Capricórnio no Solstício de Verão e sobre o Trópico de Câncer no Solstício de Inverno do hemisfério sul.

No caso de uma estrutura fixa, não se pode alterar a inclinação ao longo do ano, de modo que é necessário que se faça uma avaliação da melhor inclinação para o local. Usualmente se opta por uma inclinação média que atenda razoavelmente todos os meses do ano.

2.3.1.4 Sombreamento

Outra questão que influencia no posicionamento dos módulos fotovoltaicos é a questão do sombreamento. A corrente gerada por cada célula fotovoltaica é diretamente proporcional à irradiação solar incidente sobre ela, isto é, se houver pouca ou nenhuma incidência, a corrente tornar-se-á pequena ou nula.

Como dentro de um módulo as células são ligadas em série, o sombreamento em uma delas compromete todo o conjunto. Para minimizar esse efeito, foram acrescentados os diodos de *bypass* (ou de passagem) ligados em paralelo com as células, que se polarizam e curto-circuitam as células sombreadas quando a corrente gerada cai abaixo de um valor definido como geração padrão. Por questões econômicas não é instalado um diodo para cada célula, mas alguns diodos por módulo já são capazes de contornar satisfatoriamente as perdas geradas por sombreamento.

Na tentativa de evitar sombreamentos, as usinas fotovoltaicas devem preferencialmente estar distantes de árvores ou edifícios mais altos e ter espaçamento entre as fileiras de módulos de modo a não comprometer a geração ao longo do dia. Esse espaçamento pode ser calculado tanto a partir de uma fórmula fixa, relacionada à inclinação, quanto a partir de um estudo mais refinado da relação inclinação-sombreamento-distanciamento que maximize a geração na área da usina. Villalva [19] sugere a que o distanciamento d seja dado pela Equação 2.1, em que L_x é o comprimento do módulo e α é o ângulo de inclinação do módulo.

$$d = 3,5 * L_x * \text{sen}(\alpha) \quad (2.1)$$

2.3.2 Eficiência e perdas

A eficiência fornecida pelo fabricante nas condições padrão usada pela indústria – STC: 1000 W/m², AM 1.5 e temperatura de célula 25°C – é dada pela Equação 2.2, em que η_m é a eficiência do módulo, P_{mp} é a potência de pico do módulo em W e A_m é a área do módulo em m². O número 1000 representa a irradiância padrão.

$$\eta_m = \frac{P_{mp}}{A_m * 1000} \quad (2.2)$$

Essa eficiência, entretanto, não representa a eficiência total da instalação. Temperatura, poeira, resistência elétrica interna das instalações, inversor e degradação do módulo com o tempo são alguns fatores que influenciam na eficiência final.

A temperatura é um ponto de grande influência na geração do módulo. Inversamente proporcional à tensão e sem influência na corrente, quanto maior a temperatura, menor é a potência fornecida. A temperatura em questão é a da placa, que sofre influência da temperatura ambiente bem como da forma de

instalação, pelo fluxo de ar que permite passar. Cada fabricante fornece a perda de seu painel em relação à temperatura.

A poeira se deposita sobre os módulos formando uma barreira à passagem dos raios solares, reduzindo assim a capacidade de geração. A NREL [23] sugere um valor médio de 5% (2 – 25%) de perda por deposição de poeira. Dejetos de pássaros também são contados nessa categoria. O valor real de cada usina dependerá das condições climáticas do local bem como da frequência dos cuidados dedicados à limpeza dos módulos.

Perdas ôhmicas estão presentes tanto no lado CA quanto no lado CC da instalação. Isso ocorre devido à resistência existente intrinsecamente em todo meio que a energia percorre, inclusive nos cabos. A NREL [23] sugere o valor de 2% como perda típica para o cabeamento do lado CC e 1% para o lado CA. Neste projeto foi considerado apenas o lado CC, isto é, dos módulos até o inversor.

Com o tempo, o módulo fotovoltaico vai perdendo eficiência devido a desgastes causados por expansão e contração térmica, luz ultravioleta, danos causados por partículas sopradas pelo vento além da descoloração das camadas sobre as células, o que reduz a luz disponível. A degradação de cada módulo é fornecida pelo fabricante em perda percentual por ano [24].

A degradação induzida pela luz - LID se refere à degradação sofrida naturalmente pelo módulo nos primeiros dias de exposição à luz solar. Essa é uma das perdas sofridas pelo módulo logo no início de seu uso. Os fabricantes fazem indicação da eficiência da instalação no primeiro ano e da perda sofrida por ano subsequente.

Cada inversor tem sua própria eficiência, que deve ser considerada na determinação da geração da usina. Essa eficiência se refere à capacidade de transformar corrente contínua em alternada e depende da efetividade do MPPT, da qualidade dos componentes, da lógica de controle, entre outros. Esse valor também é sugerido pela NREL [23] como representando uma perda de 4%.

2.4 POTÊNCIA E ENERGIA

Potência corresponde à capacidade de realização de trabalho em um determinado instante. Nas fichas técnicas dos módulos fotovoltaicos vêm descrita a potência máxima que estes são capazes de gerar em determinadas condições considerando suas eficiências.

Energia, por sua vez, se refere à potência gerada em um determinado espaço de tempo e pode ser descrita essencialmente pela Equação 2.3, sendo E a energia, P a potência e t_1 e t_2 o início e o fim do período de interesse, respectivamente.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt \quad (2.3)$$

A potência de uma usina fotovoltaica P_u pode ser calculada simplificadamente pelo produto da potência máxima de cada módulo P_{mp} (supondo que o inversor possui MPPT) pelo número de módulos N_m , conforme Equação 2.4.

$$P_u = P_{mp} * N_m \quad (2.4)$$

A energia, por sua vez, pode ser calculada pela Equação 2.5 em que $E_{m/dia}$ é a energia produzida por um módulo diariamente [Wh/dia], E_s é a irradiação diária [Wh/m².dia], A_m é a área do módulo [m²] e η_m é a eficiência do módulo.

$$E_{m/dia} = E_s * A_m * \eta_m \quad (2.5)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas a metodologia e as ferramentas utilizadas para realização deste trabalho. A metodologia foi subdividida em duas etapas visto que há dois objetivos a serem atingidos. Na primeira parte, visando a determinação da área de lixões existentes no país, é determinada a quantidade de lixões que terão suas áreas medidas para estimativa da área total existente no país. Na segunda parte, com dados de área disponível, irradiância e dados específicos do módulo fotovoltaico a ser utilizado, são calculadas a potência e a energia geradas, contemplando o objetivo principal do trabalho. Por fim, são apresentadas as ferramentas e *softwares* utilizados durante os trabalhos.

3.1 FLUXOGRAMA

O fluxograma do projeto, ilustrado nas Figuras 3.1 e 3.2, contempla as etapas de obtenção e processamento dos dados. O esquemático foi subdividido em duas etapas, de modo que na primeira parte são descritos os procedimentos diretamente relacionados aos lixões, como obtenção das quantidades e áreas, e na segunda parte são descritos os procedimentos relacionados às usinas fotovoltaicas, como dimensionamento e cálculos de potência e energia.

Os fluxogramas são interligados pelos dados de quantidade de lixões existentes e área média destes, representados respectivamente pelos círculos de conteúdo n e A . As entradas do projeto, isto é, dados existentes que não precisam ser calculados, são o número de municípios que jogam seu lixo em lixões e os que jogam dentro do próprio município, as coordenadas geográficas e dados de irradiação das capitais, os dados do módulo fotovoltaico utilizado e os valores de perdas consideradas nas usinas fotovoltaicas. Como resultados tem-se a quantidade e a área média dos lixões existentes no país (parte 1), bem como os valores de potência e energia passíveis de serem geradas com a implementação de sistemas fotovoltaicos nos lixões existentes (parte 2).

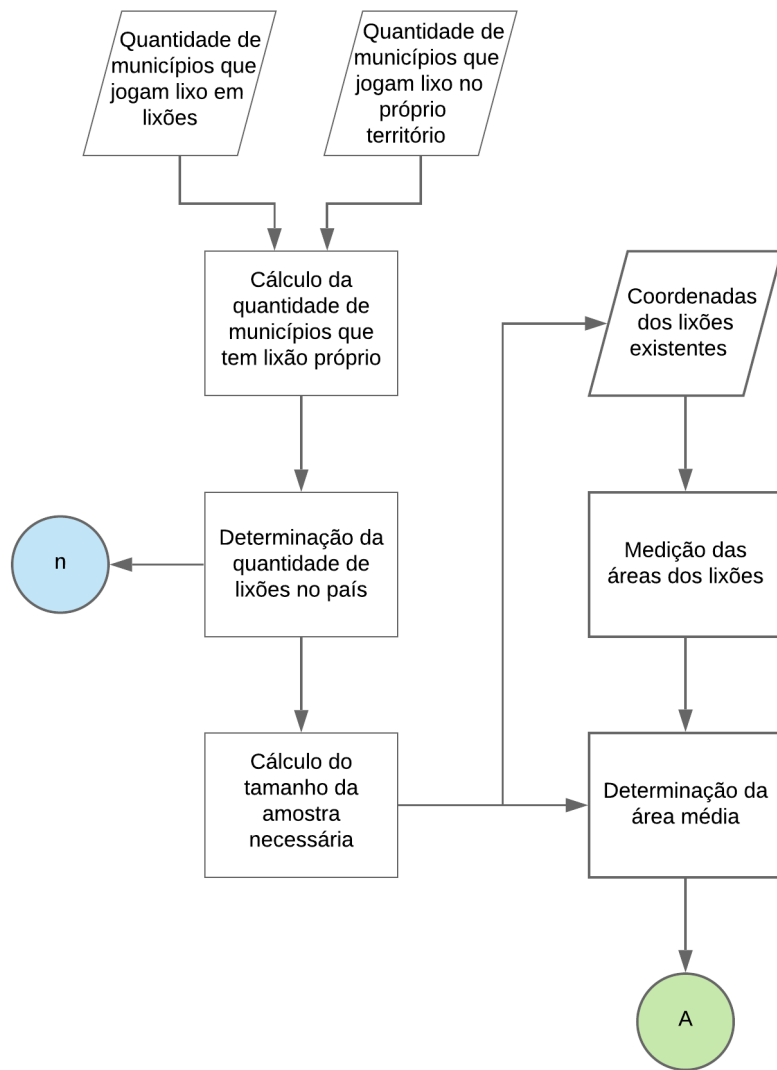


Figura 3.1: Fluxograma - Parte 1.

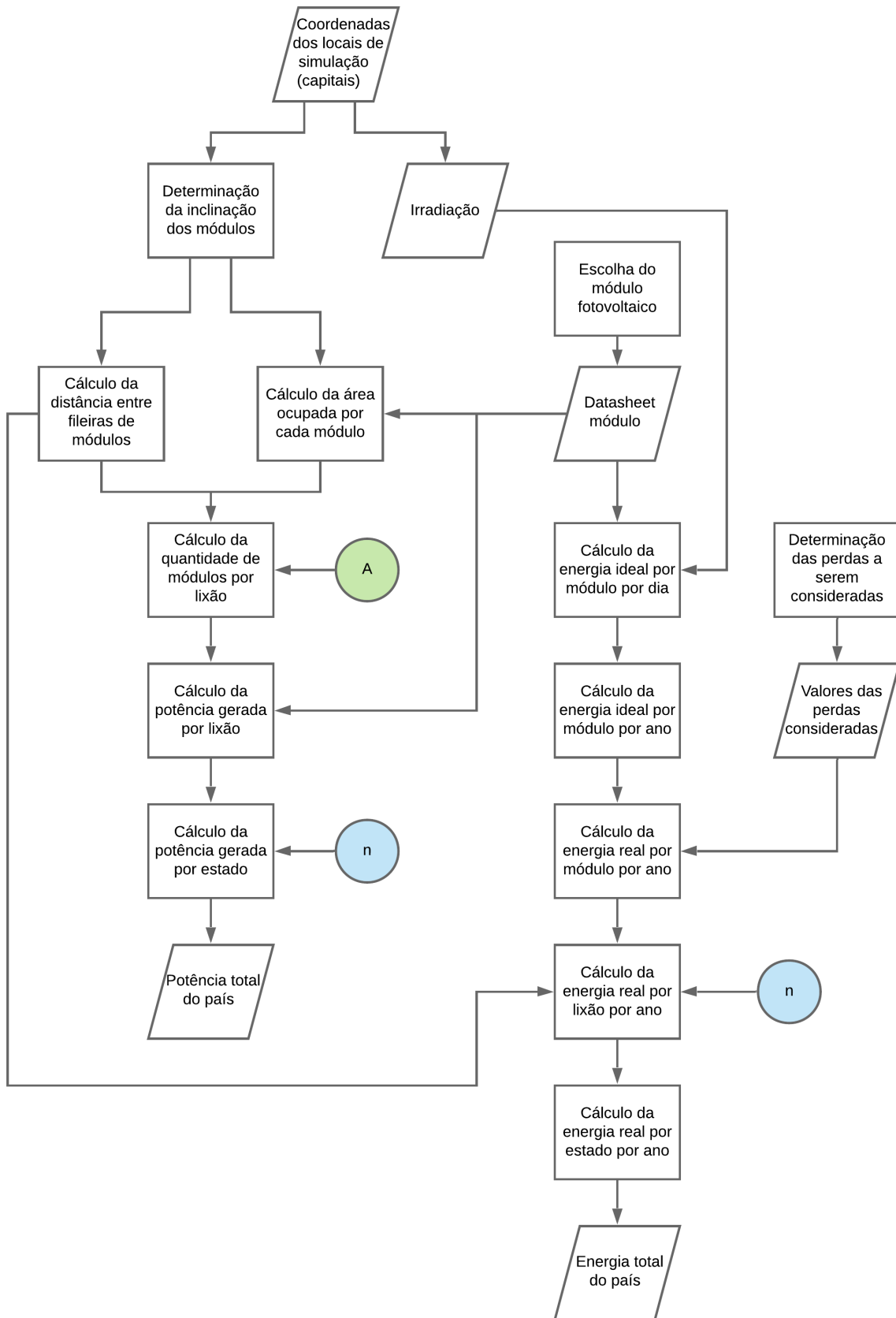


Figura 3.2: Fluxograma - Parte 2.

3.2 METODOLOGIA

As etapas do projetos foram subdivididas em atividades diretamente relacionadas aos lixões e atividades diretamente relacionadas ao sistema fotovoltaico, que depende essencialmente dos dados obtidos na etapa anterior, como quantidade de lixões e a área média dos terrenos sobre os quais serão projetadas as usinas.

3.2.1 Parte 1 - lixões

3.2.1.1 Determinação da quantidade de lixões

O Observatório dos Lixões - OdL [25], plataforma interativa da Confederação Nacional dos Municípios - CNM, exibe dados ligados a lixões e aterros em todos os municípios do Brasil. Dentre os mapas existentes, dois são de interesse para essa pesquisa: “Tipo de Disposição do Lixo” e “Destinação Final do Lixo”. No primeiro, os municípios são divididos entre os que lançam seus resíduos em aterros sanitários, em lixões/aterros controlados e aqueles dos quais não se tem informação. No segundo, os municípios são categorizados entre os que despejam seu lixo no próprio município, os que despejam em outro município e aqueles dos quais não se tem informação.

Contatando-se a CNM, foi informado que usualmente os municípios que ainda não contam com aterros sanitários possuem apenas um depósito de resíduos categorizado como lixão que, para eles, é o mesmo de um aterro controlado. Foi esclarecido também que em praticamente todos os municípios pode-se observar a existência de locais de descarte irregular de resíduos em terrenos baldios, mas que não são considerados como lixões e sim pontos irregulares de descarte de resíduos. Como não há uma diferenciação entre lixões e aterros controlados nesta que é a principal fonte de dados desta pesquisa, para fins de estimativa, ambos serão tratados como sendo lixões.

Foi avaliado, primeiramente, o percentual de municípios por Unidade da Federação - UF que despejam o lixo em seu próprio município, o que significa que possuem aterro ou lixão próprio, supondo que os que despejam em outros municípios o fazem por não possuírem local próprio dentro de seu território. Foram desprezados os municípios dos quais não se tem informação a esse respeito, o que, estatisticamente, significa assumir que se mantém a mesma proporção também neste grupo.

A Equação 3.1 descreve os cálculos realizados para obter tal proporção P_{prop} em cada UF, sendo

N_{prop} o número de municípios que despejam lixo em seu próprio município e N_{outr} o que o fazem em outro município.

$$P_{prop} = \frac{N_{prop}}{N_{prop} + N_{outr}} \quad (3.1)$$

No caso do tipo de disposição do lixo, a incerteza relacionada ao grupo denominado “Não Informado” fez com que fossem excluídos da contagem e os municípios contabilizados como possuindo lixão/aterro controlado fossem apenas os devidamente identificados.

Assim, pode-se estimar a quantidade de lixões/aterros controlados em cada UF por meio da Equação 3.2, em que N_{mun} é a quantidade de municípios que despejam seu lixo em lixões/aterros controlados e N_{lix} é o número de lixões.

$$N_{lix} = N_{mun} * P_{prop} \quad (3.2)$$

3.2.1.2 Determinação do tamanho da amostra

O total de lixões/aterros controlados estimados no Brasil, entretanto, é uma quantidade muito grande, inviabilizando, dentro do escopo desta pesquisa, o trabalho de medição de cada um deles. É necessária, portanto, a determinação de uma amostra representativa da população e, para isso, supõe-se que as áreas dos lixões e aterros controlados seguem a distribuição de probabilidade normal.

A função normal, como descrita na Figura 3.3, tem área total sob a curva de 1 em que todos os pontos do eixo tem probabilidade maior que 0, sendo a média μ o ponto com maior probabilidade e a forma de dispersão da curva dada em função do desvio padrão σ . Para obtenção de uma amostra pode-se delimitar um percentual τ da curva a ser analisada e a esta faixa é dado o nome de intervalo de confiança.

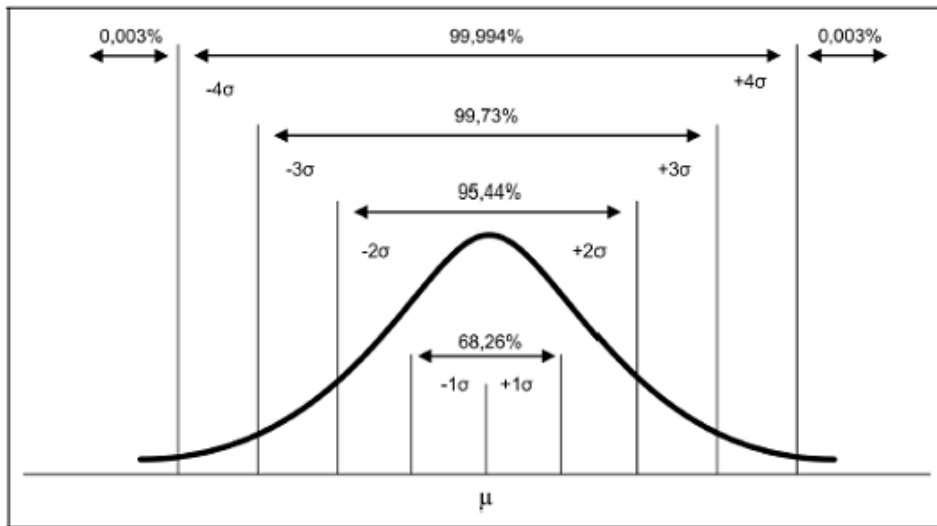


Figura 3.3: Curva normal de distribuição de probabilidade [26].

Uma forma de análise deste modelo é a padronização da curva definindo $\mu = 0$ e $\sigma = 1$. Para tanto, é necessária alteração da variável x para z conforme a Equação 3.3. A região em que se encontram $\tau\%$ das amostras, é dada em função do valor crítico Z_c tal que $P(0 \leq z \leq Z_c) = \tau/2$.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.3)$$

Definido um intervalo de confiança τ , o erro máximo admitido ϵ , tal que $\bar{x} - \epsilon < \mu < \bar{x} + \epsilon$, pode ser definido conforme descrito pela Equação 3.4, sendo n o tamanho da amostra.

$$\epsilon = Z_c * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.4)$$

Na Equação 3.4, no entanto, admite-se uma população infinita. Para uma população finita, é necessária uma adequação em ϵ com um fator de correção para população finita N como descrito na equação 3.5.

$$\epsilon = Z_c * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{N - n}{N - 1}} \quad (3.5)$$

Como, a princípio, σ é desconhecido, pode-se substituí-lo por $\sigma = \sqrt{p * (1 - p)}$, em que p é a proporção esperada que, sendo desconhecida, é assumida como $p = 0,5$. Assim, o tamanho da amostra necessária é dada pela Equação 3.6 [27].

$$n = \frac{N * Z_c^2 * p(1 - p)}{(N - 1) * \epsilon^2 + Z_c^2 * p(1 - p)} \quad (3.6)$$

Foi definido um nível de confiança de 95% ($Z_c = 1,96$), erro máximo admitido de 5% e proporção esperada p de 50%, visto que não se tem qualquer informação sobre o valor que se espera encontrar.

3.2.1.3 Determinação da área média

Pela inviabilidade de localização dos lixões a partir apenas das imagens de satélite que se tem do país, foi realizada uma busca por algum banco de dados que contivesse informações a respeito da posição de cada um deles. Em 2017, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS fez uma publicação de Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos [28] em cuja planilha de Cadastro Nacional de Unidades se encontram as coordenadas geográficas de alguns lixões e aterros controlados no país. Contudo, algumas informações presentes neste arquivo divergem das informações encontradas no OdL. Em vista disso, foram filtrados apenas os municípios que, em ambas as fontes, constassem como possuidores de lixão ou aterro controlado.

Com as coordenadas e o auxílio da ferramenta de medição do *Google Earth*, foram medidas as áreas dos aterros e lixões até que se obtivesse a quantidade definida como amostra.

Para obtenção valores representativos da amostra utiliza-se: moda (valor apresentado com maior frequência na amostra), mediana (valor que apresenta posição central dos dados dispostos em ordem crescente) e média μ (razão entre a soma dos dados x e a quantidade destes n , Equação 3.7). O valor médio foi usado nos cálculos de dimensionamento das usinas fotovoltaicas.

$$\mu = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (3.7)$$

Todavia, amostras com dispersões bastante distintas podem ter as mesmas medidas centrais, o que demanda medidas capazes de medir essa variabilidade. A soma dos desvios dos valores em relação à média amostral $x_i - \bar{x}$ não gera bons resultados porque são somados valores positivos e negativos que se anulam. Portanto, surgem como soluções a média do módulo dos desvios chamado desvio médio $dm(x)$, Equação 3.8, e do quadrado dos desvios, variância $var(x)$, Equação 3.9. Como a dimensão da variância é igual ao quadrado da dimensão dos dados, define-se como desvio padrão σ a raiz quadrada positiva da

variância, Equação 3.10.

$$dm(x) = \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}|}{n} \quad (3.8)$$

$$var(x) = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (3.9)$$

$$\sigma(x) = \sqrt{var(x)} \quad (3.10)$$

Como visto na Seção 2.2, lixões e aterros podem ser formados em níveis ou não ter nenhum formato definido. A área útil para instalação dos módulos fotovoltaicos, no caso da disposição "bolo de noiva", é apenas o plano formado pelo nível mais superior, visto que nos demais níveis há sombreamento devido aos taludes. Portanto, a área média calculada, que corresponde a 100% do terreno, não condiz com a realidade de área útil nos terrenos de lixões espalhados pelo país.

3.2.2 Parte 2 - sistema fotovoltaico

3.2.2.1 Determinação do módulo e das perdas

Analisado o terreno, o passo seguinte foi definir questões básicas do sistema fotovoltaico como o módulo a ser utilizado e as perdas a serem consideradas.

Para tanto, são necessárias certas considerações:

- Dada a improbabilidade de utilização de 100% da área dos lixões e aterros, os valores calculados e apresentados no Capítulo 4 correspondem a 50% da área média, seguidos por gráficos de sensibilidade de 0 a 100% de aproveitamento do terreno para a potência e a energia fornecidas;
- Como o objetivo deste trabalho se restringe à potência e à energia que as usinas são capazes de fornecer, é trabalhado apenas o lado CC da instalação. Desta forma, transformadores e linhas de transmissão não são abordados;
- O inversor, que divide a instalação em CC e CA, não foi diretamente abordado mas sua eficiência foi considerada nos cálculos como 96%, conforme as definições da NREL [23];

- As perdas relacionadas à poeira e resistência elétrica do cabeamento foram consideradas como relevantes aos cálculos deste trabalho e definidas como -5% e -2% respectivamente conforme definições da NREL [23].

De um fabricante bastante reconhecido no mercado há alguns anos, o módulo fotovoltaico escolhido foi o MAXPOWER CS6U-335P da Canadian Solar [29]. Algumas características de interesse são descritas na Tabela 3.1.

Módulo Fotovoltaico	
Modelo	MAXPOWER CS6U - 335P
Dimensões	1960 x 992 x 35 mm
P_{mp}	335 W
η_m	17,23%

Tabela 3.1: Especificações do módulo fotovoltaico escolhido sob condições STC.

A Declaração de Garantia Limitada da Canadian Solar [30] garante, para módulos de silício policristalino, durante o primeiro ano, uma potência de saída não menor que 97,5% da potência tabelada; do 2º ao 25º ano, a declinação de potência não será maior que 0,7% ao ano; e, ao final do 25º ano, a potência de saída não será menor que 80,7% da tabelada. Foi utilizado o valor de perda de -10,27%, referente à média dos 25 primeiros anos.

A ficha técnica do módulo [29] fornece um dado de perda em relação à temperatura de $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$. A eficiência do módulo de 17,23% refere-se à condição de 25°C como temperatura de placa. No Brasil, as temperaturas, bem como o vento, variam bastante, fatores estes que interferem na temperatura de placa, mas é certo que esta normalmente será maior que aquela. Considerando que a temperatura de placa seja em média 35°C , tem-se uma perda de -4%.

3.2.2.2 Informações dos locais de simulação

Baseado na extensão territorial, é certo que uma única simulação não é capaz de fornecer uma estimativa razoável do potencial de geração fotovoltaica no país pela incapacidade de englobar a diversidade de irradiâncias existentes. Em vista disso, optou-se por realizar simulações nas capitais, fornecendo dados que foram tratados como representativos das UFs. Essa consideração, ainda que bastante simplista, resulta em dados satisfatoriamente mais precisos que uma única simulação.

Para determinação das irradiâncias locais, se utilizou o serviço SunData do site CRESESB. Baseado

no banco de dados *Valores Medios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal* do *Centro de Estudios de la Energia Solar - CENSOLAR* que contém valores de irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países limítrofes. O SunData destina-se ao cálculo da irradiação solar diária média mensal no plano inclinado em qualquer ponto do território nacional.

A partir das coordenadas geográficas das capitais [31] inseridas no site CRESESB [22] obtêm-se as irradiações no plano horizontal (0°), no plano com ângulo igual à latitude e no plano com maior média anual. Considerando essa última ferramenta do site, foram escolhidas as inclinações mais eficientes para os módulos e os valores de irradiação correspondentes.

3.2.2.3 Distribuição dos módulos no espaço

Foi assumida que a área calculada tem formato quadrado com um dos lados voltados para direção de ângulo azimutal nulo, fornecendo um equilíbrio razoável entre quantidade de módulos enfileirados e número de fileiras. Em um contexto real de implementação, a capacidade de acomodação de módulos é dada pela geometria do terreno, podendo-se ter fileiras de tamanhos diferentes, situação que não é considerada neste trabalho.

A Figura 3.4 referencia algumas das variáveis que serão utilizadas nos cálculos. L_x e L_y são as dimensões dos módulos fornecidas pelo fabricante. Os valores de x e z são dados pelas Equações 3.11 e 3.12, sendo α a inclinação do módulo.

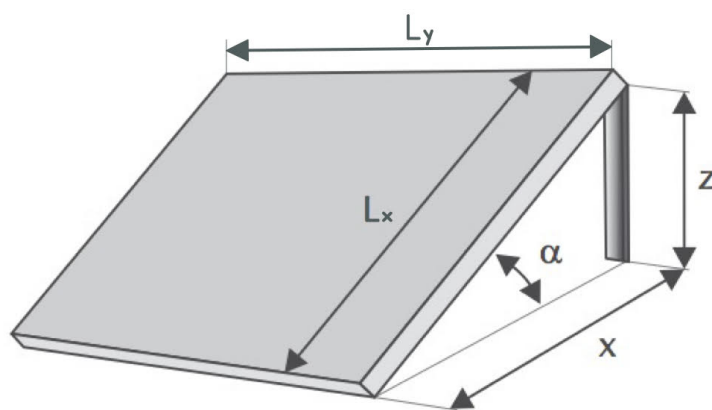


Figura 3.4: Módulo fotovoltaico e variáveis de referência. Adaptado. [19]

$$x = L_x * \cos(\alpha) \quad (3.11)$$

$$z = L_x * \text{sen}(\alpha) \quad (3.12)$$

O número de módulos por fileira N_y é dado pela Equação 3.13, considerando um espaçamento entre eles de 2% de L_y para instalação de suporte e para permitir dilatação térmica. L_{lix} é o comprimento do lado do quadrado representativo do lixão, isto é, $L_{lix} = \sqrt{A_{lix}}$.

$$N_y = \frac{L_{lix} + 0,02 * L_y}{1,02 * L_y} \quad (3.13)$$

O número de fileiras N_x é dado pela Equação 3.14, com d sendo o distanciamento entre elas e calculado segundo a Equação 2.1. Foi considerado que, para um total de n fileiras de módulos, há $n - 1$ corredores entre elas.

$$N_x = \frac{L_{lix} + d}{x + d} \quad (3.14)$$

O total de módulos no espaço disponível N_m é dado pela Equação 3.15.

$$N_m = N_x * N_y \quad (3.15)$$

3.2.2.4 Cálculos de potência e energia

A potência gerada por cada lixão P_{lix} pode ser calculada pela Equação 2.4. Multiplicando esse valor pela quantidade de lixões em cada Unidade da Federação N_{lix} , como na Equação 3.16, pode-se obter a potência de cada UF, cuja soma, Equação 3.17, fornece a potência do país.

$$P_{UF} = N_{lix} * P_{lix} \quad (3.16)$$

$$P_{BR} = \sum_{i=1}^{27} P_{UF_i} \quad (3.17)$$

A energia idealmente gerada por módulo por dia $E_{m/dia}$ é dada pela Equação 2.5. Se multiplicada por 365 resulta na energia por módulo em um ano, Equação 3.18. A energia realmente gerada por

cada módulo, Equação 3.19, leva em consideração as perdas determinadas na Seção 3.2.2.1, pelo produto entre elas, conforme a Equação 3.20.

$$E_{m/ano} = 365 * E_{m/dia} \quad (3.18)$$

$$E_{m_real/ano} = E_{m/ano} * \eta_{perdas} \quad (3.19)$$

$$\eta_{perdas} = \prod_{i=1}^N \eta_{perda_i} \quad (3.20)$$

Da mesma forma com que é calculada a potência, a energia real gerada por lixão, por UF e no país são dadas, respectivamente, pelas Equações 3.21, 3.22 e 3.23

$$E_{lix_real/ano} = N_m * E_{m_real/ano} \quad (3.21)$$

$$E_{UF_real/ano} = N_{lix} * E_{m_real/ano} \quad (3.22)$$

$$E_{BR_real/ano} = \sum_{i=1}^{27} E_{m_real/ano_i} \quad (3.23)$$

3.3 FERRAMENTAS

Para elaboração deste trabalho foram utilizados dois programas: *Google Earth* e *Microsoft Office Excel*.

O *Google Earth* é um programa desenvolvido pela empresa *Google* que apresenta um modelo tridimensional do globo terrestre construído a partir de imagens de satélites, fotografias aéreas e sistemas de informações geográficas – GIS. Com ele é possível observar cidades e paisagens de diversos ângulos. Os usuários podem explorar o globo a partir de coordenadas geográficas e endereços ou com o próprio teclado ou *mouse*. A vantagem principal desse programa para este trabalho é, no entanto, a ferramenta de medição que permite obter distâncias e áreas marcadas no mapa. Assim, a partir das coordenadas dos lixões,

mediu-se a área de cada um para obtenção da área média [32].

O *Excel* é um *software* da empresa *Microsoft* como parte de um pacote denominado *Office*, que inclui *Word*, *Power Point*, entre outros. Considerado hoje a melhor ferramenta de criação de planilhas eletrônicas, o *Excel* possui uma interface intuitiva e inúmeras ferramentas de cálculo e construção de gráficos e tabelas. A versão de 2016 para *Windows* foi utilizada neste projeto para ordenação, cálculo e análise de todos os dados do projeto [33].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DIMENSIONAMENTO DOS LIXÕES

4.1.1 Quantidade de lixões

Primeiramente, com o número de municípios que despejam seus resíduos em seu território N_{prop} e os que o fazem em outro município N_{outr} , obtidos pelo mapa Destinação Final do Lixo do Observatório dos Lixões, obteve-se a proporção P_{prop} . Com o número de municípios com lixões/aterros controlados N_{mun} e a proporção P_{prop} , foi possível calcular, então, o número lixões/aterros controlados N_{lix} em cada UF, supondo que há apenas um em cada município, conforme exposto na Tabela 4.1. Os dados completos do Observatório dos Lixões se encontram no Apêndice I.1.

Observa-se na Tabela 4.1 que, no Distrito Federal, não consta nenhum lixão ou aterro controlado apesar de Brasília possuir o maior lixão da América Latina. Tal lixão foi encerrado em 2018 e possivelmente por esta razão não é um depósito de resíduos ativo contabilizado pela CNM. Deste modo, a fim de que este trabalho tenha seus resultados de acordo com a base de dados em questão, foram desconsiderados os lixões existentes encerrados não considerados pela CNM.

	N_{prop}	N_{outr}	P_{prop}	N_{mun}	N_{lix}
AC	16	1	94,1%	15	14,1
AL	41	21	66,1%	35	23,1
AM	19	0	100,0%	17	17,0
AP	5	0	100,0%	3	3,0
BA	319	29	91,7%	286	262,2
CE	116	15	88,5%	104	92,1
DF	0	0	0,0%	0	0,0
ES	21	53	28,4%	23	6,5
GO	220	21	91,3%	186	169,8
MA	56	4	93,3%	51	47,6
MG	622	202	75,5%	497	375,2
MS	54	23	70,1%	46	32,3
MT	107	29	78,7%	94	74,0
PA	56	1	98,2%	44	43,2
PB	124	37	77,0%	112	86,3
PE	98	44	69,0%	87	60,0
PI	114	7	94,2%	90	84,8
PR	233	165	58,5%	119	69,7
RJ	30	57	34,5%	17	5,9
RN	104	23	81,9%	95	77,8
RO	18	31	36,7%	19	7,0
RR	7	1	87,5%	6	5,3
RS	57	436	11,6%	98	11,3
SC	44	246	15,2%	46	7,0
SE	37	18	67,3%	38	25,6
SP	378	262	59,1%	165	97,5
TO	131	5	96,3%	109	105,0
Total	3027	1731	-	2402	1803,0

Tabela 4.1: Estimativa do número de lixões no Brasil

Com a soma de 1803 lixões no país, calculou-se, com um nível de certeza de 95% e erro máximo admitido de 5%, um total de 316,83 áreas necessárias para se obter uma amostra significativa. Como não é possível a obtenção de uma fração de amostra, esse valor foi arredondado para 317, resultando em uma amostra com maior precisão que a inicialmente desejada.

4.1.2 Área dos lixões

4.1.2.1 Medição

As medições das áreas dos lixões e aterros controlados foram feitas com o auxílio do *Google Earth*. Pela inserção das coordenadas geográficas do local, o programa localiza o ponto definido e, com a ferra-

menta de medição, se marca o perímetro desejado e o programa fornece a área correspondente ao polígono delimitado.

A Figura 4.1 ilustra a medição da área do lixão de Barra da Estiva - BA. À esquerda está destacado o ícone da ferramenta de medição e à direita se observam os valores do perímetro [m] e da área [m²] do polígono marcado calculados pelo programa.



Figura 4.1: Medição de área de um lixão.

Cabe esclarecer que áreas de vegetação significativas existentes em lixões e aterros foram excluídas da medição visto que não é de interesse deste trabalho o incentivo ao desmatamento e sim o reaproveitamento sustentável de áreas de despejo de resíduos.

As áreas de todos os lixões e aterros controlados medidos estão descritas no Apêndice I.2.

4.1.2.2 Área média

Os valores representativos da amostra estão na Tabela 4.2.

Quantidade	317
Moda	-
Mediana	23.922,10 m ²
Média	31.750,64 m ²
Desvio médio	21.740,82 m ²
Variância	1.148.610.426,67 m ⁴
Desvio padrão	33.891,16 m ²
Valor máximo	340.159,86 m ²
Valor mínimo	1.083,55 m ²
Soma	10.064.952,42 m ²

Tabela 4.2: Dados representativos das amostras dos lixões.

Observa-se que não existe moda para essa amostra visto que não há nenhum valor que se repita. A ampla dispersão dos dados, descrita pelo desvio padrão, era esperada ao se considerar a extensão do território brasileiro e a diversidade de municípios existentes.

Pelos valores mínimo e máximo, constata-se uma grande variedade de tamanhos de lixões/aterros controlados pelo país. Cabe, no entanto, citar que a área do maior lixão (Teresina-PI, 340.159,86 m²) destoa dos demais valores obtidos, sendo que o segundo maior (Patos-PB, 173.047,54 m²), tem praticamente metade da área dele. Mesmo assim, não foi retirado da amostra uma vez que sua inclusão provoca uma alteração de menos de 3% no valor da média obtida, ademais, existem outros grandes lixões no Brasil, alguns até maiores, como o de Brasília.

Para uma melhor visualização das amostras, foi feito um histograma, Figura 4.2, no qual as áreas são subdivididas em faixas e é apresentada a frequência com que aparecem os valores daquele grupo.

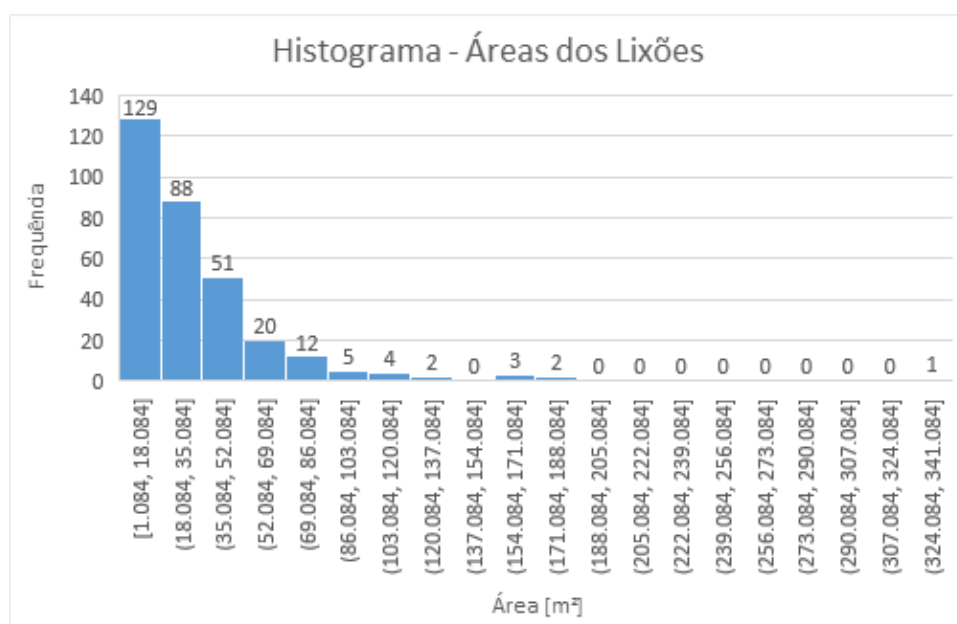


Figura 4.2: Histograma de frequência de área.

4.1.2.3 Área efetiva

Como discutido anteriormente, dificilmente será possível aproveitar 100% do terreno, portanto, para uma análise mais detalhada foram feitas análises de diversos percentuais de aproveitamento da área. Supondo que o lixão/aterro controlado tem área quadrada, foi incluída na Tabela 4.3 uma coluna com o comprimento de cada lado, valor usado no cálculo da quantidade de módulos possíveis de serem alocados.

Ocupação	Área (A_{lix})	Lado do quadrado (L_{lix})
10%	3.175,06	56,35
20%	6.350,13	79,69
30%	9.525,19	97,60
40%	12.700,26	112,70
50%	15.875,32	126,00
60%	19.050,38	138,02
70%	22.225,45	149,08
80%	25.400,51	159,38
90%	28.575,57	169,04
100%	31.750,64	178,19

Tabela 4.3: Percentual de ocupação da área média.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A partir das coordenadas das capitais, definidas como locais de simulação, foram encontrados no site do CRESESB dados de irradiação para ângulo nulo, ângulo igual à latitude e ângulo com maior irradiação. Esse último conjunto, por fornecer os valores mais eficientes, foi o escolhido para ser aplicado nos cálculos deste projeto. A Tabela 4.4 mostra as coordenadas, o ângulo, a irradiação e a variação mensal de cada localidade. Os dados completos das capitais se encontram no Apêndice I.3.

A média de irradiação entre as Unidades da Federação é de 5,08 kWh/m².dia, isto é, 1853,79 kWh/m².ano, valores bastante otimistas para a instalação de sistemas de geração fotovoltaica.

O ângulo que fornece maior média de irradiação anual pode ser maior ou menor que aquele igual à latitude. E, apesar da pequena divergência entre os valores das irradiâncias, a energia total estimada de geração do país é de fato um pouco maior com os módulos inclinados com ângulo de maior média.

UF	Capital	Coordenadas	Ângulo	Irradiação [kWh/m ² .dia]	Varição mensal [kWh/m ² .dia]
AC	Rio Branco	9.9754° S ; 67.8249° W	10°	4,61	0,97
AL	Maceió	9.6498° S ; 35.7089° W	6°	5,37	1,87
AM	Manaus	3.1190° S ; 60.0217° W	4°	4,33	1,16
AP	Macapá	0.0356° N ; 51.0705° W	1°	4,85	1,41
BA	Salvador	12.9777° S ; 38.5016° W	9°	5,36	2,02
CE	Fortaleza	3.7327° S ; 38.5270° W	3°	5,7	1,34
DF	Brasília	15.8267° S ; 47.9218° W	18°	5,45	2,05
ES	Vitória	20.2976° S ; 40.2958° W	18°	5,13	1,86
GO	Goiânia	16.6869° S ; 49.2648° W	18°	5,45	1,47
MA	São Luís	2.5300° S ; 44.2567° W	3°	5,07	1,38
MG	Belo Horizonte	19.9167° S ; 43.9345° W	20°	5,36	1,03
MS	Campo Grande	20.4697° S ; 54.6201° W	19°	5,2	0,93
MT	Cuiabá	15.6009° S ; 56.0968° W	16°	5,25	1,02
PA	Belém	1.4558° S ; 48.4902° W	3°	4,69	1,04
PB	João Pessoa	7.1195° S ; 34.8450° W	5°	5,52	1,44
PE	Recife	8.0522° S ; 34.9286° W	5°	5,3	1,49
PI	Teresina	5.0447° S ; 42.7662° W	6°	5,56	1,54
PR	Curitiba	25.4809° S ; 49.3044° W	21°	4,39	1,64
RJ	Rio de Janeiro	22.9068° S ; 43.1729° W	20°	4,93	1,88
RN	Natal	5.7793° S ; 35.2009° W	4	5,68°	1,31
RO	Porto Velho	8.7612° S ; 63.9004° W	10°	4,48	0,95
RR	Boa Vista	2.8235° N ; 60.6758° W	3°	4,9	1,13
RS	Porto Alegre	30.0346° S ; 51.2177° W	22°	4,64	3,03
SC	Florianópolis	27.5949° S ; 48.5482° W	22°	4,47	2,12
SE	Aracaju	10.9472° S 37.0731° W	7°	5,53	1,95
SP	São Paulo	23.5505° S ; 46.6333° W	21°	4,63	1,23
TO	Palmas	10.2491° S ; 48.3243° W	14°	5,28	2,02

Tabela 4.4: Irradiação solar diária média anual [kWh/m².dia] [22].

Com o ângulo de inclinação, foram calculados os parâmetros da Figura 3.4 mais o valor de d , que é a distância entre as fileiras de módulos, mostrados na Tabela 4.5.

Reescrevendo as Equações 3.13 e 3.14 isolando L_{lix} e igualando-as, visto que a área é um quadrado, tem-se a relação descrita pela Equação 4.1.

$$1,02 * L_y * N_y - 0,02 * L_y = (\cos(\alpha) + 3,5 * \sin(\alpha)) * L_x * N_x - 3,5 * \sin(\alpha) * L_x \quad (4.1)$$

Substituindo α por $11,8855^\circ$, que é a angulação média dos módulos no país considerando a quantidade de lixões em cada UF, a relação entre N_x e N_y permanece dependente de L_x e L_y . Se $L_x = 0,992$ m e

$L_y = 1,96$ m, essa relação é dada pela Equação 4.2, se os valores forem invertidos, a relação é dada pela Equação 4.3.

$$N_y = 0,843 * N_x - 0,338 \quad (4.2)$$

$$N_y = 3,292 * N_x - 1,377 \quad (4.3)$$

Observa-se, portanto, que a segunda relação fornece valores maiores de N_y para determinado N_x do que a primeira. Assim, foi determinado que $L_x = 1,96$ m e $L_y = 0,992$ m.

UF	α [°]	L_x	x	z	d
AC	10	1,96	1,93	0,34	1,19
AL	3		1,96	0,10	0,36
AM	5		1,95	0,17	0,60
AP	16		1,88	0,54	1,89
BA	22		1,82	0,73	2,57
CE	3		1,96	0,10	0,36
DF	9		1,94	0,31	1,07
ES	14		1,90	0,47	1,66
GO	20		1,84	0,67	2,35
MA	22		1,82	0,73	2,57
MG	4		1,96	0,14	0,48
MS	3		1,96	0,10	0,36
MT	18		1,86	0,61	2,12
PA	6		1,95	0,20	0,72
PB	19		1,85	0,64	2,23
PE	4		1,96	0,14	0,48
PI	21		1,83	0,70	2,46
PR	18		1,86	0,61	2,12
RJ	3		1,96	0,10	0,36
RN	5		1,95	0,17	0,60
RO	20		1,84	0,67	2,35
RR	1		1,96	0,03	0,12
RS	21		1,83	0,70	2,46
SC	18		1,86	0,61	2,12
SE	7		1,95	0,24	0,84
SP	7		1,95	0,24	0,84
TO	6		1,95	0,20	0,72

Tabela 4.5: Parâmetros de inclinação dos módulos.

Com os valores de x e d foi possível calcular o número de módulos em cada fileira N_y , o número de fileiras N_x e o total de módulos no terreno N_m . Na Tabela 4.6 são mostrados os valores calculados para

um aproveitamento de 50% da área do lixão, visto que, como discutido anteriormente, dificilmente será possível 100% de aproveitamento.

UF	50%			Aproveitamento efetivo
	N_x	N_y	N_m	
AC	40	124	4.960	60,06%
AL	54	124	6.696	81,86%
AM	49	124	6.076	74,34%
AP	33	124	4.092	48,69%
BA	29	124	3.596	40,61%
CE	54	124	6.696	81,86%
DF	42	124	5.208	62,54%
ES	35	124	4.340	52,05%
GO	30	124	3.720	43,09%
MA	29	124	3.596	40,61%
MG	51	124	6.324	77,74%
MS	54	124	6.696	81,86%
MT	32	124	3.968	45,70%
PA	47	124	5.828	71,18%
PB	31	124	3.844	44,65%
PE	51	124	6.324	77,74%
PI	29	124	3.596	41,63%
PR	32	124	3.968	45,70%
RJ	54	124	6.696	81,86%
RN	49	124	6.076	74,34%
RO	30	124	3.720	43,09%
RR	60	124	7.440	91,25%
RS	29	124	3.596	41,63%
SC	32	124	3.968	45,70%
SE	45	124	5.580	67,70%
SP	45	124	5.580	67,70%
TO	47	124	5.828	71,18%

Tabela 4.6: Quantidade de módulos com aproveitamento de 50% da área média.

Uma quinta coluna foi adicionada à Tabela 4.6 representando a média de aproveitamento efetivo do espaço definido para cada UF, isto é, definido percentual de aproveitamento do terreno (10%, 20% etc.), quanto desta nova área é efetivamente utilizada, considerando $x * L_y$ a área realmente ocupada por cada módulo. Com 50% de aproveitamento, tem-se uma área de 15.875,32 m², da qual, no caso do Acre, será aproveitado apenas 60,06%, o que corresponde a 9.354,72 m², 30,03% do terreno do lixão. O aproveitamento efetivo da área definida é relativamente constante para os diversos percentuais de área útil, por isso, os valores apresentados são representativos para os diversos percentuais de aproveitamento.

Outra análise útil de se fazer com relação a isso é que locais com pequena angulação, como Alagoas,

são os que apresentam maior aproveitamento efetivo do terreno em comparação com locais, como Rio Grande do Sul, que têm baixos índices de aproveitamento. Isso se dá pelo fato da distância entre as fileiras dos módulos ser dada em função do seno de α e ser multiplicada por 3,5, um fator que põe em evidência a variação do ângulo.

Considerando a área do terreno efetivamente ocupada por cada módulo fotovoltaico dada por $x * L_y$ pode-se calcular a área efetivamente aproveitada para geração fotovoltaica. Limitando a área disponível a 50%, como na Tabela 4.6, tem-se um aproveitamento médio das UFs de 61,27% desta área, o que corresponde a 30,64% do total do terreno do lixão. Esse rendimento pode ser melhorado com estudos mais detalhados de cada localidade ou pelo uso de outras formas de determinação do espaçamento entre as fileiras.

4.2.1 Potência

Com o número de módulos fotovoltaicos foi calculada, então, a potência por lixão e por UF. A Tabela 4.7 apresenta estes resultados para um aproveitamento de 50% e a capacidade total por UF. Na Tabela 4.8, pode-se ver os valores médio das UFs e total do país para diversos percentuais de aproveitamento e a Figura 4.3 apresenta a curva de sensibilidade da potência em função da área.

UF	Nº de lixões	50%		100%
		P_{lix} [MW]	P_{UF} [MW]	P_{UF} [MW]
AC	14	1,66	23,46	47,45
AL	23	2,24	51,92	105,08
AM	17	2,04	34,60	70,16
AP	3	1,37	4,11	8,31
BA	262	1,20	315,82	633,75
CE	92	2,24	206,58	418,09
DF	0	1,74	-	-
ES	7	1,45	9,49	19,24
GO	170	1,25	211,60	430,47
MA	48	1,20	57,34	115,07
MG	375	2,12	794,80	1.614,73
MS	32	2,24	72,36	146,46
MT	74	1,33	98,31	196,22
PA	43	1,95	84,40	170,76
PB	86	1,29	111,08	223,78
PE	60	2,12	127,20	258,43
PI	85	1,20	102,15	209,98
PR	70	1,33	92,61	184,84
RJ	6	2,24	13,15	26,61
RN	78	2,04	158,35	321,08
RO	7	1,25	8,70	17,70
RR	5	2,49	13,09	26,31
RS	11	1,20	13,65	28,06
SC	7	1,33	9,28	18,52
SE	26	1,87	47,79	96,46
SP	97	1,87	182,17	367,73
TO	105	1,95	204,99	414,75

Tabela 4.7: Potência instalada por lixão e por UF.

	Média [MWp]	Total [GWp]
10%	22,49	0,61
20%	44,74	1,21
30%	67,84	1,83
40%	90,55	2,44
50%	112,92	3,05
60%	136,06	3,67
70%	158,95	4,29
80%	180,87	4,88
90%	204,54	5,52
100%	228,52	6,17

Tabela 4.8: Potência média das UFs e total do Brasil.

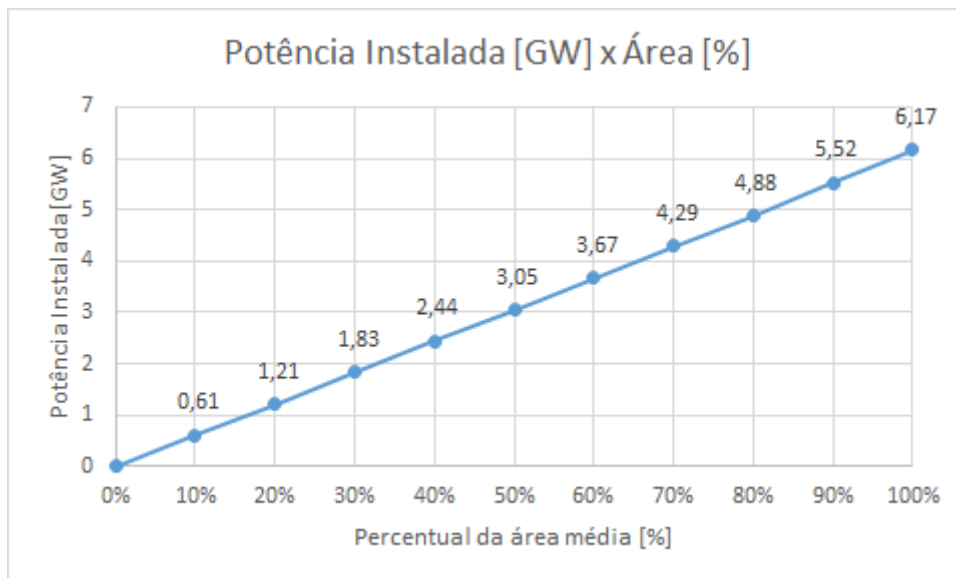


Figura 4.3: Curva de sensibilidade da potência.

Uma suposição razoável no Brasil seria que metade dos lixões existentes fossem fechados e fizessem a instalação de usinas fotovoltaicas aproveitando metade do terreno, o que representaria um total de 25% de aproveitamento do total dos lixões. Pelas estimativas feitas, isso representaria uma potência instalada de cerca de 1,52 GW. De acordo com os dados de outubro de 2019 da ANEEL [13], Tabela 4.9, esse valor representa 1,50% da potência instalada de usinas hidrelétricas no Brasil, pequeno valor se comparado à maior fonte de geração de energia do país. No entanto, comparando com a potência de centrais fotovoltaicas existentes, representaria um aumento de 66,96% considerando apenas 25% da área de lixões do país.

Tipo	Potência Fiscalizada [GW]
CGH - Central Geradora Hidrelétrica	0,76
CGU - Central Geradora Undi-elétrica	0,00
EOL - Central Geradora Eólica	15,56
PCH - Pequena Central Hidrelétrica	5,27
UFV - Central Geradora Solar Fotovoltaica	2,27
UHE - Usina Hidrelétrica	101,04
UTE - Usina Termelétrica	40,97
UTN - Usina Termonuclear	1,99
Total	167,87

Tabela 4.9: Potência outorgada pelas fontes de energia existentes no Brasil. Dados de outubro de 2019 [13].

4.2.2 Energia

Por último, foi calculada a energia gerada por módulo, por lixão e por UF, como descrito na Tabela 4.10 com aproveitamento de 50% da área e a energia máxima (100%) por UF. Para cálculo da energia realmente produzida é necessário calcular a eficiência considerando as perdas da usina: temperatura, inversor, resistência elétrica, tempo e poeira descritos anteriormente, resultando em uma eficiência de 77%. Pela propriedade associativa da matemática esse valor pode ser multiplicado na energia do módulo mesmo que, no caso do inversor e das perdas ôhmicas, se refiram à usina como unidade.

Foi calculada também as energias anual média das UFs e total do país para diversos percentuais de aproveitamento da área, descritas na Tabela 4.11. Na Figura 4.4 é mostrada a curva de sensibilidade da energia em função da área.

UF	Energia ideal/ módulo [kWh/dia]	Energia ideal/ módulo [kWh/ano]	Energia real/ módulo [kWh/ano]	50%		100%
				Energia/usina [GWh/ano]	Energia/UFa [GWh/ano]	Energia/UF [GWh/ano]
AC	1,50	547,80	421,76	2,09	29,53	59,73
AL	1,57	573,48	441,53	2,96	68,43	138,49
AM	1,85	674,97	519,67	3,16	53,68	108,84
AP	1,76	641,96	494,25	2,02	6,07	12,27
BA	1,55	567,37	436,83	1,57	411,82	826,39
CE	1,70	619,95	477,31	3,20	294,33	595,69
DF	1,80	655,41	504,61	2,63	-	-
ES	1,77	645,62	497,08	2,16	14,08	28,55
GO	1,80	655,41	504,61	1,88	318,73	648,42
MA	1,50	546,58	420,82	1,51	72,03	144,54
MG	1,45	529,46	407,64	2,58	967,14	1.964,87
MS	1,91	696,98	536,62	3,59	115,92	234,60
MT	1,83	666,41	513,08	2,04	150,57	300,53
PA	1,80	656,63	505,55	2,95	127,37	257,70
PB	1,74	635,84	489,55	1,88	162,33	327,02
PE	1,90	694,54	534,74	3,38	203,04	412,51
PI	1,55	566,14	435,88	1,57	132,91	273,21
PR	1,72	627,28	482,96	1,92	133,51	266,47
RJ	1,64	599,16	461,30	3,09	18,11	36,65
RN	1,78	648,07	498,96	3,03	235,85	478,22
RO	1,65	602,83	464,13	1,73	12,05	24,52
RR	1,62	593,04	456,60	3,40	17,83	35,86
RS	1,47	536,80	413,29	1,49	16,84	34,62
SC	1,83	666,41	513,08	2,04	14,21	28,36
SE	1,54	563,70	434,00	2,42	61,91	124,97
SP	1,85	676,19	520,61	2,91	283,10	571,48
TO	1,86	679,86	523,44	3,05	320,29	648,05

Tabela 4.10: Energia gerada por módulo, por lixão e por UF.

	Média [GWh]	Total [GWh]
10%	31,29	844,77
20%	62,25	1.680,87
30%	94,34	2.547,30
40%	125,92	3.399,94
50%	157,10	4.241,66
60%	189,28	5.110,53
70%	221,07	5.968,94
80%	251,61	6.793,60
90%	284,46	7.680,53
100%	317,87	8.582,57

Tabela 4.11: Energia média das UFs e total do Brasil.

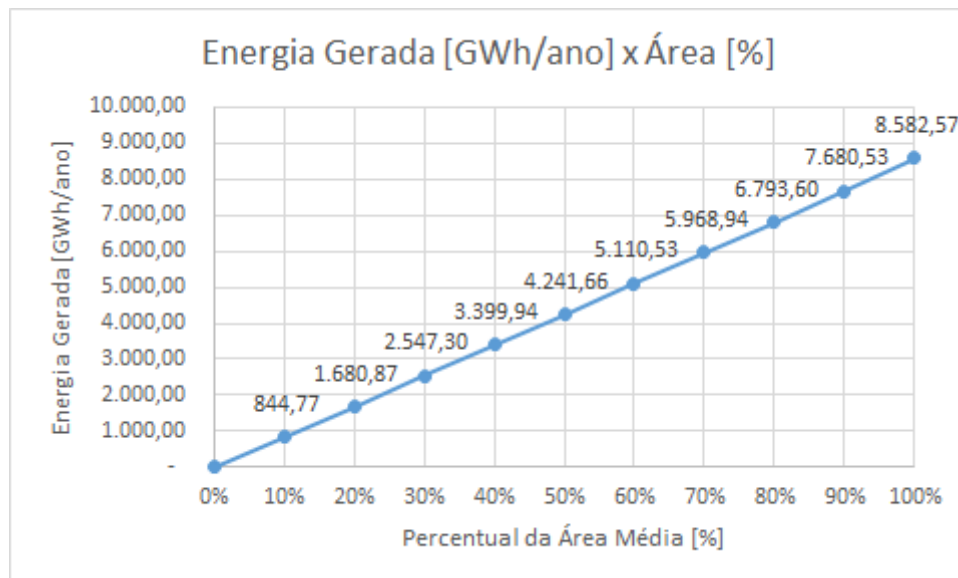


Figura 4.4: Curva de sensibilidade da energia.

A importância que essa geração representa pode ser baseada nos dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2018 (referente ao ano de 2017) da EPE [34]. Considerando o aproveitamento de 25%, como feito para potência, tem-se uma geração de 2.117,41 GWh/ano no Brasil. A Tabela 4.12 apresenta o consumo das classes de consumidores no país e o percentual que seria suprido se os 2.117,41 GWh/ano fossem integralmente investidos em cada uma ainda que não se possa direcionar a energia elétrica inserida na rede.

	Consumo por classe [GWh]	Percentual suprido
Residencial	134.368	1,58%
Industrial	167.398	1,26%
Comercial	88.292	2,40%
Rural	28.136	7,53%
Poder público	15.052	14,07%
Iluminação pública	15.443	13,71%
Serviço público	15.196	13,93%
Próprio	3.277	64,62%
Brasil	467.161	0,45%

Tabela 4.12: Consumo por classe consumidora suprido para um aproveitamento de 25% do potencial de geração fotovoltaica em lixões. Valores referentes a 2017.

Outra análise passível de se fazer é em relação ao consumo por região como descrito na Tabela 4.13. Aqui vale a observação que o consumo de cada região ou de cada Unidade da Federação certamente será muito maior que a capacidade de geração visto que há, em média, menos de um lixão por município, dos quais se considerou o aproveitamento de apenas de 25%.

	Consumo [GWh]	Geração em lixões [GWh]	Percentual suprido
Norte	34.510	283	0,82%
Nordeste	79.731	821	1,03%
Sudeste	232.515	644	0,28%
Sul	84.997	81	0,09%
Centro-Oeste	35.408	290	0,82%
Brasil	467.161	2.117	0,45%

Tabela 4.13: Consumo suprido de cada região para um aproveitamento de 25% do potencial de geração fotovoltaica em lixões. Valores referentes a 2017.

Por fim, a Tabela 4.14 fornece o número de residências atendidas pela energia gerada por cada macrorregião do Brasil com aproveitamento de 25% do potencial dos lixões. Com o número médio de 3,3 moradores por residência em cada região [35], foi possível calcular o total de pessoas atendidas.

	Consumo residencial médio [kWh/mês]	Geração média em lixões [GWh/mês]	Residências atendidas	Pessoas atendidas
Norte	175,2	23,6	134.607,0	444.203,1
Nordeste	119,5	68,4	572.050,0	1.887.765,0
Sudeste	169,0	53,6	317.355,0	1.047.271,5
Sul	177,0	6,7	38.001,0	125.403,3
Centro-Oeste	176,5	24,1	136.808,0	451.466,4
Total	157,9	176,5	1.117.263,0	3.687.297,9

Tabela 4.14: Consumo residencial médio suprido para um aproveitamento de 25% do potencial de geração fotovoltaica em lixões.

O potencial de geração fotovoltaica em lixões é pequeno se comparado ao total de energia consumida no Brasil ou com a geração de grandes hidrelétricas. Ainda assim, 0,45% da energia consumida no país representa uma porção considerável e um investimento bastante vantajoso ao se considerar que se trata de uma energia limpa que irá ocupar áreas degradadas, valorizando o terreno e os locais existentes nas proximidades.

4.3 ESTUDO DE CASO

Para elucidar os cálculos feitos ao longo do trabalho, pode-se analisar os valores encontrados para um estado, como por exemplo o Acre.

Do total de 22 municípios, tem-se que 1 possui aterro sanitário, 15 possuem lixão/aterro controlado e 6 não se tem informação sobre o tipo de disposição do lixo. Em relação à destinação final do lixo, 16 lançam seus resíduos no próprio município, 1 lança em outro município e 5 não se tem informação. Supondo que estes 5 municípios senguem a mesma proporção do restante do estado, tem-se que 94,1% dos municípios lançam seus resíduos no próprio município (Equação 4.4).

$$P_{prop} = \frac{16}{16 + 1} = 0,941 \quad (4.4)$$

Aplicando esta proporção ao número de municípios que lançam seus resíduos em lixão/aterro controlado, chega-se ao total de 14 municípios que possuem lixão/aterro controlado próprio, descartando a parte fracionada resultante da multiplicação visto que a contagem de municípios é sempre um número inteiro (Equação 4.5).

$$N_{lix} = 15 * P_{prop} = 14,1 \quad (4.5)$$

A maior média anual de irradiação, 4,61 kWh/m².dia, é atingida na inclinação de 10°. Com isso, pode-se calcular os valores de x e z (Figura 3.4) e a distância d entre as fileiras de módulos conforme as Equações 4.6, 4.7 e 4.8.

$$x = L_x * \cos(10^\circ) = 1,96 * 0,98 = 1,93 \text{ m} \quad (4.6)$$

$$z = L_x * \sen(10^\circ) = 1,96 * 0,17 = 0,34 \text{ m} \quad (4.7)$$

$$d = 3,5 * z = 3,5 * 0,34 = 1,19 \text{ m} \quad (4.8)$$

Supondo um aproveitamento de 50% da área média determinada, isto é, 15.875,32 m², em formato quadrado de lado 126,00 m², tem-se o número de módulos em cada fileira, o número de fileiras e o número de módulos na área descritos pelas Equações 4.9, 4.10 e 4.11. São desconsideradas as partes fracionárias de N_y e N_x visto que o número de módulos é sempre inteiro.

$$N_y = \frac{L_{lix} + 0,02 * L_y}{1,02 * L_y} = \frac{126,00 + 0,02 * 0,992}{1,02 * 0,992} = 124,54 \quad (4.9)$$

$$N_x = \frac{L_{lix} + d}{x + d} = \frac{126,00 + 1,19}{1,93 + 1,19} = 40,75 \quad (4.10)$$

$$N_m = N_x * N_y = 40 * 124 = 4.960 \quad (4.11)$$

Para o cálculo da potência, considerando que metade dos lixões/aterros controlados do estado façam a instalação de sistemas fotovoltaicos, tem-se a potência por usina e do estado descritas nas Equações 4.12 e 4.13.

$$P_u = P_{mp} * N_m = 335 * 4.960 = 1,66 \text{ MW} \quad (4.12)$$

$$P_{AC} = P_u * \frac{N_{lix}}{2} = 1,66 * \frac{14}{2} = 11,63 \text{ MW} \quad (4.13)$$

A energia idealmente produzida por módulo por dia e por ano e a energia realmente produzida por módulo, por usina e no estado por ano são descritas nas Equações 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18.

$$E_{m/dia} = E_s * A_m * \eta_m = 4,61 * (1,96 * 0,992) * 0,1723 = 1,50 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia} \quad (4.14)$$

$$E_{m/ano} = 365 * E_{m/dia} = 1,50 * 365 = 547,80 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano} \quad (4.15)$$

$$E_{m_real/ano} = E_{m/ano} * \eta_{perdas} = 547,80 * 0,7699 = 421,76 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano} \quad (4.16)$$

$$E_{lix_real/ano} = N_m * E_{m_real/ano} = 4.960 * 421,76 = 2,09 \text{ GWh/m}^2 \cdot \text{ano} \quad (4.17)$$

$$E_{AC_real/ano} = \frac{N_{lix}}{2} * E_{m_real/ano} = \frac{14}{2} * 2,09 = 14,64 \text{ GWh/m}^2 \cdot \text{ano} \quad (4.18)$$

Sabendo que o consumo energético total do estado é de 1.074 GWh/ano e o residencial é 466 GWh/ano, é possível suprir 1,36% e 3,14%, respectivamente.

5 CONCLUSÃO

A quantidade de lixo produzida cresce a cada ano e em sua maior parte são lançados em aterros e lixões. A proposta de Reduzir, Reutilizar e Reciclar é um primeiro passo, mas abrange apenas parte do problema. Os demais resíduos - não recicláveis - podem ser transformados em calor útil, eletricidade e combustível pela incineração e captação de gases liberados na decomposição, o que ainda evita a liberação de gases extremamente poluentes em termos de efeito estufa. Por fim, os aterros e lixões, áreas impróprias para diversos fins pelo risco de contaminação, se tornam atrativas à utilização para geração de energia limpa como a solar fotovoltaica.

Em vista disso, foram feitos estudos estatísticos do potencial de geração solar fotovoltaica em lixões encerrados no Brasil. Pela ausência de dados específicos, foram considerados lixões e aterros controlados. Definida a amostra necessária para obtenção dos dados com grau de certeza aceitável, foram medidas as áreas de diversos lixões e aterros e definida uma área média de 31.750,64 m². Com a irradiação e inclinação mais eficientes para as capitais de cada Unidade da Federação, estimaram-se potência e energia.

Entre as UFs, os valores de potência e energia variam bastante pela diversidade na latitude e na quantidade de lixões e aterros controlados em cada uma. A Tabela 5.1 reúne os dados de potência e energia gerados no país com diversos percentuais de aproveitamento das áreas de lixões e aterros controlados existentes.

	Potência [GWp]	Energia [GWh]
10%	0,61	844,77
20%	1,21	1.680,87
30%	1,83	2.547,30
40%	2,44	3.399,94
50%	3,05	4.241,66
60%	3,67	5.110,53
70%	4,29	5.968,94
80%	4,88	6.793,60
90%	5,52	7.680,53
100%	6,17	8.582,57

Tabela 5.1: Potência e energia do Brasil.

Considerando que metade dos lixões e aterros considerados fizessem a instalação de sistemas fotovoltaicos aproveitando metade de sua área ter-se-ia uma potência instalada de 1,52 GW, o que corresponde

a um aumento de quase 67% dessa fonte no Brasil. Em relação à energia, considerando os mesmos 25% de aproveitamento, estimou-se uma capacidade de suprir 0,45% da energia consumida no país, isto é, 2,12 TWh/ano, um valor considerável.

Este trabalho, entretanto, se baseou em estudos estatísticos para determinação de um potencial médio. Para trabalhos futuros sugere-se:

- Estudos para determinação da área efetivamente aproveitável em cada lixão;
- Refinamento desta pesquisa pela aquisição de dados específicos dos lixões encerrados no Brasil;
- Criação de um modelo de negócios para viabilização da implementação de sistemas fotovoltaicos em lixões encerrados no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 IEA PVPS. *Trends 2018 in photovoltaic applications*. Acesso em 23/11/2019 às 11:42. [S.l.].
- 2 NACÕES UNIDAS BRASIL. *Humanidade produz mais de 2 bilhões de toneladas de lixo por ano, diz ONU em dia mundial*. Acesso em 13/10/2019 às 16:03. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/humanidade-produz-mais-de-2-bilhoes-de-toneladas-de-lixo-por-ano-diz-onu-em-dia-mundial/>>.
- 3 ITAMARATY. *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)*. Acesso em 13/10/2019 às 18:57. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods>>.
- 4 ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. [S.l.], 2017.
- 5 UNIFESP. *Princípio dos 3R's*. Acesso em 13/10/2019 às 16:59. [S.l.]. Disponível em: <https://dgi.unifesp.br/ecounifesp/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=8>.
- 6 CEWEP. *What is Waste-to-Energy*. Acesso em 13/10/2019 às 17:02. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>>.
- 7 EPE. *Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos*. [S.l.], 2014.
- 8 CEWEP. *Latest Eurostat Figures: Municipal Waste Treatment 2017*. Acesso em 14/10/2019 às 17:23. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.cewep.eu/municipal-waste-treatment-2017/>>.
- 9 EPA. *Energy Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste (MSW)*. Acesso em 14/10/2019 às 17:25. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw>>.
- 10 EPA. *RE-Powering America's Land: Siting Renewable Energy on Potentially Contaminated Land, Landfills and Mine Sites*. Acesso em 14/10/2019 às 19:00. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.epa.gov/re-powering/re-powering-fact-sheet-solar-technologies>>.
- 11 EPA. *Nellis Air Force Base, Nevada Success Story*. Acesso em 27/11/2019 às 19:34. [S.l.]. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/success_nellis_nv.pdf>.
- 12 EPA. *An Old New England Town Lights the Way with Solar*. Acesso em 27/11/2019 às 20:13. [S.l.]. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/scituate_landfill_case_study.pdf>.
- 13 ANEEL. *BIG - Banco de Informações de Geração*. Acesso em 18/10/2019 às 9:36. [S.l.]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>.
- 14 MUNDO EDUCAÇÃO. *Diferença entre lixão, aterro controlado e aterro sanitário*. Acesso em 13/10/2019 às 18:13. [S.l.]. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/diferenca-entre-lixao-aterro-controlado-aterro-sanitario.htm>>.
- 15 G1. *Aterros sanitários, aterros controlados e lixões: entenda o destino do lixo no Paraná*. Acesso em 13/10/2019 às 18:48. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pr/parana/noticia/aterros-sanitarios-aterros-controlados-e-lixoes-entenda-o-destino-do-lixo-no-parana.ghtml>>.
- 16 PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA - SUBCHEFIA PARA ASSUNTOS JURÍDICOS. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Acesso em 13/10/2019 às 18:22. [S.l.], 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>.

- 17 AGÊNCIA SENADO. *Senadores aprovam prorrogação do prazo para fechamento dos lixões*. Acesso em 13/10/2019 às 18:27. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2015/07/01/senadores-aprovam-prorrogacao-do-prazo-para-fechamento-dos-lixoes>>.
- 18 ABRELPE. *Roteiro para Encerramento de Lixões*. Acesso em 13/10/2019 às 18:34. [S.l.]. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/roteiro-para-encerramento-de-lixoes/>>.
- 19 VILLALVA, M. G. *Energia Solar Fotovoltaica*. [S.l.]: Saraiva, 2015.
- 20 CANAL SOLAR. *Entendendo as curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos*. Acesso em 15/10/2019. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.canalsolar.com.br/index.php/artigos/item/59-entendendo-as-curvas-iv-e-pv-dos-modulos-fotovoltaicos>>.
- 21 INPE. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2ª edição. ed. [S.l.], 2017.
- 22 CRESESB. *Sun Data*. Acesso em 15/09/2019 às 15:43. [S.l.].
- 23 NREL. *Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems*. Acesso em 15/10/2019 às 22:00. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37358.pdf>>.
- 24 AURORA BLOG. *Understanding PV System Losses, Part 3: Soiling, Snow, System Degradation*. Acesso em 15/10/2019 às 22:26. [S.l.]. Disponível em: <<https://blog.aurorasolar.com/understanding-pv-system-losses-part-3-soiling-snow-system-degradation>>.
- 25 CNM. *Observatório dos Lixões*. Acesso em 18/10/2019 às 10:43. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.lixoes.cnm.org.br/>>.
- 26 PORTAL ACTION. *6.2 - Distribuição Normal*. Acesso em 17/10/2019. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/probabilidades/62-distribuicao-normal>>.
- 27 TRIOLA, M. F. *Introdução à Estatística*. [S.l.]: 7ª Edição, 1998.
- 28 SNIS. *Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2017*. Acesso em 18/10/2019 às 11:29. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2017>>.
- 29 CANADIAN SOLAR. *MAXPOWER CS6U-325|330|335P*. Acesso em 18/10/2019 às 16:14. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.canadiansolar.com/upload/2e46a5e4e1c8ba14/9da8c57eb4c725d5.pdf>>.
- 30 CANADIAN SOLAR. *Limited Warranty Statement - Photovoltaic Standart Module Products*. Acesso em 18/10/2019 às 18:58. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.canadiansolar.com/upload/0b172f905c3bedc1/2b44e6a0cfd6258c.pdf>>.
- 31 RELÓGIOS DE SOL. *Coordenadas geográficas das capitais dos estados brasileiros*. Acesso em 20/10/2019 às 16:10. Disponível em: <<http://relogiosdesol.blogspot.com/2009/11/coordenadas-geograficas-das-capitas-dos.html>>.
- 32 GOOGLE. *Google Earth*. Acesso em 22/10/2019 às 22:49. [S.l.]. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Earth>.
- 33 APRENDER EXCEL. *O que é excel?* Acesso em 22/10/2019 às 22:50. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.aprenderexcel.com.br/2013/tutoriais/o-que-e-excel>>.
- 34 EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. [S.l.], 2018.
- 35 G1. *Número de moradores por domicílio cai 13,2% em 10 anos, diz IBGE*. Acesso em 03/11/2019 às 14:42. [S.l.]. Disponível em: <<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2011/04/numero-de-moradores-por-domicilio-cai-132-em-10-anos-diz-ibge.html>>.

I.1 DADOS OBSERVATÓRIO DOS LIXÕES

UF	Tipo de Disposição do Lixo			Destinação Final do Lixo		
	Não Informado	Aterro Sanitário	Lixão / Aterro Controlado	Não Informado	No Próprio Município	Em Outro Município
AC	6	1	15	5	16	1
AL	50	17	35	40	41	21
AM	43	2	17	43	19	0
AP	11	2	3	11	5	0
BA	84	47	286	69	319	29
CE	61	19	104	53	116	15
DF	1	0	0	1	0	0
ES	9	46	23	4	21	53
GO	9	51	186	5	220	21
MA	159	7	51	157	56	4
MG	84	272	497	29	622	202
MS	4	29	46	2	54	23
MT	14	33	94	5	107	29
PA	90	10	44	87	56	1
PB	77	34	112	62	124	37
PE	57	40	87	42	98	44
PI	110	24	90	103	114	7
PR	15	265	119	1	233	165
RJ	16	59	17	5	30	57
RN	47	25	95	40	104	23
RO	7	26	19	3	18	31
RR	7	2	6	7	7	1
RS	32	367	98	4	57	436
SC	26	223	46	5	44	246
SE	27	10	38	20	37	18
SP	50	430	165	5	378	262
TO	7	23	109	3	131	5
Total	1104	2064	2402	812	3027	1731

Tabela 2: Dados do Observatório dos Lixões [25].

I.2 DADOS COLETADOS DOS LIXÕES

Tabela 3: Dados coletados dos lixões

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m ²]
AC	Brasiléia	Lixão	-10.947403 ; -68.819019	3.852,82
AC	Marechal Thaumaturgo	Aterro c.	-8.943683 ; -72.806899	2.756,87
AM	Carauari	Lixão	-4.856788 ; -66.904083	2.074,69
AM	Itacoatiara	Lixão	-3.147491 ; -58.428013	18.631,25
AM	Maraã	Lixão	-1.841978 ; -65.597891	1.083,55
BA	Banzaê	Lixão	-10.587121 ; -38.678336	9.199,40
BA	Barra da Estiva	Lixão	-13.640716 ; -41.357917	15.603,32
BA	Biritinga	Lixão	-11.593243 ; -38.740427	19.422,89
BA	Brumado	Aterro c.	-14.186623 ; -41.590571	89.572,96
BA	Buritirama	Lixão	-10.746278 ; -43.665219	22.520,76
BA	Caetité	Lixão	-14.028433 ; -42.444901	59.008,72
BA	Cândido Sales	Lixão	-15.495082 ; -41.275174	35.267,25
BA	Casa Nova	Lixão	-9.164080 ; -40.974000	129.334,20
BA	Cícero Dantas	Lixão	-10.355430 ; -38.242922	28.177,82
BA	Eunápolis	Lixão	-16.333780 ; -39.538841	172.905,02
BA	Formosa do Rio Preto	Lixão	-10.968294 ; -45.165333	54.462,09
BA	Gandu	Lixão	-13.735012 ; -39.449616	65.556,10
BA	Gentio do Ouro	Lixão	-11.434494 ; -42.507872	26.246,55
BA	Ipirá	Lixão	-12.157442 ; -39.731780	7.703,18
BA	Irará	Lixão	-12.025894 ; -38.795957	111.585,76
BA	Itaberaba	Lixão	-12.494694 ; -40.314934	54.140,04
BA	Itajuípe	Lixão	-14.659952 ; -39.353857	13.353,84
BA	Itapetinga	Aterro c.	-15.283933 ; -40.247572	93.874,41
BA	Iuiú	Lixão	-14.439980 ; -43.588339	2.119,43
BA	Jacobina	Lixão	-11.201618 ; -40.577661	69.889,90
BA	Jiquiriçá	Aterro c.	-13.220000 ; -39.590000	26.795,18
BA	João Dourado	Lixão	-11.328098 ; -41.671119	43.847,99

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
BA	Juazeiro	Aterro c.	-9.490217 ; -40.551108	156.938,46
BA	Lajedinho	Lixão	-12.352465 ; -40.927138	5.691,33
BA	Lençóis	Lixão	-12.540362 ; -41.367180	17.851,11
BA	Licínio de Almeida	Aterro c.	-14.711431 ; -42.510358	5.945,83
BA	Luís Eduardo Magalhães	Lixão	-12.066571 ; -45.786482	79.721,65
BA	Maiquinique	Lixão	-15.657479 ; -40.250101	8.407,27
BA	Maraú	Lixão	-14.163427 ; -38.988981	25.584,36
BA	Matina	Lixão	-13.901355 ; -42.850338	9.461,77
BA	Nova Viçosa	Lixão	-17.907629 ; -39.931341	18.489,29
BA	Nova Viçosa	Lixão	-17.962432 ; -39.502520	18.209,35
BA	Oliveira dos Brejinhos	Lixão	-12.322759 ; -42.815361	23.778,66
BA	Palmas de Monte Alto	Lixão	-14.287563 ; -43.191799	53.096,70
BA	Pau Brasil	Lixão	-15.468988 ; -39.629835	9.715,72
BA	Pindobaçu	Lixão	-10.744628 ; -40.354733	18.190,29
BA	Pintadas	Lixão	-11.824113 ; -39.893712	58.088,47
BA	Riachão das Neves	Lixão	-11.770547 ; -44.902756	9.364,22
BA	Rio Real	Lixão	-11.449656 ; -37.990578	54.182,02
BA	Santa Bárbara	Lixão	-11.931755 ; -38.969060	42.378,25
BA	Santa Cruz Cabrália	Lixão	-16.292633 ; -39.067008	38.217,25
BA	Santa Cruz da Vitória	Lixão	-14.963585 ; -39.818281	24.885,91
BA	Santo Estêvão	Lixão	-12.403104 ; -39.245002	52.214,33
BA	Sebastião Laranjeiras	Lixão	-14.579317 ; -42.943143	6.338,65
BA	Senhor do Bonfim	Lixão	-10.483502 ; -40.161046	110.505,13
BA	Serrolândia	Lixão	-11.407701 ; -40.300167	29.004,84
BA	Uauá	Lixão	-9.825575 ; -39.495075	32.712,46
CE	Baturité	Lixão	-4.363937 ; -38.856824	49.024,17
CE	Carnaubal	Lixão	-4.147592 ; -40.950505	29.519,12
CE	Chaval	Lixão	-3.057566 ; -41.221442	38.400,32
CE	Frecheirinha	Lixão	-3.757197 ; -40.772081	17.790,62

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
CE	Jijoca de Jericoacoara	Lixão	-2.943792 ; -40.499793	76.837,52
CE	Juazeiro do Norte	Lixão	-7.155291 ; -39.311591	121.631,42
CE	Massapê	Lixão	-3.514463 ; -40.356301	30.633,86
CE	Piquet Carneiro	Lixão	-5.782702 ; -39.424988	3.914,95
CE	Quixelô	Lixão	-6.264458 ; -39.233887	33.901,74
CE	Redenção	Lixão	-4.282292 ; -38.717658	28.195,15
CE	São Gonçalo do Amarante	Aterro c.	-3.605171 ; -38.949812	64.322,76
CE	São João do Jaguaribe	Lixão	-5.170280 ; -38.152340	159.488,14
CE	Varjota	Lixão	-4.174203 ; -40.466547	57.322,93
CE	Várzea Alegre	Lixão	-6.728713 ; -39.274475	29.345,35
ES	Irupi	Aterro c.	-20.321090 ; -41.673765	3.857,08
ES	Iúna	Lixão	-20.358844 ; -41.527896	27.491,54
ES	Pinheiros	Aterro c.	-18.398067 ; -40.212036	29.974,69
GO	Alto Paraíso de Goiás	Lixão	-14.104467 ; -47.526737	21.605,83
GO	Barro Alto	Lixão	-14.978664 ; -48.891305	32.178,64
GO	Bonópolis	Lixão	-13.645922 ; -49.817724	3.331,48
GO	Britânia	Lixão	-15.183841 ; -51.218271	33.142,26
GO	Caçu	Lixão	-18.597770 ; -51.174052	47.807,69
GO	Ceres	Lixão	-15.350883 ; -49.613733	41.541,20
GO	Córrego do Ouro	Lixão	-16.303766 ; -50.546196	37.593,60
GO	Corumbaíba	Aterro c.	-18.140807 ; -48.524191	32.467,27
GO	Goiás	Lixão	-15.943369 ; -50.177251	47.577,77
GO	Goiatuba	Lixão	-18.009602 ; -49.394811	75.884,03
GO	Ipameri	Aterro c.	-17.721326 ; -48.200940	78.201,15
GO	Itumbiara	Aterro c.	-18.373382 ; -49.269487	28.421,41
GO	Joviânia	Lixão	-17.856724 ; -49.611568	42.373,36
GO	Mambaí	Lixão	-14.501579 ; -46.125469	4.373,27
GO	Mossâmedes	Lixão	-16.143541 ; -50.244960	34.716,14
GO	Nova América	Lixão	-15.028620 ; -49.915234	12.280,78

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
GO	Novo Gama	Lixão	-16.101343 ; -48.120235	103.431,96
GO	Ouvidor	Aterro c.	-18.273154 ; -47.799333	80.678,73
GO	Panamá	Lixão	-18.187630 ; -49.370260	48.720,76
GO	Petrolina de Goiás	Aterro c.	-16.093728 ; -49.300137	38.253,18
GO	Piracanjuba	Lixão	-17.267415 ; -49.007044	48.882,50
GO	Pires do Rio	Lixão	-17.259974 ; -48.281397	80.855,55
GO	Pontalina	Lixão	-17.548035 ; -49.426026	43.729,97
GO	Posse	Lixão	-14.066585 ; -46.331744	41.561,82
GO	Professor Jamil	Lixão	-17.292422 ; -49.234237	20.830,12
GO	Rianópolis	Lixão	-15.462311 ; -49.512945	49.013,01
GO	São Luís de Montes Belos	Lixão	-16.509168 ; -50.402651	55.963,24
GO	Taquaral de Goiás	Lixão	-16.038371 ; -49.601352	42.099,69
GO	Teresina de Goiás	Lixão	-13.767450 ; -47.252768	9.456,27
GO	Uirapuru	Lixão	-14.296891 ; -49.922224	41.498,11
GO	Vicentinópolis	Lixão	-17.730401 ; -49.828303	24.816,34
MA	Arari	Lixão	-3.480070 ; -44.775083	11.472,89
MA	Campestre do Maranhão	Lixão	-6.160339 ; -47.342416	8.166,07
MA	Humberto de Campos	Aterro c.	-2.636799 ; -43.484019	8.005,73
MA	Santa Inês	Lixão	-3.709070 ; -45.386552	81.470,35
MA	Vargem Grande	Lixão	-3.525039 ; -43.926012	19.494,28
MG	Abre Campo	Aterro c.	-20.292647 ; -42.510177	10.986,92
MG	Alto Caparaó	Aterro c.	-20.485643 ; -41.881739	8.744,43
MG	Aricanduva	Aterro c.	-17.864435 ; -42.576818	12.376,02
MG	Belo Vale	Aterro c.	-20.407318 ; -44.043743	7.883,52
MG	Berilo	Aterro c.	-16.949542 ; -42.463808	15.841,85
MG	Boa Esperança	Lixão	-21.136737 ; -45.551802	16.599,77
MG	Bom Despacho	Aterro c.	-19.749567 ; -45.236719	24.025,26
MG	Bonito de Minas	Aterro c.	-15.314066 ; -44.771455	10.003,42
MG	Botumirim	Lixão	-16.859909 ; -42.997442	4.453,22

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
MG	Buenópolis	Aterro c.	-17.822643 ; -44.166428	10.789,71
MG	Cabeceira Grande	Lixão	-16.059380 ; -47.070160	30.917,32
MG	Cachoeira Dourada	Lixão	-18.507239 ; -49.503857	12.186,71
MG	Campos Gerais	Lixão	-21.264657 ; -45.758558	10.754,78
MG	Caputira	Aterro c.	-20.138765 ; -42.243012	5.131,82
MG	Carandaí	Lixão	-21.050100 ; -43.791500	5.550,79
MG	Carmo da Cachoeira	Aterro c.	-21.448482 ; -45.207483	7.192,24
MG	Carmo do Cajuru	Aterro c.	-20.163134 ; -44.767414	16.728,42
MG	Cedro do Abaeté	Aterro c.	-19.150614 ; -45.731856	8.210,55
MG	Conceição da Aparecida	Aterro c.	-21.118559 ; -46.194658	13.843,95
MG	Conceição do Mato Dentro	Aterro c.	-19.065149 ; -43.431352	16.582,63
MG	Conselheiro Pena	Aterro c.	-19.208912 ; -41.468944	16.988,93
MG	Cordisburgo	Aterro c.	-19.157480 ; -44.308978	20.605,74
MG	Coromandel	Aterro c.	-18.449627 ; -47.175018	14.897,41
MG	Cristina	Aterro c.	-22.157532 ; -45.262493	11.417,96
MG	Divisópolis	Aterro c.	-15.724221 ; -41.045315	8.254,09
MG	Esmeraldas	Lixão	-19.786716 ; -44.299891	38.879,69
MG	Estrela do Indaiá	Aterro c.	-19.529631 ; -45.737824	47.933,89
MG	Fortuna de Minas	Aterro c.	-19.554727 ; -44.471941	5.390,08
MG	Francisco Sá	Lixão	-16.441043 ; -43.465236	68.215,96
MG	Goiabeira	Aterro c.	-18.975059 ; -41.225002	2.686
MG	Grão Mogol	Aterro c.	-16.566611 ; -42.846295	40.871,23
MG	Imbé de Minas	Aterro c.	-19.590155 ; -41.959765	3.714,15
MG	Itanhomi	Lixão	-19.160598 ; -41.899843	3.316,52
MG	Januária	Lixão	-15.477439 ; -44.394863	31.619,07
MG	Japaraíba	Aterro c.	-20.133805 ; -45.475236	3.156,50
MG	Japonvar	Aterro c.	-15.979797 ; -44.263172	4.889,78
MG	Jequeri	Aterro c.	-20.429821 ; -42.706181	7.627,26
MG	Jequitinhonha	Aterro c.	-16.442851 ; -41.029467	24.904,24

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
MG	João Pinheiro	Aterro c.	-17.706423 ; -46.233727	17.048,55
MG	José Raydan	Aterro c.	-18.233886 ; -42.490410	8.864,06
MG	Lagoa Grande	Aterro c.	-17.825454 ; -46.501330	33.282,46
MG	Lamim	Aterro c.	-20.783861 ; -43.456867	1.690,55
MG	Limeira do Oeste	Aterro c.	-19.541145 ; -50.590780	28.937,80
MG	Lontra	Lixão	-15.922761 ; -44.249802	9.345,95
MG	Luisburgo	Aterro c.	-20.425356 ; -42.103318	4.934,19
MG	Mantena	Aterro c.	-18.763595 ; -40.995822	7.116,38
MG	Martinho Campos	Aterro c.	-19.405414 ; -45.161029	15.561,93
MG	Mata Verde	Aterro c.	-15.656571 ; -40.809384	11.714,90
MG	Matipó	Lixão	-20.258758 ; -42.332032	22.891,72
MG	Monte Santo de Minas	Aterro c.	-21.176336 ; -46.952555	14.856,16
MG	Montezuma	Aterro c.	-15.170666 ; -42.526812	15.545,05
MG	Novorizonte	Aterro c.	-16.007506 ; -42.372954	14.289,80
MG	Pai Pedro	Aterro c.	-15.547546 ; -43.083304	4.345,66
MG	Papagaios	Aterro c.	-19.391931 ; -44.722267	23.886,47
MG	Paraguaçu	Aterro c.	-21.561887 ; -45.762999	21.482,07
MG	Paraopeba	Aterro c.	-19.263801 ; -44.430149	14.845,99
MG	Passos	Aterro c.	-20.720504 ; -46.547245	32.593,03
MG	Pedralva	Aterro c.	-22.246135 ; -45.450555	6.639,82
MG	Perdigão	Aterro c.	-19.925043 ; -45.066928	14.513,77
MG	Pimenta	Aterro c.	-20.463482 ; -45.773014	6.829,41
MG	Piumhi	Aterro c.	-20.408924 ; -45.887382	36.316,86
MG	Planura	Lixão	-20.118662 ; -48.694035	27.364,60
MG	Pompéu	Lixão	-19.241260 ; -45.043626	32.242,66
MG	Ribeirão das Neves	Aterro c.	-19.810250 ; -44.035021	20.091,76
MG	Rio Doce	Aterro c.	-20.215529 ; -42.918093	12.242,05
MG	Rio do Prado	Aterro c.	-16.614555 ; -40.583829	15.582,65
MG	Santa Maria do Salto	Aterro c.	-16.228874 ; -40.129871	13.571,53

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
MG	Santana do Jacaré	Aterro c.	-20.916124 ; -45.129412	10.491,34
MG	Santo Antônio do Itambé	Aterro c.	-18.462722 ; -43.297059	2.752,04
MG	São Gonçalo do Abaeté	Aterro c.	-18.360091 ; -45.801662	11.554,79
MG	São Gonçalo do Sapucaí	Aterro c.	-21.925351 ; -45.574129	34.841,35
MG	São Gotardo	Aterro c.	-19.300671 ; -46.027649	31.961,52
MG	São João da Mata	Aterro c.	-21.924059 ; -45.886098	18.672,27
MG	São José do Divino	Aterro c.	-18.506324 ; -41.407652	15.467,50
MG	São Romão	Lixão	-16.387652 ; -45.083054	30.850,81
MG	Serra do Salitre	Aterro c.	-19.083887 ; -46.652498	10.316,94
MG	Serro	Aterro c.	-18.627224 ; -43.388605	7.016,37
MG	Soledade de Minas	Aterro c.	-22.074093 ; -45.085453	6.075,12
MG	Taiobeiras	Aterro c.	-15.793071 ; -42.260908	88.373,06
MG	Tiros	Aterro c.	-18.986200 ; -45.948300	10.001,60
MG	Várzea da Palma	Aterro c.	-17.541273 ; -44.769421	25.787,02
MS	Anaurilândia	Lixão	-22.187122 ; -52.747236	29.271,77
MS	Aparecida do Taboado	Lixão	20.055856 ; 51.092353	23.250,96
MS	Caarapó	Lixão	-22.654257 ; -54.851241	30.472,62
MS	Caracol	Lixão	-22.013944 ; -57.043064	19.317,98
MS	Eldorado	Lixão	-23.798973 ; -54.263716	31.510,56
MS	Ivinhema	Lixão	-22.350113 ; -53.840480	35.034,96
MS	Nioaque	Lixão	-21.153609 ; -55.865032	29.881,03
MS	Nova Andradina	Lixão	-22.201052 ; -53.401464	66.517,04
MS	Ribas do Rio Pardo	Lixão	-20.449496 ; -53.738493	19.889,45
MS	Rio Verde de Mato Grosso	Lixão	-18.731198 ; -54.875436	29.400,88
MT	Alto Araguaia	Lixão	-17.403447 ; -53.254836	14.871,99
MT	Alto Garças	Lixão	-16.953312 ; -53.519990	28.470,75
MT	Apiacás	Lixão	-9.430250 ; -57.225334	10.579,27
MT	Apiacás	Lixão	-9.530097 ; -57.373230	10.103,50
MT	Araguaiana	Lixão	-15.680268 ; -51.845580	6.964,84

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
MT	Araputanga	Lixão	-15.478080 ; -58.320270	19.744,20
MT	Aripuanã	Lixão	-10.222716 ; -59.413612	12.280,37
MT	Diamantino	Lixão	-14.435994 ; -56.445244	47.977,29
MT	Juara	Lixão	-11.273601 ; -57.567315	75.731,61
MT	Novo São Joaquim	Lixão	-14.909423 ; -53.004165	40.447,28
MT	Paranatinga	Lixão	-14.485543 ; -54.023466	18.501,71
MT	Peixoto de Azevedo	Lixão	-10.221164 ; -55.035539	42.521,50
MT	Vila Bela da Santíssima Trindade	Lixão	-15.026411 ; -59.836552	4.171,42
PA	Brejo Grande do Araguaia	Lixão	-5.714105 ; -48.402425	14.263,30
PA	Jacareacanga	Lixão	-6.350645 ; -58.075675	53.054,45
PA	Mojuí dos Campos	Lixão	-2.669667 ; -54.664180	23.922,10
PA	Monte Alegre	Lixão	-1.948866 ; -54.060140	2.019,96
PA	Parauapebas	Aterro c.	-6.007726 ; -49.905551	105.126,99
PA	Santa Isabel do Pará	Lixão	-1.385173 ; -48.178878	49.461,19
PA	Santarém	Aterro c.	-2.536465 ; -54.659732	83.375,10
PA	São Félix do Xingu	Lixão	-6.665217 ; -51.962805	25.631,85
PA	São Sebastião da Boa Vista	Lixão	-1.724742 ; -49.526552	3.179,74
PB	Água Branca	Lixão	-7.478763 ; -37.659046	5.621,61
PB	Alcantil	Lixão	-7.753519 ; -36.059350	3.249,69
PB	Barra de São Miguel	Lixão	-7.723332 ; -36.305837	15.606,86
PB	Belém	Lixão	-6.668427 ; -35.504498	35.096,40
PB	Bom Sucesso	Lixão	-6.445651 ; -37.942263	8.882,15
PB	Borborema	Lixão	-6.804339 ; -35.617842	2.638,67
PB	Esperança	Lixão	-7.015789 ; -35.831800	55.164,81
PB	Juru	Lixão	-7.542790 ; -37.804392	15.614,61
PB	Massaranduba	Lixão	-7.162635 ; -35.718625	21.396,69
PB	Mataraca	Lixão	-6.581383 ; -34.989242	24.613,14
PB	Maturéia	Lixão	-7.252397 ; -37.345823	3.188,60
PB	Patos	Lixão	-7.047500 ; -37.238532	173.047,54

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
PB	Remígio	Lixão	-6.905529 ; -35.933065	55.381,55
PB	Solânea	Lixão	-6.731899 ; -35.710528	19.525,25
PE	Araripina	Aterro c.	-7.587475 ; -40.576301	154.675,72
PE	Bezerros	Lixão	-8.246391 ; -35.774027	44.044,30
PE	Brejinho	Lixão	-7.338667 ; -37.304353	15.249,36
PE	Brejo da Madre de Deus	Lixão	-8.133696 ; -36.376353	16.600,71
PE	Brejo da Madre de Deus	Lixão	-8.165345 ; -36.186131	10.594,52
PE	Brejo da Madre de Deus	Lixão	-8.083393 ; -36.228209	4.615,28
PE	Buenos Aires	Lixão	-7.729450 ; -35.327046	4.993,34
PE	Camaragibe	Aterro c.	-7.999627 ; -34.998799	88.797,80
PE	Cedro	Lixão	-7.718531 ; -39.285669	4.337,90
PE	Ibimirim	Lixão	-8.585073 ; -37.741652	38.570,20
PE	Ingazeira	Lixão	-7.403800 ; -37.273400	8.980,60
PE	Lagoa Grande	Lixão	-8.979875 ; -40.270037	30838,27
PE	Macaparana	Lixão	-7.560383 ; -35.463250	23.431,90
PE	Paudalho	Lixão	-7.882721 ; -35.176321	33.567,73
PE	Riacho das Almas	Lixão	-8.115838 ; -35.892137	61.015,44
PE	Santa Cruz do Capibaribe	Lixão	-7.986251 ; -36.224368	44.208,36
PE	Santa Maria do Cambucá	Lixão	-7.804442 ; -35.920305	8.998,75
PE	Terra Nova	Lixão	-8.235692 ; -39.366363	22.934,27
PE	Venturosa	Aterro c.	-8.649401 ; -36.823984	39.723,38
PE	Vertentes	Lixão	-7.961076 ; -36.022538	33.488,32
PI	Anísio de Abreu	Lixão	-9.165728 ; -43.052490	26.758,91
PI	Canto do Buriti	Lixão	-8.127020 ; -42.970749	35.477,50
PI	Ilha Grande	Lixão	-2.845739 ; -41.784611	7.495,40
PI	João Costa	Aterro c.	-8.473988 ; -42.370186	18.229,26
PI	Júlio Borges	Lixão	-10.324337 ; -44.256025	4.962,64
PI	Morro do Chapéu do Piauí	Lixão	-3.732559 ; -42.303513	35.089,48
PI	São João do Piauí	Lixão	-8.387140 ; -42.264032	30.442,50

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
PI	Teresina	Aterro c.	-5.162355 ; -42.752208	340.159,86
PI	Vila Nova do Piauí	Lixão	-7.128802 ; -40.928792	8.195,45
PR	Florestópolis	Lixão	-22.849013 ; -51.422532	25.148,63
PR	Formosa do Oeste	Lixão	-24.308085 ; -53.308568	2.967,53
PR	Nova Aurora	Aterro c.	-24.526670 ; -53.212884	6.053,04
PR	Realeza	Aterro c.	-25.831306 ; -53.521762	5.764,43
PR	Rio Bom	Aterro c.	-23.464502 ; -51.242412	9.723,63
PR	Santa Mariana	Lixão	-23.130341 ; -50.520809	7.550,73
PR	São Jerônimo da Serra	Aterro c.	-23.714237 ; -50.732496	7.277,33
PR	Tamarana	Lixão	-23.734080 ; -51.087617	24.287,90
PR	Terra Roxa	Lixão	-24.154032 ; -54.082872	18.862,01
RJ	Barra do Piraí	Aterro c.	-22.509377 ; -43.846027	34.390,07
RJ	Duque de Caxias	Aterro c.	-22.749148 ; -43.265240	38.488,62
RJ	Santo Antônio de Pádua	Lixão	-21.566769 ; -42.151913	30.073,94
RN	Acari	Aterro c.	-6.468840 ; -36.658690	49.909,49
RN	Afonso Bezerra	Lixão	-5.489140 ; -36.507908	43.630,89
RN	Bodó	Lixão	-5.980001 ; -36.413860	6.571,11
RN	Guamaré	Lixão	-5.140858 ; -36.365443	42.189,33
RN	Lajes	Lixão	-5.722706 ; -36.245106	25.673,41
RN	Santo Antônio	Lixão	-6.339611 ; -35.486131	23.435,53
RN	São José do Campestre	Lixão	-6.326204 ; -35.740378	29.452,39
RN	Tibau do Sul	Lixão	-6.222240 ; -35.112207	43.051,33
RO	Alvorada D Oeste	Lixão	-11.338852 ; -62.289077	42.064,95
RO	Nova Mamoré	Lixão	-10.380432 ; -65.335244	5.733,55
RO	Urupá	Lixão	-11.100328 ; -62.355017	35.256,47
RS	Nova Hartz	Aterro c.	-29.733852 ; -51.191903	49.792,00
RS	Santa Cruz do Sul	Aterro c.	-29.765298 ; -52.452582	3.942,86
RS	Severiano de Almeida	Aterro c.	-27.433093 ; -52.093567	2.710,20
RS	Sobradinho	Aterro c.	-29.412942 ; -53.039649	4.534,41

Estado	Município	Tipo	Coordenadas	Área [m²]
SE	Amparo de São Francisco	Lixão	-10.160400 ; -36.946759	11.014,10
SE	Estância	Lixão	-11.211811 ; -37.419003	43.227,90
SE	Itabaiana	Lixão	-10.574111 ; -37.472995	47.434,02
SE	Muribeca	Lixão	-10.390674 ; -36.947342	15.787,90
SE	Poço Verde	Lixão	-10.712834 ; -38.195945	29.855,31
SE	São Francisco	Lixão	-10.322436 ; -36.876150	26.821,57
SE	São Miguel do Aleixo	Lixão	-10.404756 ; -37.400084	10.155,56
SE	Tobias Barreto	Lixão	-11.143017 ; -38.025812	58.736,04
SP	Américo de Campos	Aterro c.	-20.287552 ; -49.696590	26.634,56
SP	Cajati	Aterro c.	-24.730841 ; -48.080243	33.431,58
SP	Cândido Mota	Aterro c.	-22.761772 ; -50.359443	59.351,21
SP	Cardoso	Aterro c.	-20.093935 ; -49.951924	91.892,33
SP	Descalvado	Aterro c.	-21.950253 ; -47.626865	47.291,77
SP	Dois Córregos	Aterro c.	-22.400137 ; -48.319909	64.492,45
SP	Jaborandi	Aterro c.	-20.722341 ; -48.410921	45.325,28
SP	João Ramalho	Aterro c.	-22.251908 ; -50.771975	13.663,42
SP	Pacaembu	Aterro c.	-21.559866 ; -51.296342	22.374,01
SP	Tanabi	Aterro c.	-20.573670 ; -49.684023	50.992,00
SP	Vitória Brasil	Aterro c.	-20.186819 ; -50.486728	1.114,56
TO	Araguacema	Lixão	-8.845335 ; -49.539991	5.678,20
TO	Araguanã	Lixão	-6.606848 ; -48.632591	3.766,80
TO	Aurora do Tocantins	Lixão	-12.735481 ; -46.399382	8.261,66
TO	Barrolândia	Lixão	-9.816566 ; -48.726063	43.032,16
TO	Caseara	Lixão	-9.379680 ; -49.885474	50.827,11
TO	Colinas do Tocantins	Aterro c.	-8.035990 ; -48.492249	78.971,82
TO	Guaraí	Lixão	-8.814046 ; -48.486198	81.045,46
TO	Luzinópolis	Lixão	-6.170092 ; -47.861472	35.222,16
TO	Monte do Carmo	Lixão	-10.795833 ; -48.135000	29.096,51
TO	Peixe	Lixão	-12.003483 ; -48.343550	48.610,28

I.3 DADOS DE IRRADIAÇÃO

UF	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]							
	Plano Horizontal (0°)		Ângulo igual à latitude			Maior média anual		
	Média	Variação	Ângulo [°]	Média	Variação	Ângulo [°]	Média	Variação
AC	4,56	1,16	10	4,61	0,97	10	4,61	0,97
AL	5,35	2,30	10	5,36	1,59	6	5,37	1,87
AM	4,32	1,10	3	4,33	1,14	4	4,33	1,16
AP	4,85	1,40	0	4,85	1,40	1	4,85	1,41
BA	5,31	2,69	13	5,35	1,80	9	5,36	2,02
CE	5,69	1,48	4	5,70	1,30	3	5,70	1,34
DF	5,25	1,18	16	5,45	1,93	18	5,45	2,05
ES	4,96	2,92	20	5,13	1,74	18	5,13	1,86
GO	5,25	1,12	17	5,45	1,41	18	5,45	1,47
MA	5,06	1,37	3	5,07	1,38	3	5,07	1,38
MG	5,13	1,92	20	5,36	1,033	20	5,36	1,03
MS	5,00	2,41	20	5,20	0,85	19	5,20	0,93
MT	5,10	1,23	16	5,25	1,02	16	5,25	1,02
PA	4,69	0,98	1	4,69	1,00	3	4,69	1,04
PB	5,51	1,73	7	5,52	1,36	5	5,52	1,44
PE	5,28	1,84	8	5,29	1,38	5	5,30	1,49
PI	5,54	1,35	5	5,56	1,51	6	5,56	1,54
PR	4,19	2,86	25	4,38	1,40	21	4,39	1,64
RJ	4,73	2,88	23	4,93	1,72	20	4,93	1,88
RN	5,67	1,61	6	5,68	1,17	4	5,68	1,31
RO	4,44	0,98	9	4,48	0,90	10	4,48	0,95
RR	4,90	1,07	3	4,88	1,04	3	4,90	1,13
RS	4,40	4,34	30	4,61	2,50	22	4,64	3,03
SC	4,25	3,44	28	4,45	1,74	22	4,47	2,12
SE	5,50	2,52	11	5,52	1,68	7	5,53	1,95
SP	4,42	2,50	24	4,62	1,07	21	4,63	1,23
TO	5,17	1,45	10	5,27	1,85	14	5,28	2,02

Tabela 4: Dados de irradiação das capitais. [22]