

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

Hibridização de gás confinado em depósitos de
resíduo sólido urbano com heliotérmica para geração
de energia – o caso do Lixão da Estrutural no DF

Arthur Monteiro Filho

Orientador: Mario Benjamim Baptista de Siqueira

Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas

Publicação: ENM.DM- 272/2018

Brasília-DF: 01/2018

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

**Hibridização de gás confinado em depósitos de
resíduo sólido urbano com heliotérmica para geração
de energia – o caso do Lixão da Estrutural no DF**

Arthur Monteiro Filho

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE EN-
GENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLO-
GIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

Aprovada por:

Mario Benjamim Baptista de Siqueira, Prof. Dr., UnB
(Orientador)

Taygoara Felamino de Oliveira, Prof. Dr., UnB
(Examinador interno)

Luciano Soares da Cunha, Prof. Dr., UnB
(Examinador externo)

Antonio Cesar Pinho Brasil Junior, Prof. Dr., UnB
(Examinador suplente)

Brasília, 31 de janeiro de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

Arthur Monteiro Filho

Hibridização de gás confinado em depósitos de resíduo sólido urbano com heliotérmica para geração de energia – o caso do Lixão da Estrutural no DF/
Arthur Monteiro Filho. – Brasil, 2018- 105 p.: il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Mario Benjamim Baptista de Siqueira

Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília – UnB

Faculdade de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, 2018.

1. Hibridização. 2. Resíduos sólidos urbanos. 3. Aterro sanitário. 4. Energia Heliotérmica. I. Mario Benjamim Baptista de Siqueira. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade de Tecnologia. IV. Hibridização de gás confinado em depósitos de resíduo sólido urbano com heliotérmica para geração de energia – o caso do Lixão da Estrutural no DF.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Filho, A. M. (2018). Hibridização de gás confinado em depósitos de resíduo sólido urbano com heliotérmica para geração de energia – o caso do Lixão da Estrutural no DF. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM - 272/2018 , Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Arthur Monteiro Filho.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: HIBRIDIZAÇÃO DE GÁS CONFINADO EM DEPÓSITO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO COM HELIOTÉRMICA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA - O CASO DO LIXÃO DA ESTRUTURAL NO DF.

GRAU/ANO: Mestre/2018.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Arthur Monteiro Filho
Beco Soldado Corsino Pereira
29047-506, Vitória, ES, Brasil
arthurmtfilho@gmail.com

Dedico esse trabalho à Deus e minha família.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus pela bênção que me deu de ter podido completar mais essa etapa de minha vida.

Agradeço também à minha família, meus pais Artur e dona Ziu, meus irmãos Dayane e Daniel. Agraço à vocês pelo carinho e amor e por suas orações em prol do meu sucesso. Amo vocês!

Agradeço também à minha amiga, Iara. Sou grato pelo carinho a mim ofertado e por sua atenção. Gostaria de estender esse agradecimento à sua família, dona Valda sua mãe e o seu José (Nem), seus irmãos, Pedro, Gabriela, Filipe e Raquel pelo carinho e por terem me acolhido tão bem.

Agradeço aos amigos Torsten e Gabriela, por terem me recebido em sua casa e me proporcionado essa aventura. Agradecer aos amigos que me apoiaram mesmo de longe, Selma e Walci, Santinha e muitos outros aqui do ES. Não poderia deixar de citar meu irmão Thiago e sua esposa Cris, os amigos Vinicius e Thayná, amo todos vocês!

Aos queridos amigos membros da igreja IASD do Gama Oeste e também os da igreja do Leste, obrigado por suas orações.

Gratidão ao clube de desbravadores Missionários, por me receberem e apoiarem.

Agradeço também ao meu querido amigo Renan Cristofori pela ajuda e força, valeu irmão suas dicas foram de muita valia e me ajudaram muito.

Obrigado também ao meu professor orientador Mario Benjamim por sua dedicação e apoio! Sem sua ajuda esse trabalho não estaria pronto, sou eternamente grato por sua orientação e cuidado.

E por último, gostaria de agradecer à Faculdade de Tecnologia por prover meios para que eu chegasse até aqui e também à CAPES pelo auxílio financeiro nesses anos de estudo.

“Dê-me uma alavanca e um ponto de apoio e eu moverei o mundo”

Arquimedes

Resumo

A demanda energética em todo o mundo aumenta a cada ano que passa. Isso se deve ao aumento expressivo da população mundial. Essa alta demanda causa a necessidade da utilização de uma quantidade maior de combustíveis fósseis, o que pode ser considerado um problema, já que os mesmos além de serem finitos causam problemas ao meio ambiente. Com tal crescimento faz-se necessário estudar e entender novas tecnologias e novas fontes de geração de energia. Nesse sentido fontes de energias renováveis tem sido largamente estudadas, já que podem resolver ambos os problemas, o da demanda de energia e também a redução de emissões de poluentes. Uma das possibilidades de fonte renovável é a energia solar. O Sol é uma fonte de energia muito poderosa e pode suprir as necessidades energéticas de nosso planeta. A energia solar pode ser utilizada em um processo de conversão direta, caso da fotovoltaica, ou de forma indireta, caso da energia heliotérmica que transfere calor para um fluido de transferência de calor que posteriormente troca calor com água que é transformada em vapor em um ciclo convencional Rankine. O aumento da população traz um outro fator importante de ser observado, o aumento da quantidade de resíduos sólidos gerados. A grande produção de resíduos é um tema muito importante a ser considerado. Essa preocupação vem da dificuldade de encontrar uma destinação final para todo esse resíduo. Atualmente no Brasil as principais formas de destinação final desses resíduos são, os aterros sanitários, aterros controlados e os lixões ou vazadouros à céu aberto, sendo que a quantidade de lixões ainda é grande. Uma alternativa à disposição final do lixo utilizando um desses métodos é a geração de energia por meio dos resíduos sólidos municipais (RSM). Muitas tecnologias existem com essa aparente função. Podem ser citadas, a pirólise, gaseificação, incineração, pirólise por plasma, thermoselect e a produção de combustível derivado de resíduo (CDR). Esse trabalho tem como objetivo estudar uma solução viável para o problema do Aterro Jokey Club Brasília, também conhecido como "lixão da estrutural". Para tanto é proposto simular uma planta híbrida de geração de energia, tal planta vai funcionar utilizando tecnologia de geração de energia solar (Heliotermia), os resíduos sólidos urbanos e o gás confinado nas camadas de resíduos depositados há anos no lixão.

Palavras-chave: Hibridização, resíduos sólidos urbanos, aterro sanitário, energia Heliotérmica

Abstract

Energy demand in the world increases every year and passes. This should increase the world's population increase. This high demand causes a need to use a greater amount of fossil fuels, which can be considered a problem, since they are beyond the final problems causing problems to the environment. With such growth it becomes necessary to study and understand new technologies and new sources of energy generation. In this sense renewable energy sources has been widely studied because they can solve both problems, the energy demand and also the reduction of pollutant emissions. One of the renewable source possibilities is solar energy. The Sun is a very powerful source of energy and can supply the energy needs of our planet. Solar energy can be used in a direct conversion process, in the case of photovoltaics, or indirectly, in the case of the heliothermic energy that transfers heat to a heat transfer fluid that later exchanges heat with water that is transformed into steam in a cycle conventional Rankine. The increase in population brings another important factor to be observed, increasing the amount of solid waste generated. The large production of waste is a very important topic to consider. This concern comes from the difficulty of finding a final destination for all this waste. Currently in Brazil the main forms of final destination of these wastes are landfills, controlled landfills and open dumps or dumps, and the amount of dumps is still large. An alternative to the final disposal of waste using one of these methods is the generation of energy through municipal solid waste (MSW). Many technologies exist with this apparent function. Pyrolysis, gasification, incineration, plasma pyrolysis, thermoselect and the production of residue-derived fuel (RDF) may be mentioned. This work has as objective to study a viable solution to the problem of the Jokey Landfill Brasilia, also known as "structural dump". To do so, it is proposed to simulate a hybrid power generation plant, such a plant will operate using solar energy generation technology (Heliothermia), urban solid waste and confined gas in the layers of waste deposited in the garbage dump.

Key-words: Hybridization, municipal solid waste, landfill, Heliothermic energy

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tecnologias CSP adaptada.	5
Figura 2 – Princípio de funcionamento uma calha parabólica.	6
Figura 3 – Quantidade de projetos, em construção, em processo de comissionamento ou em operação.	7
Figura 4 – Campo de coletores solares com o bloco de geração de potência e tanque de reservatório térmico - 50 MW Planta Andasol Localizada na Espanha).	7
Figura 5 – (a) e (b) : Espelhos de coletores de calha parabólica sendo lavados por caminhões.	8
Figura 6 – Esquema de um sistema de Torre Solar.	9
Figura 7 – Planta Solar Two nos EUA.	9
Figura 8 – Puerto Errado 1 - Projeto realizado pela Novatec Solar GmbH.	10
Figura 9 – Protótipo de coletor solar linear fresnel feito por Solarmundo na Bélgica.	11
Figura 10 – Sistema Linear Fresnel instalado no alto de um edifício.	11
Figura 11 – EuroDish Dish/Stirling 10 kW - Unidade de referência do país.	12
Figura 12 – Interação entre a radiação solar e os componentes da atmosfera terrestre	13
Figura 13 – Irradiação normal direta para o Brasil.	14
Figura 14 – Esquema de uma planta SICCS que utiliza calor oriundo do Sol para geração de vapor.	17
Figura 15 – Esquema de SICCS que funciona com FTC e tecnologia de calha parabólica.	18
Figura 16 – Esquema de SICCS que funciona com ar e tecnologia de Torre Central.	18
Figura 17 – Esquema apresentando diferentes formas de integrar CSP em uma planta hospedeira. (1) Aquecimento da água de alimentação; (2) vapor de alta pressão; (3) linha de reaquecimento a frio.	19
Figura 18 – Diagrama da planta de geração de energia Borges Termosolar (Traduzido).	21
Figura 19 – Esquema da planta de geração Kuraymat (Traduzido).	21
Figura 20 – Conceito de uma planta de geração híbrida solar/RSM (Traduzido).	22
Figura 21 – Esquema da planta SEGS IV com campo solar que utiliza tecnologia de Calha Parabólica (Traduzido).	23
Figura 22 – Planta padrão EFW combinada com um modelo adaptado da SEGS VI (Traduzido).	24
Figura 23 – A geração de energia por meio da combinação de energia fornecida por resíduos e o modelo SEGS VI adaptado (Traduzido).	25
Figura 24 – Área ocupada pelo Aterro Jokey Clube de Brasília	29
Figura 25 – Área utilizada pelo aterro ao longo dos anos	30

Figura 26 – Árvore de decisão para emissão de Metano produzido em terrenos de disposição de resíduos sólidos (Proposta pelo IPCC em 2006).	34
Figura 27 – Árvore de decisão para emissão de Metano produzido em terrenos de disposição de resíduos sólidos (Proposta pelo IPCC em 2000).	36
Figura 28 – Esquema do Sistema Integrado de Ciclo Combinado Solar simulado. C1- Compressor de Ar; C2- Compressor de gás; CC-Câmara de combustão; TG- Turbina a Gás; SP-Superaquecedor; RH-Reaquecedor; TVAP-Turbina a Vapor de Alta Pressão; TVBP-Turbina a Vapor de Baixa Pressão; COND-Condensador; PA- Pré-aquecedor; EVA-Evaporador; QA- Queimador Auxiliar; CS- Campo Solar Linear Fresnel.	42
Figura 29 – Esquema do ciclo Brayton.	43
Figura 30 – Esquema do ciclo Rankine.	44
Figura 31 – Esquema do Campo Solar Linear Fresnel.	45
Figura 32 – Ângulos modificadores longitudinal e transversal.	47
Figura 33 – Esquema de Loop proposto para a modelagem do campo solar.	48
Figura 34 – Dimensão do campo solar para 16 <i>loops</i>	49
Figura 35 – Componentes do balanço de energia para o FTC.	51
Figura 36 – Detalhe do tubo absorvedor da <i>Schott PTR70[®] Receiver</i>	53
Figura 37 – Componentes do balanço de energia para o tubo absorvedor.	54
Figura 38 – Tubo absorvedor da marca <i>Schott</i>	56
Figura 39 – Componentes do balanço térmico aplicado ao envelope de vidro do tubo absorvedor.	57
Figura 40 – Esquema do refletor secundário.	60
Figura 41 – Volumes de controle adotados para modelagem térmica do refletor secundário.	60
Figura 42 – Componentes do balanço energético para o volume de controle 1.	61
Figura 43 – Componentes do balanço energético para o volume de controle 2.	63
Figura 44 – Componentes do balanço energético para o volume de controle 3.	64
Figura 45 – Gráfico de da estimativa de geração de metano utilizando os métodos propostos pelo IPCC e pelo LandGEM.	72
Figura 46 – Cenários adotados para análise.	74
Figura 47 – Gráfico para apresentar a quantidade de metano utilizável e o metano utilizado por ano.	75
Figura 48 – Gráfico de comparação do calor na saída do <i>loop</i> para diferentes tamanhos do volume de controle.	76
Figura 49 – Gráfico de comparação da temperatura na saída do <i>loop</i> para diferentes tamanhos do volume de controle.	76
Figura 50 – Variação diurna de um dia típico em cada mês em Brasília.	77
Figura 51 – Geração de calor no campo solar para cada mês do ano.	78

Figura 52 – Gráficos com as parcelas de perda térmicas para um dia no início de cada estação do ano. a) Outono b)Inverno c)Primavera d)Verão.	79
Figura 53 – a) Produção de calor para um dia inicial do Outono. b) Produção de calor para um dia inicial do inverno. c) Produção de calor para um dia inicial da Primavera. d) Produção de calor para um dia inicial do verão.	80
Figura 54 – Gráfico para apresentar quantidades de energia que entram e saem do sistema para o dia 17 de Agosto	81
Figura 55 – Gráfico para apresentar quantidades de energia que entram e saem do sistema para o dia 25 de Março.	81
Figura 56 – Total de energia fornecida pelo sistema Linear Fresnel e o queimador auxiliar.	82
Figura 57 – Total de energia fornecida pelo sistema Linear Fresnel e o queimador auxiliar (caso com perdas do gás Metano).	83

Lista de tabelas

Tabela 1 – Quantidade de resíduos gerados e coletados no país nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.	27
Tabela 2 – Destinação final dos RSM (domiciliares e/ou públicos) por número de municípios	27
Tabela 3 – Quantidade de municípios por forma de disposição final dos resíduos .	28
Tabela 4 – Climas existentes no Distrito Federal	31
Tabela 5 – Valores da taxa de geração de metano e a indicação de acordo com o tipo de decaimento.	37
Tabela 6 – Taxa de geração de Metano recomendada de acordo com o tipo de resíduo e o clima.	38
Tabela 7 – Fator de correção de Metano de acordo com a disposição final dos resíduos.	39
Tabela 8 – Fatores para cálculo do Carbono Orgânico Degradável [COD].	40
Tabela 9 – Dados técnicos do coletor LF-11.	46
Tabela 10 – Quantidade de resíduos gerado e aterrado ao longo dos anos de funcionamento do aterro.	67
Tabela 11 – Valores de COD, F e Lo obtidos para cada ano em análise.	69
Tabela 12 – Quantidades de energia produzidas e consumidas pelos componentes da planta de geração.	83
Tabela 13 – Quantidades de energia produzidas e consumidas pelos componentes da planta de geração (caso com perdas do gás Metano).	84
Tabela 14 – Quantidade de Metano gerado anualmente estimada pelo método IPCC.	94
Tabela 15 – Quantidade de Metano gerado anualmente pelo método LandGEM . .	96
Tabela 16 – Dados técnicos do FTC THERMINOL [®] VP-1	102
Tabela 17 – Dados técnicos do tubo <i>Schott</i> PTR70 [®]	103
Tabela 18 – Estados termodinâmicos para a planta considerando perdas de gás metano	104
Tabela 19 – Estados termodinâmicos para a planta sem considerar perdas de gás metano	105

Lista de símbolos

a	Fator de correção na estimativa de geração de Metano (IPCC)	[-]
A	Área	[m^2]
Alf	Área do Refletor Lienar Fresnel	[m^2]
Ae	Área longitudinal externa	[m^2]
Ai	Área longitudinal interna	[m^2]
$Atransv$	Área transversal	[m^2]
COD	Carbono Orgânico Degradável	[$GgC/Gresíduo$]
cp	Calor Específico	[$\frac{J}{kg.K}$]
F	Fator de Forma	[-]
FCH_4	Fração em volume de CH_4 em gás de	[-]
FCM	Fator de correção de Metano	[-]
h	Entalpia	[$\frac{J}{kg}$]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[$\frac{W}{m^2.K}$]
i	Anos para os quais existem dados disponíveis	
k	Condutividade Térmica	[$\frac{W}{m.K}$]
k	Taxa de geração de Metano	[$\frac{1}{ano}$]
$L0$	Potencial de Geração de Metano	[$GgCH_4/Gresíduo$]
LW	Radiação térmica da atmosfera	[$\frac{W}{m^2}$]
\dot{m}	Vazão Mássica	[$\frac{Kg}{s}$]
OX	Fator de oxidação do Metano	[-]
P	Metano recuperado	[$\frac{Gg}{ano}$]
\dot{Q}	Energia na forma Calor	[W]
q	Fator que indica a porcentagem em perda de Metano	[-]

Re	Raio Externo	$[m]$
Ri	Raio Interno	$[m]$
Rg	Radiação solar global	$[\frac{W}{m^2}]$
S	Metano liberado para a atmosfera	$[-]$
s	Entropia	$[\frac{J}{kg.K}]$
t	Ano do inventário	
T	Temperatura	
U	Transmitância Térmica	$[\frac{W}{m^2.K}]$
Vol	Volume	$[m^3]$
\dot{W}	Potência	$[W]$

Símbolos gregos

η	Eficiência	$[-]$
θ	Ângulo de Incidência	$[^\circ]$
α	Absortividade	$[-]$
α	Ângulo de Elevação	$[^\circ]$
γ	Ângulo de Azimute	$[^\circ]$
τ	Transmissividade	$[-]$
ε	Emissividade	$[-]$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$[W/m^2.K^4]$
ρ	Densidade	$[kg/m^3]$
Δ	Diferença entre duas grandezas similares	

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
COD	Carbono Orgânico Degradável

CDR	Combustível Derivado de Resíduo
CSP	Concentrated Solar Power
DPO	Decaimento de Primeira Ordem
DNI	Direct Normal Irradiation
EES	Engineering Equation Solver
EFW	Energy from Waste
ETP	Evapotranspiração potencial
FCM	Fator de correção do Metano
FOD	First Order Decay
FTC	Fluído de Transferência de Calor
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IEA	International Energy Agency
LEERS	Locais de eliminação de Resíduos Sólidos
LCOE	Levelized Cost of Energy
MAI	Modificador de Ângulo de incidência
MATLAB	Matrix Laboratory
MSW	Municipal Solid Waste
PAM	Precipitação anual média
RMD	Resíduo moderadamente degradante
RLD	Resíduo lentamente degradante
RSM	Resíduos Sólidos Municipais
RRD	Resíduo rapidamente degradante
TAM	Temperatura anual média

SICCS	Sistemas Integrados de Ciclo Combinado Solar
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VC	Volume de Controle
UnB	Universidade de Brasília

Subscritos

<i>abs</i>	Tubo Absorvedor
<i>abs – FTC</i>	Propriedade absorvedor e fluído de transferência de calor
<i>ADV</i>	Advecção
<i>ar</i>	Ar
<i>ar – rfi</i>	Propriedade entre o ar e o refletor secundário (superfície interna)
<i>ar – rfe</i>	Propriedade entre o ar e o refletor secundário (superfície externa)
<i>ar – vd</i>	Propriedade entre o ar e o vidro
<i>Ars, iso</i>	Saída de ar Isentrópica
<i>Ar, e</i>	Entrada de Ar
<i>Ar, s</i>	Saída de Ar
<i>cond(rf)</i>	Transferência de calor por condução no refletor secundário
<i>cond(rf – f1)</i>	Transferência de calor por condução no refletor secundário face 1
<i>cond(rf – f2)</i>	Transferência de calor por condução no refletor secundário face 2
<i>cond(rf – f)</i>	Transferência de calor por condução no refletor secundário face 3
<i>conv(vd – atm)</i>	Convecção entre envelope de vidro e a atmosfera
<i>conv(abs – FTC)</i>	Convecção entre o tubo absorvedor e a atmosfera
<i>conv(rf – ati)</i>	Convecção entre o refletor secundário e a atmosfera (superfície interna)
<i>conv(rf – ate)</i>	Convecção entre o refletor secundário e a atmosfera (superfície externa)
<i>comb</i>	Combustível

$C1, ar$	Compressor de ar
$C2, comb$	Compressor de gás
$CH4s, iso$	Saída de Metano Isentrópica
$CH4, e$	Entrada de Metano
$CH4, s$	Saída de Metano
e	Entrada
ef	Efetiva
F	Fração
FTC	Fluído de transferência de calor
$FTC - a$	Propriedade do fluido de transferência de calor em um passo do tempo anterior
o	Ótica
$gases$	Gases de Exaustão
$gases, e$	Entrada de gases
$gases, s$	Saída de gases
$gases, iso$	Saída de gases isentrópica
$inércia(vd)$	Inércia Térmica do envelope de vidro
$inércia(abs)$	Inércia Térmica do tudo absorvedor
$inércia(FTC)$	Inércia Térmica do fluido de transferência calor
l	Longitudinal
lf	Coletores Linear Fresnel LW
$LW(abs)$	Radiação térmica emitida pelo absorvedor (superfície externa)
$LW(abs - rf)$	Radiação térmica emitida pelo absorvedor (superfície externa) e absorvida pelo refletor secundário
$LW(abs)$	Radiação Térmica emitida pelo Absorvedor
$LW(abs - vd)$	Radiação Térmica emitida pelo tubo absorvedor e absorvida pelo vidro

$LW(atm - rf)$	Radiação térmica da atmosfera para o refletor secundário
$LW(rf - vd)$	radiação térmica emitida pelo refletor secundário e absorvida pelo envelope de vidro
$LW(lf - vd)$	Radiação Térmica emitida pelo concentrador Linear Fresnel e absorvida pelo envelope de vidro
$LW(LW(lf - rf))$	Radiação Térmica emitida pelos coletores Linear Fresnel e o refletor secundário
$LW(rfi)$	Radiação emitida pela superfície interna do refletor secundário
$LW(rfe)$	Radiação emitida pela superfície externa do refletor secundário
$LW(vd)$	Radiação térmica emitida pela superfície externa do envelope de vidro
$LW(vd - abs)$	Radiação Térmica emitida pelo vidro e absorvida pelo tubo absorvedor
$LW(vd - rf)$	Radiação Térmica emitida pelo vidro e absorvida pelo refletor secundário
rf	Refletor Secundário
$rf - lf$	Característica geométrica do refletor secundário e o coletor Linear Fresnel
$Rg(rf)$	Radiação Global absorvida pelo refletor secundário
s	Saída
si	Superfície Interna
s, iso	Saída Isoentrópica
$solar$	Solar
$SW(abs)$	Radiação solar absorvida pelo tubo absorvedor
$SW(vd)$	Radiação Térmica Solar absorvida pelo vidro
t	Transversal
T	Total
TA, e	Entrada da Turbina a Vapor de Alta Pressão
TA, s	Saída da Turbina a Vapor de Alta Pressão

TB, e	Entrada da Turbina a Vapor de Baixa Pressão
TB, s	Saída da Turbina a Vapor de Baixa Pressão
TAs, iso	Saída da Turbina a Vapor de Alta Pressão Isentrópica
TBs, iso	Saída da Turbina a Vapor de Baixa Pressão Isentrópica
TG	Turbina a gás
TV, AP	Turbina a vapor de alta pressão
TV, BP	Turbina a vapor de baixa pressão
vd	Envelope de Vidro
$vd - a$	Propriedade do vidro em um passo do tempo anterior
$vd - rf$	Característica geométrica do envelope de vidro para o refletor secundário
$vd - lf$	Característica geométrica do envelope de vidro para o concentrador Linear Fresnel
z	Zênite

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação e Justificativa	1
1.2	Objetivo e Alcance	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	Energia Heliotérmica	4
2.2	Tecnologias Solares CSP para utilização em Geração de Eletricidade	5
2.2.1	Calha Parabólica	6
2.2.2	Torre Solar	8
2.2.3	Linear Fresnel	10
2.2.4	Disco Parabólico	11
2.3	Recurso Solar	12
2.4	Resíduos Sólidos aplicados à geração de energia	15
2.5	Plantas CSP híbridas de geração de energia	16
3	Resíduos Sólidos	26
3.1	Resíduos Sólidos Urbanos	26
3.1.1	Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos	28
3.2	Descrição do Lixão em Estudo	29
3.2.1	Localização e características do lixão	29
3.2.2	Clima na região do DF	30
4	Métodos para estimar a quantidade de gás metano gerada em Aterros Sanitários	32
4.1	Método IPCC	32
4.1.1	Taxa de geração de metano k [$\frac{1}{ano}$]	37
4.1.2	Potencial de geração de metano Lo [$\frac{GgCH_4}{Ggresiduo}$]	39
4.1.3	Fator de correção de Metano [FCM]	39
4.1.4	Carbono Orgânico Degradável COD [Gg C/ Gg RSU]	40
4.1.5	Fração de carbono orgânico degradável dissimilado COD_f	40
4.1.6	Fração de CH_4 em gás de aterro (FCH_4)	41
4.2	Método LandGEM	41
5	Modelagem Termodinâmica	42
5.1	Modelagem do Ciclo Combinado	42
5.1.1	Ciclo Brayton	43
5.1.2	Ciclo Rankine	44
5.2	Campo Solar	45
5.2.1	Configuração	45

5.2.2	Modelagem Térmica	49
5.2.3	Modelagem do FTC	50
5.2.4	Modelagem do tubo evacuado	53
5.2.5	Modelagem do Refletor Secundário	60
5.3	Queimador Auxiliar	66
6	Resultados e Discussões	67
6.1	Dados utilizados para estimar a produção de Metano no Aterro	67
6.1.1	Parâmetros utilizados na aplicação do método DPO do IPCC	69
6.2	Quantidade de gás metano gerado anualmente	72
6.3	Geração de Energia	75
7	Considerações Finais	85
	Referências	87
	Apêndices	93
APÊNDICE A	Resultados da Estimativa da geração de Metano pelo método IPCC	94
APÊNDICE B	Resultados da Estimativa da geração de Metano pelo método LandGEM.	96
	Anexos	101
ANEXO A	Dados técnicos do FTC THERMINOL® VP-1	102
ANEXO B	Dados técnicos do tubo <i>Schott</i> PTR70®	103
ANEXO C	Estados termodinâmicos para as plantas simuladas	104

1 Introdução

Neste capítulo inicial são apresentados a motivação e também o objetivo deste trabalho. Além da motivação e do objetivo também é apresentada a estruturação dos temas na sequência em que os mesmos são apresentados ao longo do trabalho.

1.1 Motivação e Justificativa

A quantidade de resíduos gerada em grandes metrópoles mundiais vem se tornando um problema ambiental de grandes proporções. A cidade de Nova York, por exemplo, gera cerca de 1,77 Kg por habitante por dia de lixo doméstico. Esse valor equivale a média de países do Primeiro Mundo (TOLMASQUIM; (CENTER), 2003). No Brasil, o problema ainda é mais grave já que os resíduos domésticos são em grande parte descartados de forma inadequada, na sua maioria apenas despejados sem qualquer tratamento em terrenos desocupados, popularmente conhecidos como lixões. A legislação vigente requer que esses Lixões sejam desativados e o descarte passe a ser em aterros sanitários, que são locais onde o lixo é processado de forma correta. No entanto, a simples desativação dos atuais lixões se apresenta como outro problema. O próprio local, ao ser abandonado pela atividade se torna atrativo para invasões o que representa vários riscos aos seus ocupantes. A falta de um planejamento na ocupação impede ações corretivas para evitar que o chorume contamine as fontes das águas locais. Além disso, o próprio terreno aterrado pelo lixo não permite construções residenciais adequadas. Adicionalmente, a produção de gás metano pela decomposição de matéria orgânica lá depositada, além de ser um poderoso gás de efeito estufa, pode gerar risco de explosão.

Aterro Jokey Club Brasília, conhecido como Lixão da Estrutural é um caso emblemático. Instalado em um local que fica a menos de 10km dos esferas mais relevantes do poder no Brasil, ele é o maior da América Latina ocupando uma área de 190 ha. Desde de 2007 existe uma determinação do Tribunal de Justiça do DF para se acabar com a utilização do Lixão da Estrutural como depósito de resíduo sólido urbano sendo que o descarte será em um Aterro Sanitário já em operação. Segundo Barbosa, Bernardes e Brito (2015) o "fluxo preferencial da pluma de contaminação apresenta risco de contaminação de córregos vizinhos a região, e estes são afluentes da futura fonte de abastecimento de Brasília."Então, os problemas descritos anteriormente terão que ser enfrentados pela atual e futuras administrações do DF. Situação semelhante existe por todo o país.

Por outro lado, a questão energética é um tema muito discutido atualmente (AZEVEDO; NASCIMENTO; SCHRAM, 2018). Esse alarde no tocante esse assunto se deve ao fato de que a demanda por energia tende a aumentar cada vez mais, já

que a população mundial tem tendência de crescimento (BRONZATTI; NETO, 2008). Alternativas à geração de energia por combustíveis fósseis devem ser buscadas já que essa representa uma ameaça global pelo aquecimento da atmosfera por gases de efeito estufa e as consequentes mudanças climáticas. No entanto, os resíduos sólidos urbanos podem ser usados para a geração de energia, por meio da utilização de algumas tecnologias como gaseificação, pirólise, incineração entre outras, ou ainda a combinação de algumas delas (HENRIQUES, 2004) e (CONSONNI; VIGANÒ, 2012). A existência de aterros também oportuniza o aproveitamento do gás confinado no mesmo para a geração de energia, o que também proporciona um menor prejuízo ambiental devido às emissões dos mesmos (OLIVEIRA, 2004). O gás gerado por meio da biomassa pode ser utilizado em motores de combustão interna alternativos (MARTÍNEZ et al., 2012) ou em turbinas a gás.

Além disso, a área ocupada pelo lixão pode ser aproveitada para a conversão de radiação solar em energia elétrica. O Sol envia para a Terra mais energia do que a humanidade consome em um ano, e para isso são necessários 45 minutos. Com as usinas de geração por meio da energia solar, toda a energia gerada pelos combustíveis fósseis hoje, poderia ser gerada utilizando apenas 1% dos desertos da Terra (REEKEN et al., 2014). Esses fatores podem transformar a remediação da desativação dos lixões em uma oportunidade de se estabelecer nestes locais um “hub” energético onde as diversas fontes são exploradas de forma complementar permitindo geração de eletricidade firme.

1.2 Objetivo e Alcance

Esse trabalho tem por objetivo avaliar por modelagem uma planta de geração de energia por meio de um ciclo combinado que utiliza energia solar e aproveita energia oriunda de resíduos sólidos e o gás confinado de aterro.

1.3 Estrutura da Dissertação

Além desse capítulo introdutório esse trabalho contém:

No Capítulo 2 intitulado *Revisão Bibliográfica* são apresentadas as tecnologias CSP de geração de energia disponíveis no mercado atual e que são utilizadas em plantas comerciais ou como forma de pesquisa e desenvolvimento. Nesse capítulo ainda são apresentados conceitos sobre recurso solar e também um apanhado sobre plantas solares híbridas que existem. Também são discutidos estudos recentes envolvendo aproveitamento de resíduos urbanos.

O capítulo 3 tem por título *Resíduos Sólidos* e nele estão apresentadas informações sobre a situação dos resíduos sólidos no Brasil e de maneira breve sobre as formas de

gerenciamento de resíduos sólidos municipais, além da descrição do lixão em estudo e do clima no Distrito Federal.

No capítulo 4 são apresentados os dois métodos utilizados nesse trabalho para estimar a quantidade de Metano gerado ao longo dos anos. O título do capítulo é *Metodologias de quantificação de gás em aterros sanitários*

A modelagem utilizada no trabalho está descrita no capítulo 5 intitulado *Modelagem Termodinâmica*. Nele são apresentados o equacionamento utilizado para modelar toda a planta de geração híbrida.

No capítulo 6, *Resultados e Discussões* são apresentados os resultados obtidos na simulação.

As considerações finais e sugestões para trabalhos futuros estão apresentadas no capítulo 7.

Apêndice A: Nesse apêndice apresentou-se os resultados da estimativa da geração de metano pelo método IPCC.

Apêndice B: Nesse apêndice apresentou-se os resultados da estimativa da geração de metano pelo método LandGEM.

Anexo A: Nesse anexo foram apresentados os dados técnicos do FTC THERMINOL[®] VP-1.

Anexo B: Nesse anexo foram apresentados os dados técnicos do tubo *Schott PTR70*[®]

2 Revisão Bibliográfica

No presente capítulo são apresentadas as revisões bibliográficas realizadas acerca dos principais temas envolvidos nesse trabalho. São abordados conceitos de Energia Heliotérmica, plantas de geração de energia que utilizam resíduos sólidos urbanos e finalmente plantas de geração de energia híbridas.

2.1 Energia Heliotérmica

A energia heliotérmica, também chamada de *Concentrating Solar Power* (CSP) é o processo de utilização ou acumulação da energia (em forma de calor) oriunda do sol, que é transmitida à Terra por meio dos raios solares. Esse processo ocorre por meio de espelhos que concentram esses raios em um único ponto ou em uma linha (concentrador). Esse calor acumulado pode ser utilizado tanto para gerar eletricidade quanto em processos industriais que requeiram altas temperaturas (IBICT, 2017).

A geração heliotérmica acontece de forma indireta, ou seja, antes de ser convertido em energia elétrica, o calor proveniente do Sol é captado nos concentradores e armazenado para posteriormente ser convertido em eletricidade. O calor é armazenado em um líquido chamado de Fluido Térmico, e posteriormente utilizado para aquecer a água dentro da usina. Depois dessa etapa a usina heliotérmica é igual a uma termoelétrica convencional, seguindo os mesmos processos desta.

Segundo IBICT (2017) entre as outras aplicações da heliotermia, podem ser citadas:

- produção de calor para processos industriais, tais como: calcinação, secagem de gesso, secagem de pintura de carros;
- sistemas de refrigeração (ar-condicionado e produção de água gelada);
- processos de dessalinização de água do mar.

A vantagem da utilização da heliotermia nesse tipo de processo vem da economia, tanto financeira quanto energética. Poupa-se a energia convencional e também economiza recursos convencionais, já que se utiliza energia proveniente do sol ao invés de se queimar madeira ou algum outro tipo de combustível fóssil, por exemplo.

Esse tipo de tecnologia se diferencia das demais fontes de energia intermitentes pelo fato da possibilidade de se utilizar um armazenamento térmico. Isso significa que parte do calor enviado pelo Sol é armazenado e a outra parte é utilizada na geração de eletricidade

propriamente dita. Isso acaba sendo uma grande vantagem, já que a energia armazenada pode ser utilizada no período da noite, por exemplo, quando não existe radiação solar direta, ou mesmo em momentos em que exista o acúmulo de nuvens o que prejudica a geração. No entanto, para o caso em questão, o armazenamento térmico não é relevante já que a energia armazenada na forma química do resíduo sólido urbano e no gás gerado na sua decomposição já está disponível para mitigar a intermitência da fonte solar numa instalação híbrida.

2.2 Tecnologias Solares CSP para utilização em Geração de Eletricidade

Atualmente existem quatro tecnologias CSP que podem ser citadas como possibilidades de utilização em sistemas de geração de energia e são elas: calha parabólica, torre solar, linear fresnel e disco parabólico. Segundo Brancalião (2015) a concentração da radiação solar pode ser pontual ou linear em tubos e ainda o receptor pode ser classificado como móvel ou estacionário. Estão apresentados na Figura 1 os tipos de tecnologias possíveis.

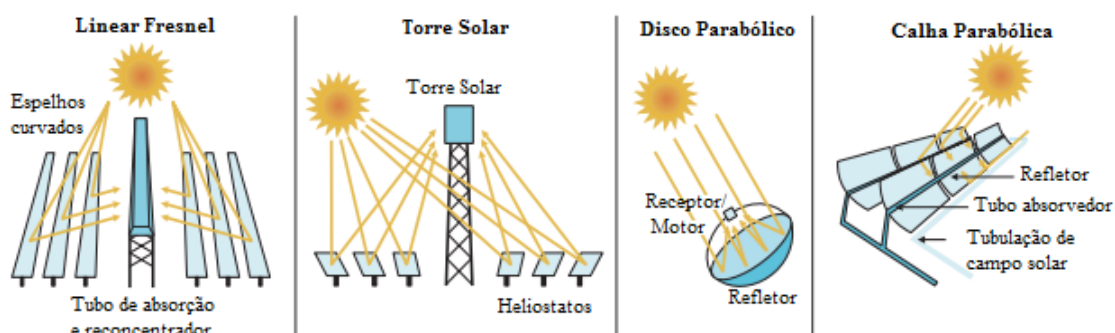


Figura 1 – Tecnologias CSP adaptada.

Fonte:(IEA, 2014)

A energia solar já há alguns anos tem despontado como uma grande solução para problemas energéticos em muitos lugares do mundo. Para notar isso basta analisar a quantidade de plantas instaladas atualmente ao redor do globo.

Também é necessário salientar que a energia solar não só é utilizada para a geração de energia. O princípio de funcionamento dessas tecnologias pode ir de algo como um aquecedor de água para casa ou um secador de alimentos, ou forno solar, até uma usina de geração de energia de grande porte. Também é possível citar como alternativa de utilização a dessalinização para obtenção de água própria para o uso humano. Existem sistemas de gaseificação de biomassa e produção de alumínio, processo que requer alto nível de

energia. Sistemas de refrigeração por absorção também podem ser citados como uma das aplicações das tecnologias solares (KALOGIROU, 2004).

A seguir estão descritas mais informações sobre cada uma das quatro tecnologias apresentadas até aqui.

2.2.1 Calha Parabólica

As centrais CSP térmicas parabólicas são centrais de grandes escalas (10 MW a > 100 MW). Essas plantas consistem de um campo solar, uma unidade geradora e ainda podem ser equipadas com um reservatório térmico para armazenar o calor gerado e assim utilizar posteriormente para geração de energia (REEKEN et al., 2014). É possível notar na Figura 2 o princípio de funcionamento dessa tecnologia. Os raios do sol atingem a superfície refletora e são refletidos para o tubo absorvedor pelo qual passa o fluido de trabalho.

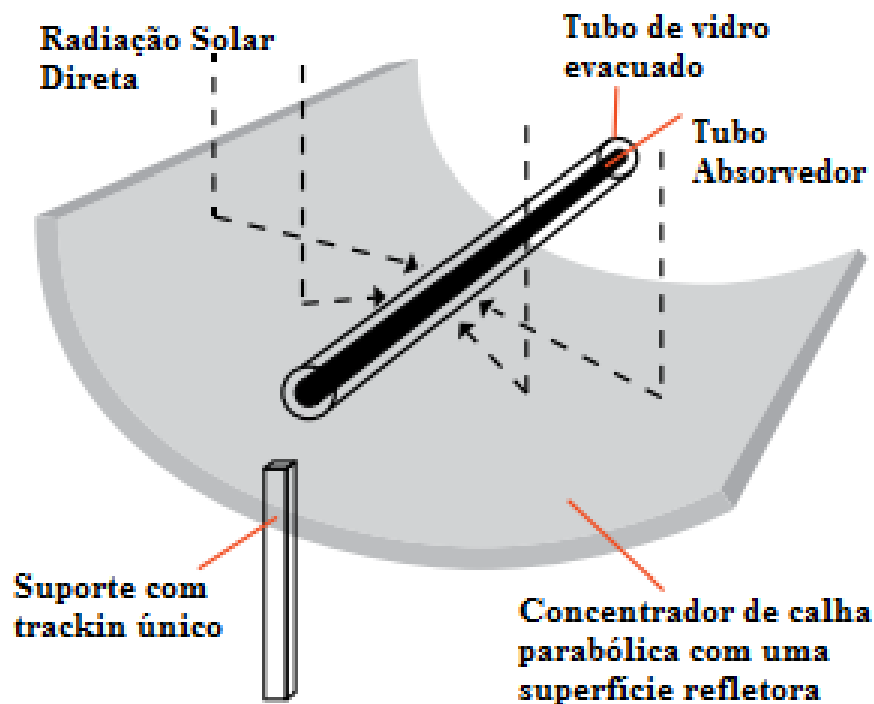


Figura 2 – Princípio de funcionamento uma calha parabólica.

Fonte:(REEKEN et al., 2014)

As centrais que utilizam a tecnologia de calha parabólica constituem a maior parte da energia solar concentrada instalada (REEKEN et al., 2014). Isso se deve ao fato de ser a tecnologia mais madura entre as existentes (BRANCALIÃO, 2015). Segundo REEKEN et al. (2014 apud SLEDZINSKA, 2017) em 2013 havia muitos projetos de energia

heliotérmica ao redor do globo terrestre. Na Figura 3 está apresentado a quantidade de projetos existentes nessa época para cada tecnologia.

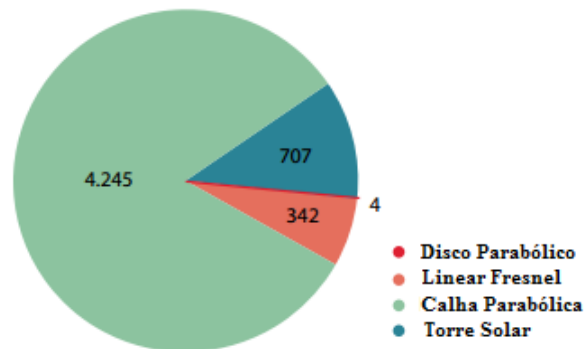


Figura 3 – Quantidade de projetos, em construção, em processo de comissionamento ou em operação.

Fonte: REEKEN et al. (2014 apud SLEDZINSKA, 2017)

É importante perceber que a quantidade de projetos que utilizam a tecnologia de calha parabólica é muito superior as demais tecnologias existentes. Sendo assim essa tecnologia é a mais madura em termos de utilização ao redor do mundo. Na Figura 4 está apresentado um exemplo de planta de geração de energia que utiliza essa tecnologia.



Figura 4 – Campo de coletores solares com o bloco de geração de potência e tanque de reservatório térmico - 50 MW Planta Andasol Localizada na Espanha).

Fonte:(REEKEN et al., 2014)

Na Figura 5 estão apresentados os espelhos de uma instalação de planta CSP que funciona com a tecnologia de Calha Parabólica. Por meio das mesmas é possível perceber a dimensão de cada uma das fileiras de espelhos dispostos na planta.

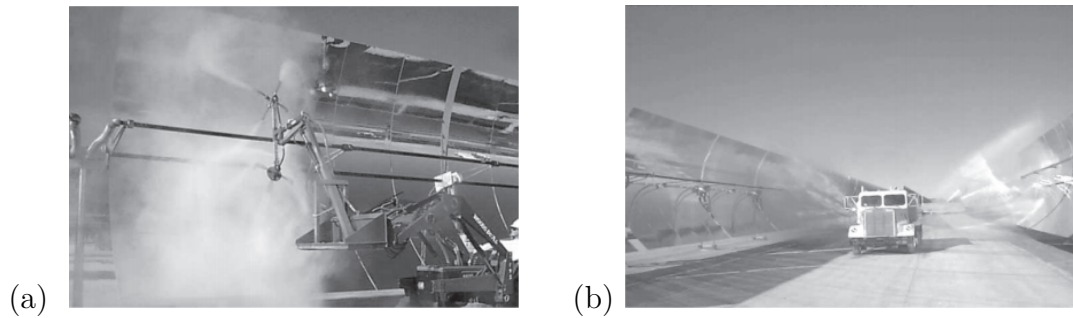


Figura 5 – (a) e (b) : Espelhos de coletores de calha parabólica sendo lavados por caminhões.

2.2.2 Torre Solar

A tecnologia conhecida como Torre Solar é, basicamente composta por cinco elementos: campo de heliostatos, o receptor, a torre, o reservatório térmico e o bloco de potência. Os espelhos também chamados de heliostatos que são ligeiramente curvos para melhorar a concentração dos raios do Sol no receptor que fica posicionado no alto da torre. O direcionamento dos espelhos depende do posicionamento geográfico da planta solar heliotérmica. O Receptor recebe os raios solares e convertem a radiação em calor, esse calor absorvido é transferido para o fluido de trabalho ou fluido de transferência de calor (FTC). Esse fluido pode ser água, sal fundido ou ar. O receptor é constituído de tubos pelos quais passam o fluido de transferência de calor. Esses tubos geralmente são feitos de cerâmicas para suportar temperaturas superiores a 500°C (BUCK et al., 2014).

Segundo BUCK et al. (2014) os receptores podem ser classificados em receptores externos, receptores de cavidade, receptores de absorção indireta e de absorção direta. Diversos tipos de fluidos de transferência de calor podem ser utilizados e a escolha do fluido vai indicar qual o tipo de receptor deve ser utilizado.

Um esquema de uma planta que funciona utilizando reservatório térmico está apresentado na Figura 6. Nele é possível notar todos os componentes acima citados e ter noção de como o sistema é disposto em uma planta. O posicionamento dos heliostatos ao redor da torre é de fundamental importância para um bom funcionamento da planta. Esse posicionamento/orientação depende da localização geográfica da planta de geração de energia.

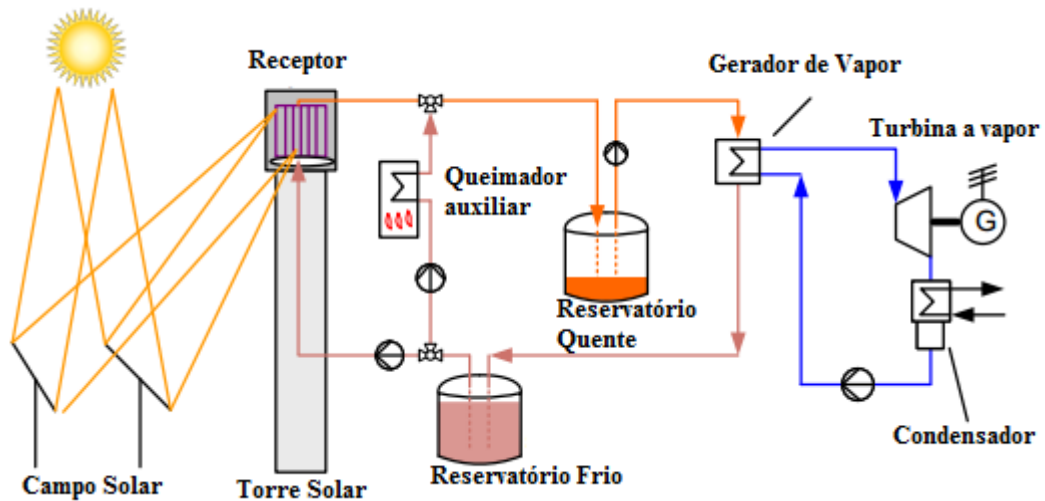


Figura 6 – Esquema de um sistema de Torre Solar.

Fonte:(BUCK et al., 2014)

Na Figura 7 está apresentado um exemplo de planta que utiliza a tecnologia de Torre Solar, a Solar Two nos Estados Unidos. Essa é uma planta de 10 MW_e com armazenamento de calor em sal fundido.



Figura 7 – Planta Solar Two nos EUA.

Fonte:(ENERGY, 2017)

2.2.3 Linear Fresnel

A tecnologia linear Fresnel assim como a calha parabólica funciona com o princípio de concentrar os raios do sol em uma linha onde está posicionado o tubo absorvedor. Esse tipo de concentrador foi desenvolvido a fim de obter uma tecnologia com um custo menor que as demais (ALMEIDA, 2013). Esse custo baixo se deve ao fato de a tecnologia ser composta por espelhos e estruturas mais leves e com menor peso e mais econômicas que proporciona e um melhor aproveitamento do terreno (MARANHÃO, 2017).



Figura 8 – Puerto Errado 1 - Projeto realizado pela Novatec Solar GmbH.

Fonte:(HÄBERLE et al., 2014)

Os coletores solares Linear Fresnel podem ser muito úteis quando se deseja uma redução dos custos nivelados da eletricidade. Isso é possível devido à alguns fatores como, facilidade de fabricação dos espelhos, tendo em vista que são estreitos, sua estrutura de suporte é leve, o vento pouco afeta sua estrutura, requer uma menor porção de terra e ainda dispensa articulações rotativas (FORD, 2008).

Zhu et al. (2014) ainda cita como vantagem a grande flexibilidade do fator de concentração proporcionado por essa tecnologia. Essa flexibilidade se deve à arquitetura de perfil que é leve. Isso proporciona ao sistema a capacidade de alcançar vários patamares de temperatura o que torna essa tecnologia aplicável para diversas necessidades.

Na Figura 9 está apresentado um protótipo de Linear Fresnel, por meio dessa

imagem é possível perceber as principais partes desse modelo de coletor.



Figura 9 – Protótipo de coletor solar linear fresnel feito por Solarmundo na Bélgica.

Fonte:(MORIN et al., 2006)

Além da utilização para geração de calor em processos industriais, alguns fabricantes propõem solução para ambientes urbanos, onde os coletores podem ser adaptados em telhados. Um exemplo disso está apresentado na Figura 10.



Figura 10 – Sistema Linear Fresnel instalado no alto de um edifício.

Fonte:(KOLOKOTSA, 2017)

2.2.4 Disco Parabólico

A tecnologia de disco parabólico funciona com o princípio de concentrar os raios solares em um ponto focal. Tais discos estão fixados em uma estrutura que possui dois eixos de rotação para possibilitar que os espelhos estejam sempre virados para o sol. Isso é possível devido ao fato de essa tecnologia ser modular, ou seja, independentes um do outro já que possuem cada um seu próprio motor Stirling (CASTRO, 2016). Essa característica ainda possibilita que a tecnologia seja utilizada individualmente ou em conjunto com outros coletores (MORAES, 2017).



Figura 11 – EuroDish Dish/Stirling 10 kW - Unidade de referência do país.

Fonte:(SBP, 1980)

2.3 Recurso Solar

Quando se trata de projeto de uma usina Heliotérmica alguns aspectos devem ser levados em conta, tais como o terreno e as condições do solo, a quantidade e disponibilidade de água no local onde a usina será instalada, infraestrutura de estradas para transporte de equipamentos e um dos fatores mais importantes que é o recurso solar.

O chamado recurso solar é a irradiação que o sol envia para a Terra e que está disponível todos os dias para nossa utilização, em processos de geração de energia, por exemplo, mas também é utilizada pela natureza para seus processos. Essa irradiação solar pode ser definida como, “energia incidente por unidade de superfície de um dado plano, obtida pela integração da irradiância durante um intervalo de tempo, normalmente uma hora ou um dia ” (PINHO; GALDINO, 2014).

A Irradiação solar se divide em irradiação direta e difusa. A componente direta é a que incide na superfície terrestre sem sofrer nenhum tipo de influência. Já a componente difusa é aquela que incide na superfície terrestre após sofrer espalhamento na atmosfera terrestre (PINHO; GALDINO, 2014). Centrais termoelétricas solares que utilizam tecnologias concentradoras necessita de uma quantidade mínima de irradiação solar direta normal,

já que utiliza essa parcela da irradiação (TIBA; REIS; SOARES, 2017). Apesar da grande quantidade de energia que chega na atmosfera terrestre boa parte da mesma acaba não alcançando o solo devido ao espalhamento ocorrido na própria atmosfera. Esse espalhamento ocorre devido a camada de ozônio, vapor de água, aerossóis e nuvens (LOVEGROVE; STEIN, 2012) e (PEREIRA et al., 2006).

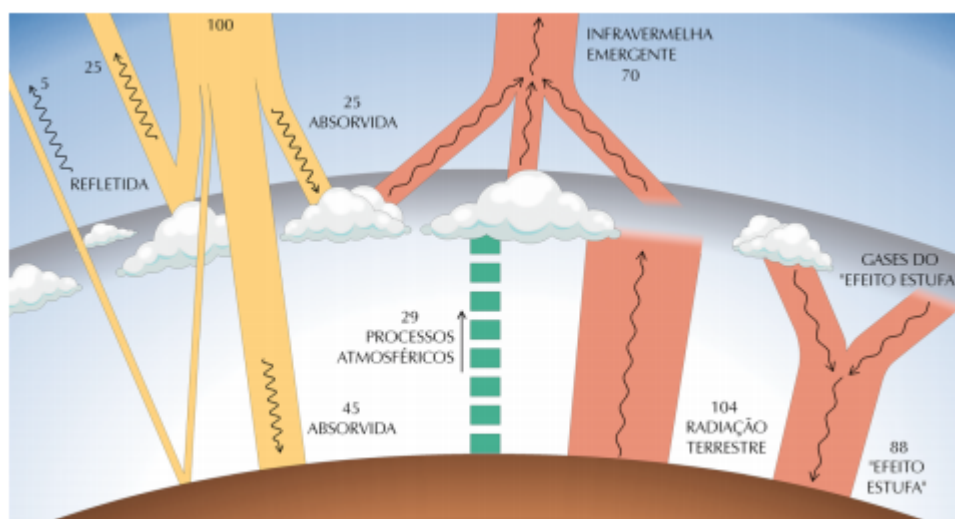


Figura 12 – Interação entre a radiação solar e os componentes da atmosfera terrestre .

Fonte:(PEREIRA et al., 2006)

A quantidade de recurso solar disponível na superfície terrestre está intimamente ligada à fenômenos que ocorrem a nível espacial. Sendo possível citar a distância que o Sol se encontra do planeta Terra e também os movimentos que a própria Terra possui em relação ao Sol. O ciclo de energia incidente do Sol na Terra varia dentro de um dia e dentro de um ano. As variações anuais ou ciclo anual se deve ao fato de o eixo da Terra está inclinado 23,45 graus em relação ao Sol. A duração dos dias é afetada de acordo com o posicionamento geográfico terrestre, diferentes latitudes vão apresentar diferentes durações para os dias. As estações do ano são definidas pelos solstícios, dias em que o Sol está posicionado sobre os trópicos de Capricórnio e de Câncer e também pelos equinócios que são os dias em que o Sol está posicionado sobre o Equador (PEREIRA et al., 2006).

A quantidade de recurso que chega ao topo da atmosfera da Terra é fortemente influenciada também pelo movimento de rotação do planeta. Para entender melhor a influência dos dois movimentos terrestres é preciso descrever o posicionamento solar geometricamente. Um exemplo de recurso solar está apresentado na Figura 13 que mostra a radiação solar no plano inclinado média no ano.

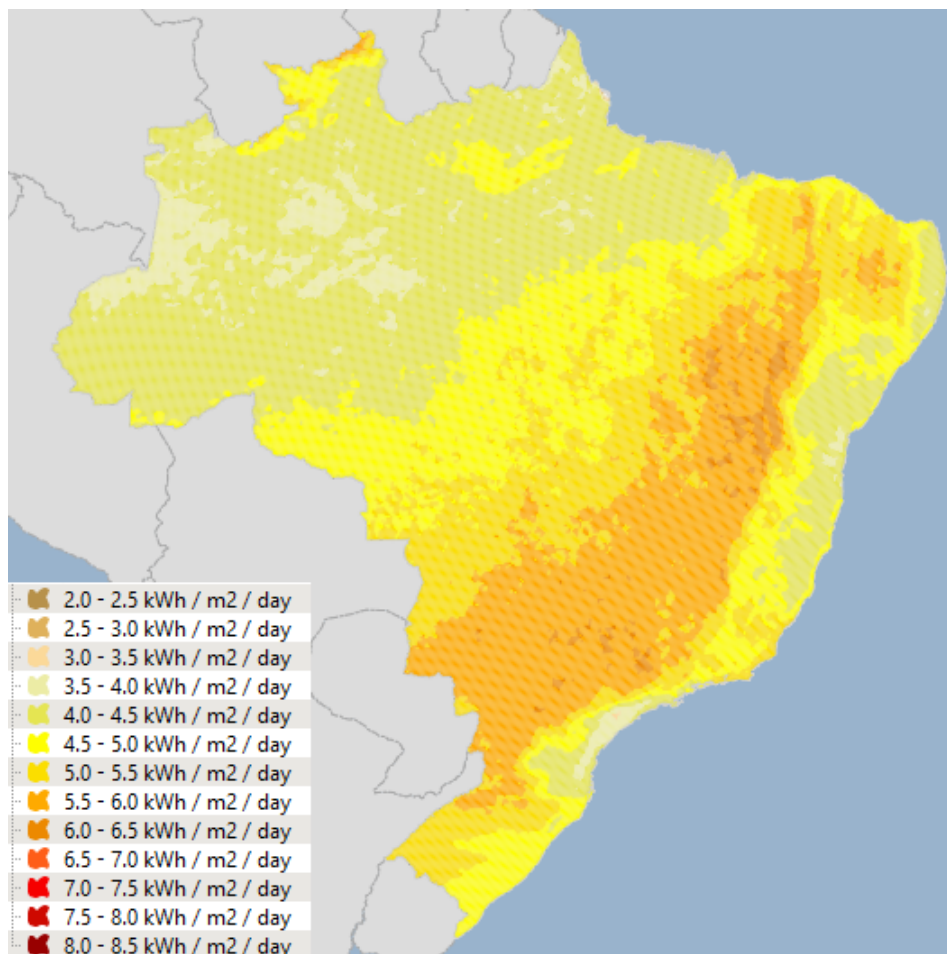


Figura 13 – Irradiação normal direta para o Brasil.

Fonte:(GEOSPATIALTOOLKIT, 2005)

Uma outra alternativa à medição é a estimativa dos dados solarimétricos através de equações e modelos desenvolvidos para tal fim. No Brasil, por exemplo, é utilizado o Modelo BRASIL-SR (PEREIRA et al., 2006). O BRASIL – SR é um modelo físico utilizado para obter algumas estimativas da radiação solar incidente no solo terrestre. Esse modelo utiliza métodos de aproximação para solucionar o problema da equação de transferência radiativa combinado com a utilização de parâmetros que são obtidos através de imagens de satélites (MARTINS; PEREIRA, 2003).

Muitas das pesquisas realizadas hoje no Brasil, que envolvem o tema de geração de energia heliotérmica, se valem dessa ferramenta para realizar a estimativa de parâmetros importantes ao assunto (COSTA; MARTINS; PEREIRA, 2017) e (OLIVEIRA; PALHETA; SEABRA, 2017). Esse modelo juntamente com o Atlas solarimétrico são de extrema importância para pesquisas que contribuem para o avanço e aperfeiçoamento das plantas de geração de energia solar e suas formas híbridas. Com esse modelo foi possível a elaboração de mapas de irradiação solar incidente para o Brasil (MARTINS et al., 2007).

2.4 Resíduos Sólidos aplicados à geração de energia

Atualmente existem pesquisas para analisar a viabilidade de geração de energia utilizando resíduos urbanos e também o gás gerado pelos mesmos quando depositados em aterros (MARTINS, 2017) e (GOMES; NETO, 2017). Essa alternativa tem sido colocada em discussão devido às altas tarifas pagas pela energia elétrica (MAZZONETTO; FIALHO, 2016).

Alguns estudos apontam que talvez o aproveitamento energético de resíduos sólidos ainda não seja viável para colaborar com o fornecimento energético para o Brasil, porém pode ser uma alternativa importante para a mitigação do problema energético em regiões pequenas e ainda colaborar com o problema da destinação final dos resíduos sólidos urbanos (SOARES, 2017). Existem muitas possibilidades de aproveitamento energético de resíduos, entre elas a gaseificação, pirólise, incineração, a produção de combustível derivado de resíduo (CDR) entre outros.

Alguns autores defendem que a Pirólise pode ser uma alternativa atrativa para o tratamento de resíduos sólidos municipais devido a grande quantidade de resíduo gerada no mundo e os grandes problemas ambientais que os mesmos causam (MARTINS et al., 2007). O autor ainda cita alguns trabalhos de aplicações da Pirólise para tratamento de material orgânico, plásticos, pneus, resíduos perigosos e biomassa. Segundo Sampaio (2014) a tecnologia de processamento de RSU para obtenção de CDR é largamente utilizada para melhorar o rendimento desses resíduos como combustível em processos de geração de energia.

A incineração também pode ser aplicada para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos. Uma das grandes vantagens da incineração é o fato de ela reduzir o volume de resíduos em torno de 90% e o seu peso a 15% (MORAES, 2016).

Com o aumento da demanda energética mundial e um aumento considerável na quantidade de resíduos gerados pela população, é de suma importância conhecer as tecnologias disponíveis para aproveitar os resíduos e ainda mitigar o problema ambiental causados pelos mesmos.

2.5 Plantas CSP híbridas de geração de energia

Pesquisas realizadas na década de 80 mostram que a energia solar já era discutida e aplicada em diversos cenários para geração de energia (MCDONALD, 1986).

Ainda na década de 80 começava a surgir a discussão sobre plantas híbridas que utilizavam energia solar combinada com biomassa ou resíduos para geração de energia (MCDONALD, 1986). É bem verdade também que as primeiras plantas híbridas ainda demoraram para começar a ser construídas e colocadas em funcionamento. Como exemplo pode ser citada a planta Termosolar Borges de 24,8 MW_e (COT et al., 2010), a qual entrou em funcionamento apenas em 2012 (PETERSEIM et al., 2014). Essa planta utiliza a tecnologia CSP conhecida como calha parabólica, que consiste em espelhos que concentram os raios do sol em tubos absorvedores, pelo qual escoam o fluido térmico que é aquecido para posterior geração de vapor.

Hoje em dia as plantas CSP híbridas estão muito bem estabelecidas em todo o mundo, principalmente com gás natural ((NREL, 2010) e Brakmann et al. (2009)) e biomassa. Isso traz alguns benefícios econômicos para o investidor, já que a hibridização reduz custos de operação da planta por meio da utilização conjunta de equipamentos como as turbinas a vapor e condensadores e ainda na despachabilidade da energia, já que durante o dia a energia pode ser produzida por meio da tecnologia CSP e quando essa não estiver operando é possível gerar energia por meio do outro recurso da planta. A hibridização de plantas CSP ainda proporciona o benefício da diminuição de investimentos, acarretando com isso um menor risco para o investidor (PETERSEIM et al., 2014).

Segundo Peterseim et al. (2014) gás natural, biomassa, energia geotérmica e materiais residuais podem ser utilizados para produzir energia de forma híbrida com uma planta CSP. Em muitos casos de combinação de uma planta CSP, opta-se por utilizar plantas de sistemas integrados de ciclo combinado solar (SICCS), que são plantas de geração integrada. Uma planta de geração integrada é formada por uma central convencional de ciclo combinado, um campo com espelhos coletores e um gerador de vapor solar. Em períodos do dia ensolarados a água de alimentação é retirada do trocador de calor do ciclo combinado e convertida em vapor no gerador de vapor solar. Em seguida, o vapor gerado é devolvido ao gerador de vapor que é responsável pela recuperação do calor e então os fluxos são superaquecidos (BAGHERNEJAD; YAGHOUBI, 2010). Nos períodos noturnos a planta de geração integrada funciona como uma planta de geração de ciclo combinado tradicional (KELLY; HERMANN; HALE, 2001).

Na Figura 14 está apresentado um esquema de uma SICCS. A tecnologia solar é utilizada nesse caso para superaquecer previamente o fluido que em seguida entra em um superaquecedor (DERSCH et al., 2004).

Kelly, Hermann e Hale (2001) cita algumas vantagens nas plantas SICCS quando

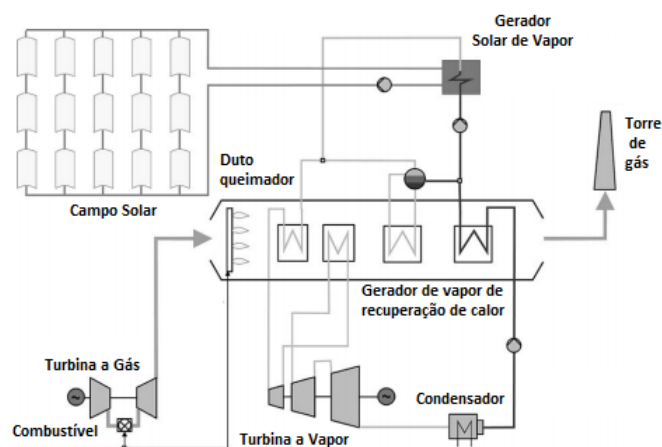


Figura 14 – Esquema de uma planta SICCS que utiliza calor oriundo do Sol para geração de vapor.

Fonte:(DERSCH et al., 2004)

comparadas à plantas de geração que utilizam um ciclo Rankine com a tecnologia de Calha Parabólica, sendo elas: a geração de eletricidade com uma eficiência maior nas plantas de geração SICCS, a segunda vantagem é que o custo para se instalar uma turbina a vapor com uma capacidade maior é menos do que o custo para instalar uma planta solar apenas. Por fim, segundo os autores, a planta de geração integrada não sofre tanto com ineficiências térmicas devido a partida e ao desligamento diário da turbina.

Segundo, Johansson e Burnham (1993 apud KELLY; HERMANN; HALE, 2001) a *Luz Solar International* foi a pioneira na proposta do conceito de uma planta solar integrada. Tal planta de geração integrava a tecnologia solar de calha parabólica com uma planta de ciclo combinado.

Horn, Führung e Rheinländer (2004) apresentam em seu trabalho outras possibilidades de integração, ou seja, outras configurações para uma SICCS diferente da apresentada na Figura 14. Os autores apresentam três possibilidades de integração de um ciclo combinado:

- fluido de transferência de calor (FTC) com tecnologia de calha parabólica;
- ar em uma torre central com campo de heliostatos;
- sal fundido em uma torre central com campo de heliostatos.

Na Figura 15 está apresentado um esquema de uma planta que utiliza o FTC com a tecnologia de calha parabólica.

Na Figura 16 um outro esquema de uma planta de geração que utiliza ar em uma torre central.

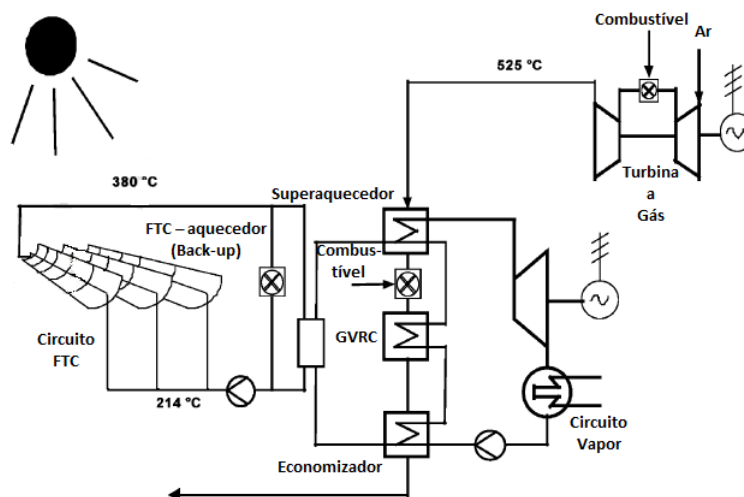


Figura 15 – Esquema de SICCS que funciona com FTC e tecnologia de calha parabólica.

Fonte:(HORN; FÜHRING; RHEINLÄNDER, 2004)

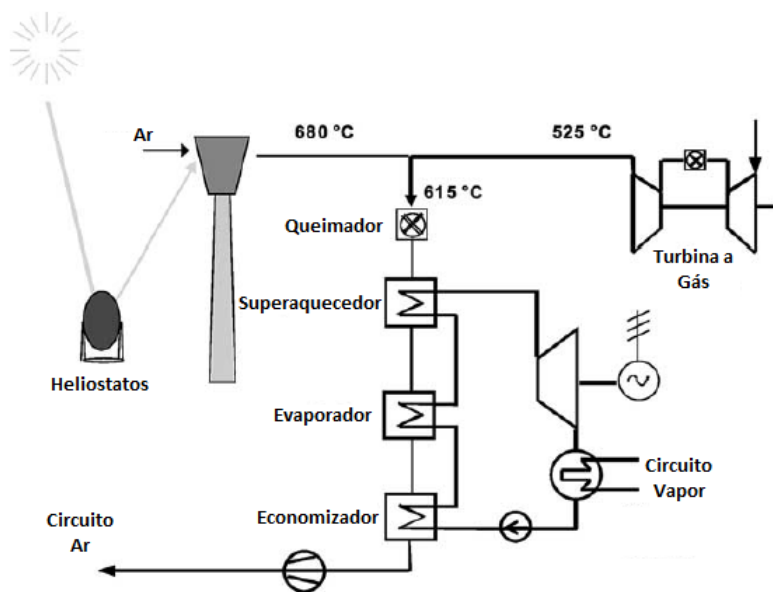


Figura 16 – Esquema de SICCS que funciona com ar e tecnologia de Torre Central.

Fonte:(HORN; FÜHRING; RHEINLÄNDER, 2004)

É necessário também categorizar os tipos de hibridização possíveis para identificar a dependência entre a tecnologia CSP e o outro componente do sistema de geração de energia (PETERSEIM et al., 2014). O autor apresenta três tipos de hibridização com respeito ao nível de dependência, são elas: sinergias híbridas leves, sinergias híbridas médias e sinergias híbridas fortes.

- **Sinergias híbridas leves:** Ocorre quando há apenas compartilhamento de alguma

infraestrutura da planta, a operação de equipamentos de uma tecnologia não depende da outra a qual está sendo combinada para geração de energia.

- **Sinergias híbridas médias:** Nesse caso as duas tecnologias estão fisicamente ligadas entre si. Ocorre quando existe compartilhamento do equipamento principal, tais como a turbina ou o condensador, entre as tecnologias. No entanto o componente CSP requer a operação da planta hospedeira, já a planta hospedeira funciona sem a necessidade do funcionamento do componente CSP. Com isso se reduz custos com infraestrutura, mas a contribuição solar nesse tipo de planta híbrida é menos que 10% da capacidade da planta.
- **Sinergias híbridas fortes:** Nesse caso a tecnologia CSP está ligada fisicamente à outra tecnologia de geração. Ocorre também nesse tipo de hibridização o compartilhamento do equipamento principal e ainda tem uma participação do componente solar maior em comparação ao caso de sinergia média, cerca de 30%.

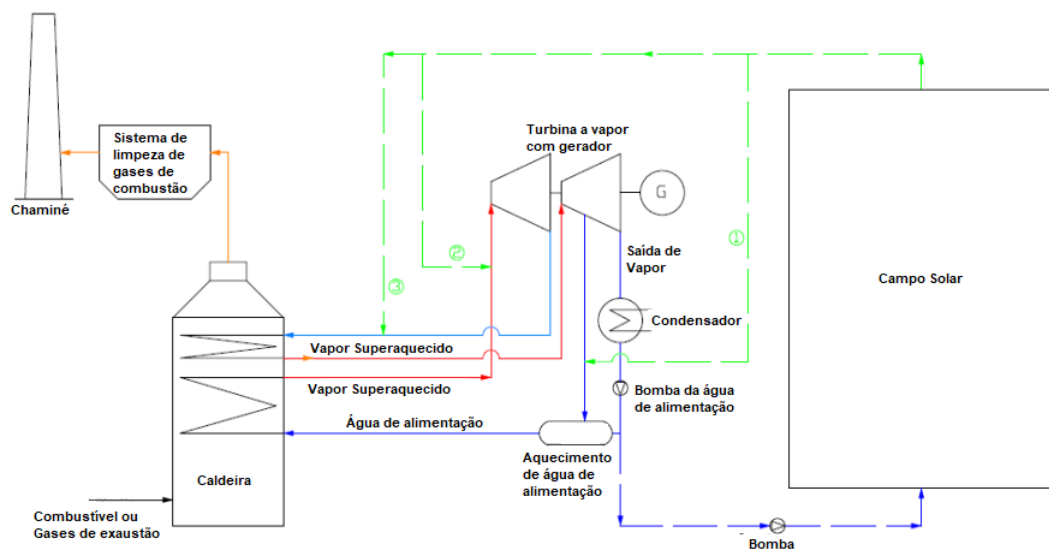


Figura 17 – Esquema apresentando diferentes formas de integrar CSP em uma planta hospedeira. (1) Aquecimento da água de alimentação; (2) vapor de alta pressão; (3) linha de reaquecimento a frio.

Fonte:(PETERSEIM et al., 2012)

Uma das vantagens das plantas híbridas é que elas são viáveis em locais com menor quantidade de DNI do que plantas que são isoladas (PETERSEIM et al., 2012). Além disso a hibridização pode reduzir o LCOE (TURCHI; MA; ERBES, 2011). Segundo Peterseim et al. (2012) essas reduções poderiam diminuir ou até mesmo eliminar a necessidade de incentivos governamentais o que poderia motivar financiadores e fornecedores a construir

plantas CSP. A hibridização ainda torna o projeto de uma planta CSP menos complexo e menos oneroso já que pode substituir o reservatório térmico.

Atualmente tem sido estudada a hibridização de plantas CSP com muitas outras tecnologias, entre elas gás natural, biomassa e resíduos, carvão, geotérmica, eólica (PETERSEIM et al., 2014).

As tecnologias CSP têm sido amplamente utilizadas ao redor do planeta. Uma das formas mais utilizadas de hibridização é com o gás natural, em que a configuração mais utilizada é a de uma caldeira para queima auxiliar em paralelo para contribuir como a produção de vapor (MALAGUETA et al., 2012). Ainda é possível mencionar a utilização de tecnologias CSP para aumentar a eficiência de geração de energia em unidades já existentes em usinas de cogeração do setor sucroalcooleiro (RESTREPO et al., 2014) e com a queima de combustíveis fósseis (POUSINHO et al., 2015).

Há também um interesse em estudos na combinação de geração de energia por meio de plantas CSP e a tecnologia fotovoltaica (JU et al., 2017). Essa hibridização se torna atrativa pelo fato de a tecnologia fotovoltaica ser mais barata quando comparada com o armazenamento térmico, por exemplo, (HLUSIAK et al., 2014). Outra vantagem da combinação das duas tecnologias em comparação com as mesmas tecnologias utilizadas de forma isoladas é a produção de energia de qualidade melhor (JU et al., 2017). Além dessa possibilidade ainda existe a promissora possibilidade de hibridização CSP-CPV (GREEN et al., 2015). Segundo Cocco, Migliari e Petrollese (2016) essa integração diminui o problema da despachabilidade.

Em alguns lugares do planeta onde existem zonas geotérmicas quentes estão disponíveis para uma utilização híbrida CSP-geotérmica. Existem avaliações econômicas e técnicas desse tipo de hibridização e apontam valores competitivos do preço da energia produzida (ASTOLFI et al., 2011). É uma forma de geração de energia que tem crescido bastante nas últimas décadas. E tem sido investigada pela comunidade acadêmica (ZHOU; DOROODCHI; MOGHTADERI, 2013).

Na Figura 18 está apresentado um esquema da planta híbrida Termosolar Borges que é a primeira planta de geração híbrida solar-biomassa do mundo. Essa planta de geração nominal de potência de $24,8 MW_{el}$ e ocupa uma área de $691509 m^2$ (COT et al., 2010) e utiliza a tecnologia de calha parabólica. A planta funciona 24 horas por dia, sendo que no período noturno utiliza a energia vinda da biomassa e durante o dia a energia que o sol oferece.

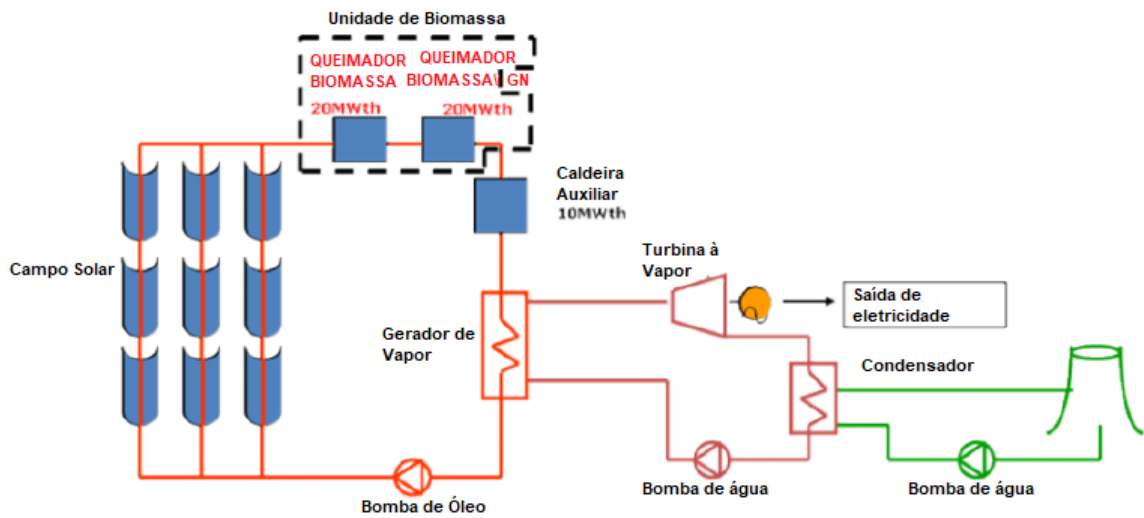


Figura 18 – Diagrama da planta de geração de energia Borges Termosolar (Traduzido).

Fonte:(COT et al., 2010)

Existe também uma SICCS em Kuraymat, cidade localizada cerca de 90 km ao sul de Cairo. Essa planta utiliza a tecnologia de calha parabólica e um ciclo combinado que utiliza gás em uma turbina a gás e um ciclo Rankine convencional. Com a presença do sol a planta é capaz de gerar cerca de 126 MW_e e sem a presença do sol cerca de 104 MW_e .

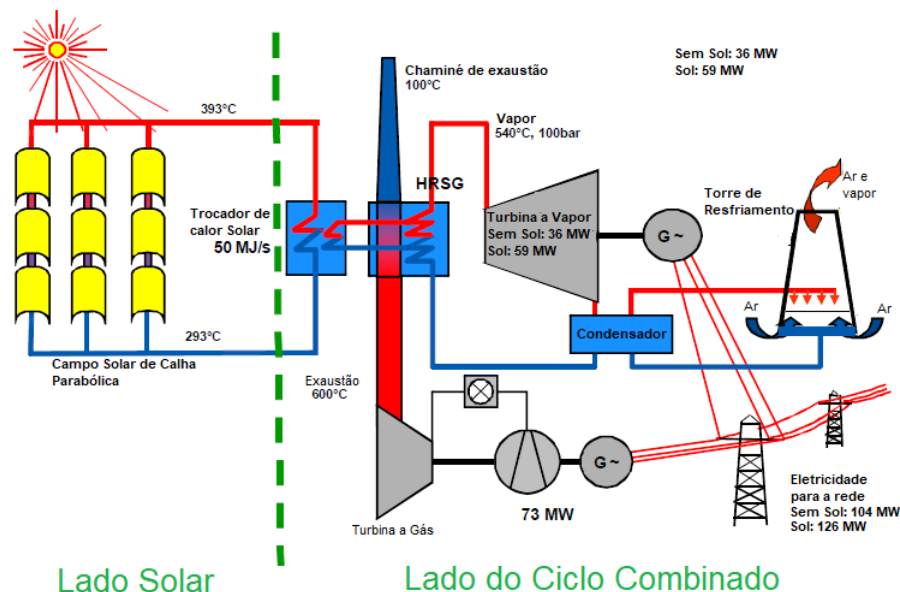


Figura 19 – Esquema da planta de geração Kuraymat (Traduzido).

Fonte:(BRAKMANN et al., 2009)

Uma das alternativas propostas na atualidade na literatura para redução do número

de locais impróprios para disposição de resíduos sólidos urbanos é o aproveitamento dos mesmos para geração de energia. Peterseim et al. (2012) apresenta em seu trabalho um conceito de uma planta de geração híbrida (Solar/RSM), Figura 20.

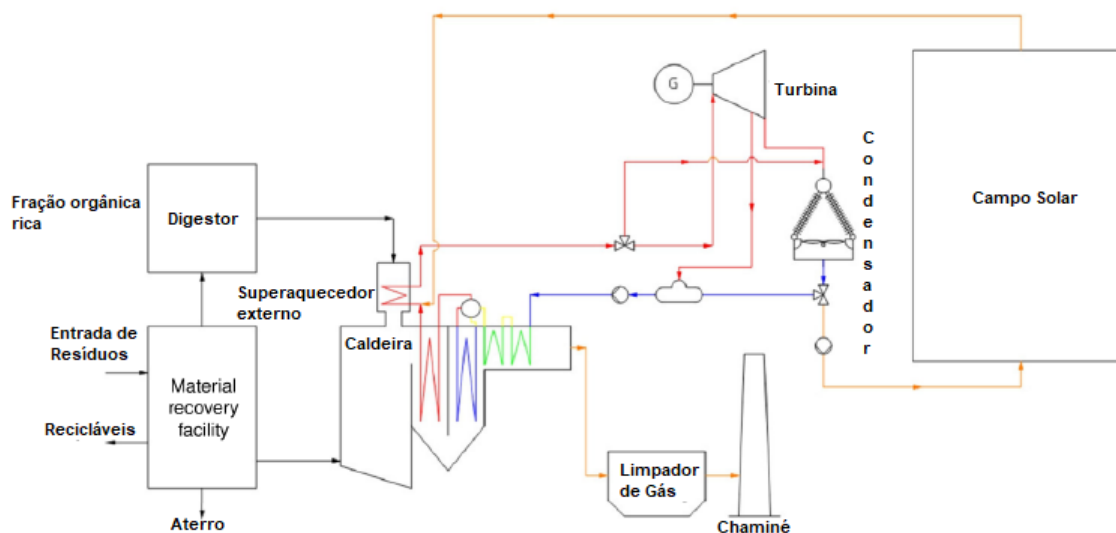


Figura 20 – Conceito de uma planta de geração híbrida solar/RSM (Traduzido).

Fonte:(PETERSEIM et al., 2012)

Esse modelo que é uma proposta de planta para ser instalada em Swanbank. Nesse modelo de planta os resíduos que podem ser reciclados são separados e os que necessitam ir ao aterro são encaminhados para lá, porém os resíduos como, fração orgânica e madeira são úteis para a usina. Essa usina utiliza $12,5 \frac{t}{h}$ de resíduos de madeira e $6,25 \frac{t}{h}$ de RSM. Podem ser necessários $2600 \frac{m^3}{h}$ de gás oriundo de aterro para manter a geração no momento de demanda máxima.

SPLIETHOFF et al. (2010) apresenta em seu trabalho um esquema da planta SEGS VI, uma planta solar instalada no deserto na Califórnia. Essa é uma planta que utiliza um campo solar com a tecnologia de Calha Parabólica que utiliza Gás Natural como combustível de backup e com uma capacidade de 35 MW. Essa planta é tomada como referência para estudos do autor e seu esquema está apresentado na Figura 21.

Esse ciclo proposto é muito semelhante ao de uma planta de geração de combustível fóssil. Na Figura 21 é possível notar que o vapor é produzido por meio de troca de calor com o óleo aquecido no campo solar por meio da radiação oriunda do sol. O vapor expandido no primeiro estágio da turbina retorna para ser reaquecido até alcançar a temperatura de 371°C e então é expandido no segundo estágio da turbina. O vapor que sai da turbina é condensado em um torre de resfriamento híbrida a água que entra no campo solar é pré aquecida até uma temperatura de 230°C . Nos períodos noturnos quando não há radiação solar disponível se utiliza um queimador auxiliar de gás (SPLIETHOFF et al., 2010).

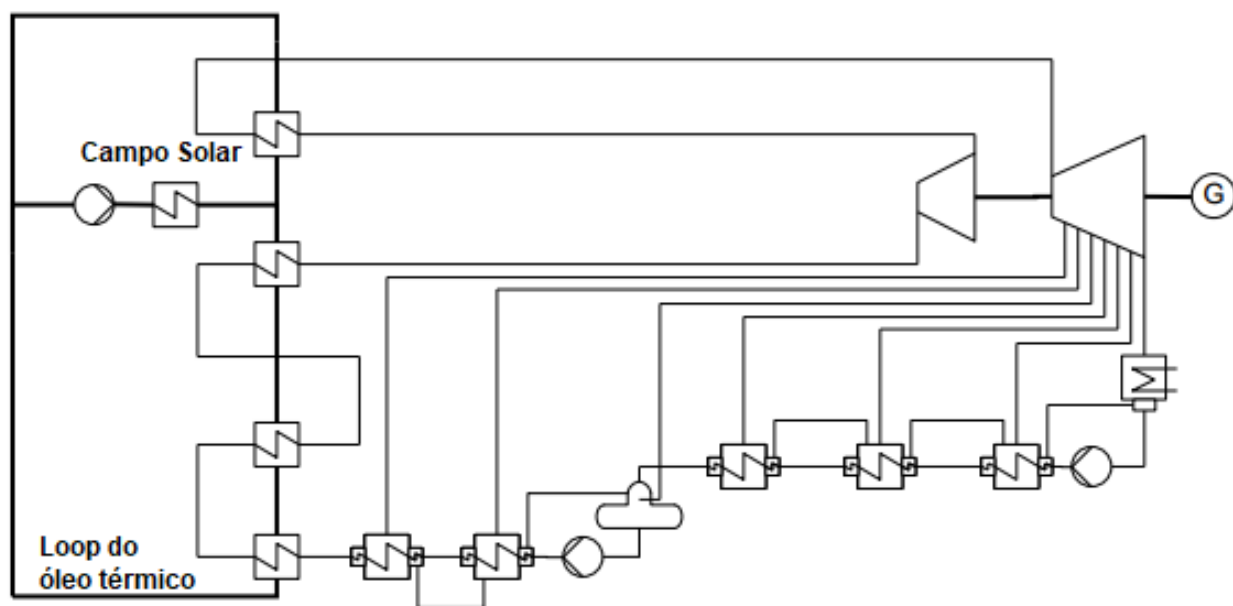


Figura 21 – Esquema da planta SEGS IV com campo solar que utiliza tecnologia de Calha Parabólica (Traduzido).

Fonte:(SPLIETHOFF et al., 2010)

A proposta apresentada por SPLIETHOFF et al. (2010) é utilizar a planta SEGS VI como modelo combinado com um modelo de planta EFW padrão. A parte inferior da Figura 22 é a planta padrão de geração que utiliza a energia fornecida por resíduos sólidos. A turbina de baixa pressão, o condensador, o preaquecedor e o tanque de água de alimentação pertencem aos dois ciclos ao mesmo tempo.

O último estudo de caso proposto por SPLIETHOFF et al. (2010) é uma combinação dos dois esquemas de plantas apresentados na Figura 21 e na Figura 22 chamada de “a mais nova geração EFW” e está apresentada na Figura 23. Nessa nova proposta aparece um preaquecedor na saída da turbina. O ciclo funciona com vapor que atinge 440°C e 130 bar o autor aponta que não havia na época na literatura plantas CSP que atingiam esse patamar de temperatura no estado da arte, mas existiam pesquisas para subir esse patamar para 500°C. Esse modelo de planta é baseado em uma proposta de planta que aproveita energia de resíduos em Amsterdam. Tal projeto de produção de energia por meio de resíduos utiliza uma quantidade de duas vezes 300000 t por ano de resíduos.

Em seus resultados o autor mostra que a última das combinações é a que causa o maior aumento de eficiência e também na produção de eletricidade. Sendo assim esse estudo mostra que utilizar plantas híbridas pode aumentar tanto a eficiência quanto a produção total de energia. Essa ideia de hibridização trás um benefício que é o de por meio do pré-aquecimento água e ar, obtidos pela energia cedida pelo sol, é possível uma geração maior de energia elétrica que exige apenas mudanças pontuais no Ciclo Rankine e

no campo solar.

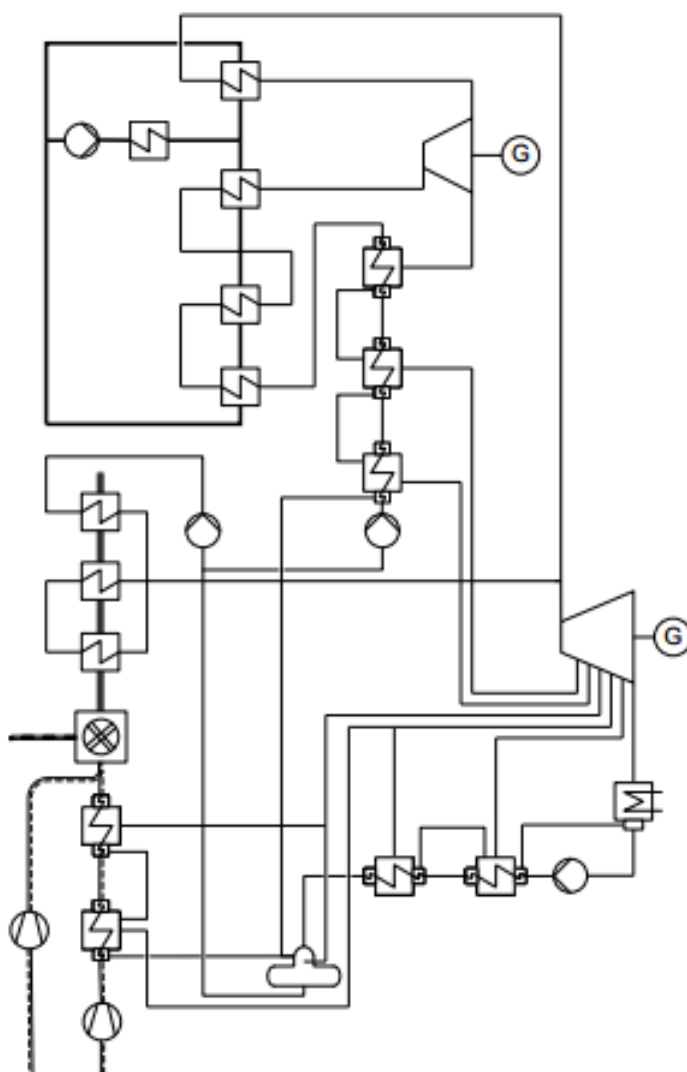


Figura 22 – Planta padrão EFW combinada com um modelo adaptado da SEGS VI (Traduzido).

Fonte:(SPLIETHOFF et al., 2010)

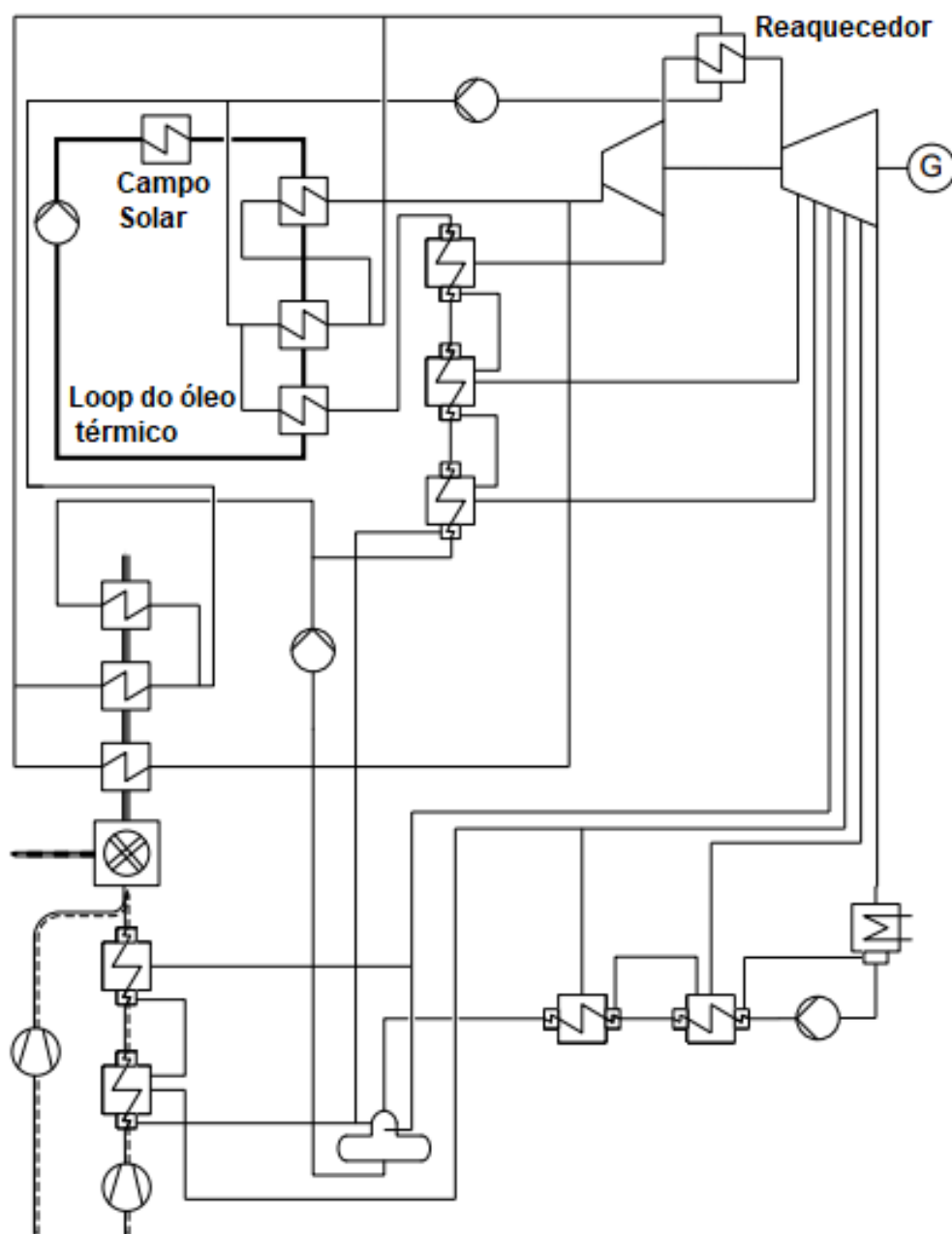


Figura 23 – A geração de energia por meio da combinação de energia fornecida por resíduos e o modelo SEGS VI adaptado (Traduzido).

Fonte:(SPLIETHOFF et al., 2010)

3 Resíduos Sólidos

Esse capítulo tem por objetivo apresentar a definição de resíduos sólidos e as quantidades dos mesmos produzidas no Brasil, além da quantidade de lixões em funcionamento no país. Ainda é apresentada a descrição do lixão Jockey Club, objeto de estudo desse trabalho, e sua localização, bem como a caracterização climática da região na qual o mesmo encontra-se inserido.

3.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Para propor algum tipo de utilização ou aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos para geração de energia ou para qualquer outro objetivo é preciso, antes de mais nada, entender e definir o que pode ser considerado resíduo. Segundo a norma ABNT (2004),

Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Resíduo ainda pode ser definido como objetos que foram em algum momento utilizado pelo homem, mas que perderam a utilidade para o fim que foram produzidos (VOIGT, 1999 apud OLIVEIRA, 2000). Um ponto importante a ser ressaltado quando se fala em resíduos sólidos urbanos é a geração dos mesmos. Segundo Lima (2004), a geração de resíduos está ligada a muitos fatores, tais como: culturais, hábito de consumo, poder aquisitivo, clima e nível de instrução educacional.

Observando a Tabela 1 é possível notar que a quantidade de resíduo gerada aumentou no intervalo de tempo que vai de 2012 até o ano 2015. É bem verdade que a quantidade de resíduos coletados também apresentou um aumento ao longo do mesmo período, porém realizando uma comparação entre os valores de resíduos gerados e coletados, nota-se que mesmo com esse aumento na quantidade de resíduos coletados ainda houve uma diferença de cerca de 7 milhões de toneladas por ano de RSU que deixaram de ser coletados. Em seu trabalho Cheremisinoff (2003) defende que a grande quantidade de resíduos se deve, principalmente, à fatores como: processos de produção ineficientes do ponto de vista industrial, a baixa durabilidade de bens de consumo e por fim as características consumistas da população em geral.

Tabela 1 – Quantidade de resíduos gerados e coletados no país nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.

	Geração do RSU [t/ano]	Coleta de RSU [t/ano]
2012	73.386.170,00	66.170.120,00
2013	76.387.200,00	69.064.935,00
2014	78.583.405,00	71.260.045,00
2015	79.889.010,00	72.543.750,00

Fonte: Abrelpe (2013), Abrelpe (2014), Abrelpe (2015) e Abrelpe (2016)

A problemática da quantidade de resíduos gerados faz com que uma questão seja levantada. Se a quantidade de resíduos gerados está aumentando, qual a melhor destinação final para essa quantidade de material? A Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010, em seu artigo 3º define que,

destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Como é possível notar na Tabela 2, segundo dados levantados na pesquisa nacional de saneamento básico (IBGE, 2010), 50,5% dos municípios brasileiros possuíam vazadouros (lixões) em 2008.

Tabela 2 – Destinação final dos RSM (domiciliares e/ou públicos) por número de municípios

Destino Final	Número de Municípios		Porcentagem de Municípios ¹	
	2000	2008	2000	2008
Aterro Sanitário	810	1.540	14,5	27,7
Aterro Controlado	1.074	1.254	19,3	22,5
Vazadouros a céu aberto (lixão)	3.763	2.810	54,61	50,5
Unidade de Compostagem	157	211	2,8	3,8
Unidade de triagem para reciclagem	248	643	4,5	11,6
Unidade de tratamento para incineração	176	134	3,2	0,6
Vazadouro em áreas alagáveis	33	14	0,6	0,3
Locais não fixos	109	-	2	-
Outra unidade	43	134	0,8	2,4
Total de Municípios	5.565	5.565	-	-

Fonte: IBGE (2010), IBGE (2002 apud IPEA, 2012)

¹ O total da soma das porcentagens é maior que 100%, porque para um mesmo município é possível a utilização de mais de uma forma de destino final para os resíduos.

Nota-se uma pequena redução na quantidade de lixões ao longo de 8 anos, o que é um sinal alarmante, tendo em vista os efeitos nocivos à natureza e à saúde humana que esse tipo de disposição de resíduos pode causar.

Tabela 3 – Quantidade de municípios por forma de disposição final dos resíduos

Disposição Final	Regiões e Brasil 2015					Brasil 2014	
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul		
Aterro Sanitário	97	456	165	820	706	2.244	2.236
Aterro Controlado	110	504	148	646	366	1.774	1.775
Lixão	243	834	154	202	119	1.552	1.559
BRASIL	450	1.794	467	1.668	1.191	5.570	5.570

Fonte: Abrelpe (2016)

3.1.1 Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos

Barbosa, Bernardes e Brito (2015) afirma que gestão de resíduos "é o conjugado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento que um órgão público ou privado desenvolve a fim de coletar, segregar, tratar e dispor o resíduo de maneira adequada, considerando aspectos socioeconômicos, técnicos e ambientais"

Uma das alternativas para minimizar a quantidade de resíduos despejados de forma irregular e prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente é a coleta seletiva. A Lei Federal nº 12.305/2010 define a coleta seletiva como "coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição ou composição."

A proposta da Política Nacional de Resíduos Sólidos é muito parecida às propostas que vêm sendo empregadas em diversos outros países que sugere a não produção de produtos que requerem um alto consumo de energia e muitas vezes a aplicação de novas tecnologias, sem contar a necessidade de cada vez mais matéria-prima (MORAES, 2016). Ainda segundo o autor, para gerenciar a quantidade de resíduos dispostos em aterros e lixões é necessário incentivar a produção de bens que durem por mais tempo, ou seja, bens que consigam ser utilizados sem a necessidade de serem logo descartados.

A coleta seletiva é uma das fases no processo de reciclagem e reaproveitamento de resíduos de acordo com a agenda 21. Isso se deve ao fato de que a coleta seletiva evita que os resíduos secos sejam misturados com os orgânicos o que dificulta o processo de separação e reciclagem (ALMEIDA, 2016).

3.2 Descrição do Lixão em Estudo

3.2.1 Localização e características do lixão

A área objeto desse estudo é localizada em Brasília, Distrito Federal, trata-se do Aterro do Jokey Clube de Brasília, considerado um dos maiores da América Latina e que não se enquadra nas normas de disposição final de resíduos sólidos. A área em que o aterro está localizado tem um formato de um trapézio, com uma área inicial de 174 ha que foi expandida posteriormente para 190 ha. Apesar de ser classificado como aterro controlado pelo governo do DF, o aterro do Jokey Clube de Brasília é uma área de disposição completamente inadequada de resíduos sólidos, já que não conta com impermeabilização necessária para evitar a contaminação do solo e do lençol freático, requisito necessário para ser chamado de aterro controlado (BARBOSA; BERNARDES; BRITO, 2015).

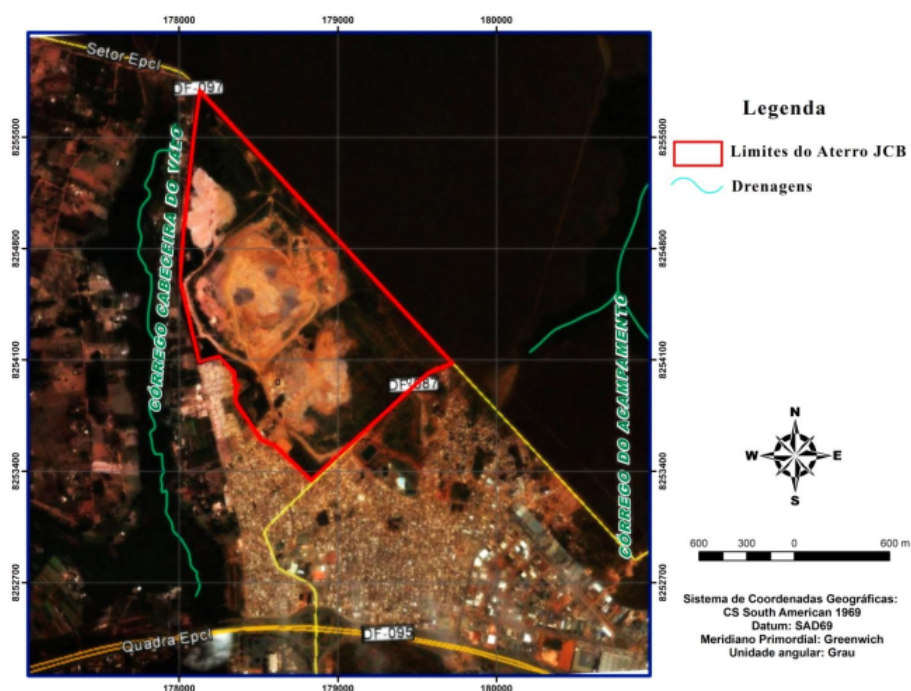


Figura 24 – Área ocupada pelo Aterro Jokey Clube de Brasília

Fonte:(CAVALCANTI et al., 2014)

A principal via de acesso ao aterro é a rodovia EPCL-DF-096/BR-070, mais conhecida como Via Estrutural, por esse motivo o aterro é também conhecido como o "Lixão da Estrutural". Segundo CAVALCANTI et al. (2014), uma parte da área, localizada na região sul, que antes fazia parte do aterro é habitada por famílias carentes. Nas proximidades do aterro, a oeste, ainda existe o córrego Cabeceira do Valo e também uma região de chácaras, onde há pequena produção hortifrutigranjeira. Já nas direções leste e norte está localizado o córrego do Acampamento e a área do Parque Nacional de Brasília, na Figura 24 é possível ver o posicionamento dos córregos citados.

Cavalcanti (2013) apresenta em seu trabalho um breve histórico do aterro. Nos anos de 1977 e 1978 o lixo era depositado a céu aberto em trincheiras e o método utilizado foi o de rampas. As trincheiras possuíam profundidades que variavam de 2 a 4 metros. O lixo depositado era compactado e coberto com uma camada de solo de aproximadamente 50 cm espessura. Hoje em dia essa área não faz mais parte da área do aterro, sendo já habitada (SANTOS, 1996 apud CAVALCANTI, 2013).

No período de 1978 a 1995 o lixo era depositado próximo ao vale do córrego Cabeceira do Valo, o que acabou sendo considerada a parte intermediária do aterro. Nessa área o lixo foi depositado em valas de 20 a 30 metros de largura, de 80 a 100 metros de comprimento e entre 2 e 3 metros de profundidade (SANTANA; IMAÑA-ENCINAS, 2004 apud CAVALCANTI, 2013). De 1995 a 1996 a porção norte do aterro foi inteiramente coberta pelos resíduos, dessa forma a espessura das camadas de lixo nessa região são superiores que a espessura das porções mais antigas do aterro (KOIDE; BERNARDES, 1998).

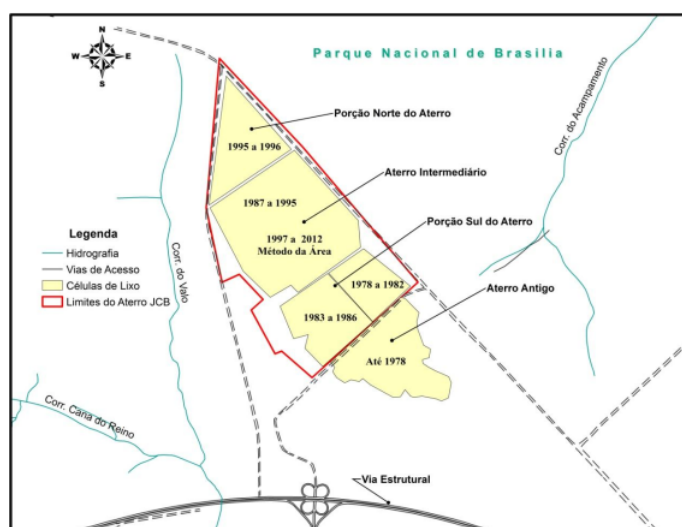


Figura 25 – Área utilizada pelo aterro ao longo dos anos

Fonte:(CAVALCANTI et al., 2014)

3.2.2 Clima na região do DF

O clima é um fator importante no presente estudo, tendo em vista que influencia diretamente no processo de decomposição dos resíduos. Além disso, por meio das características climáticas pode-se escolher alguns parâmetros para a estimativa do metano gerado no aterro.

Cardoso, Marcuzzo e Barros (2015) em seu estudo indica que o Distrito Federal pode ter seu clima classificado como Aw, seguindo a classificação de Köppen-Geiger. Segundo Carneiro (2002) o clima no estado do Distrito Federal pode ser classificado como

um clima tropical com estiagem no inverno e concentração de chuvas no verão. Carneiro concluiu isso também por meio da classificação de Köppen-Geiger. Ainda por meio de seu estudo foi possível notar que não há muitas variações no tocante à distribuição de chuvas no DF. Porém notou-se que as diferenças de altitudes causam variações significativas de temperatura, o que levou a observação de três tipos de climas no Distrito Federal, Tabela 4.

Tabela 4 – Climas existentes no Distrito Federal

Tipo	Denominação	T _{minima} - mês frio	T _{média} - mês quente	Cota altimétrica
Aw	Tropical	>18 °C	–	<1000m
Cwa	Trop. de altitude	<18 °C	>22 °C	1000 - 1200 m
Cwb	Trop. de altitude	<18 °C	<22 °C	>1200 m

Fonte: Carneiro (2002)

Por meio dessa classificação climática e do posicionamento do Aterro do Jockey Club Carneiro (2002) diz que o aterro está posicionado em uma região onde o clima dominante é o Cwa. Já a precipitação média anual no Distrito Federal é cerca de 1500 mm (MUNHOZ; FELFILI, 2005) e esse valor é típico de um clima úmido.

4 Métodos para estimar a quantidade de gás metano gerada em Aterros Sanitários

Esse capítulo tem por objetivo apresentar os métodos aplicados para a estimativa da quantidade de metano confinado no aterro.

4.1 Método IPCC

A disposição final de resíduos sólidos é um assunto que necessita ser bastante discutido no Brasil. Essa importância se deve ao fato de que a disposição de forma inadequada desses resíduos pode causar sérios problemas ambientais. Segundo Souza (2009), a disposição final inadequada de resíduos pode causar contaminação de solo, lençóis freáticos além de poluição gasosa. A autora ainda cita o fato de que esse tipo de disposição é, muitas vezes, causadora de doenças para o ser humano e morte de algumas espécies de animais. Não só o ponto de vista ambiental é importante. Cabe aqui também uma observação com o potencial de geração de energia presente nos resíduos, que é influenciado pela forma com a qual são dispostos. Oliveira et al. (2017), diz que geração de e biogás a partir dos RSU é um assunto que precisa ser discutido. Em seu trabalho Oliveira et al. (2017) ainda defende que se os resíduos forem gerenciados de forma adequada, podem ser utilizados para a geração de energia já que o biogás pode ser captado e utilizado para tal fim. Para implementar uma planta de aproveitamento de energia oriunda de biogás de aterro, faz-se necessário estimar qual o potencial de geração do mesmo.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas sempre atuou com medidas e trabalhos que visam contribuir para melhorar as ações no tocante aos resíduos sólidos gerados e as consequências causadas por sua disposição. Publicou em 1995 seu primeiro manual e já no ano seguinte uma versão revisada do mesmo manual. Esse manual passou por nova revisão e conseqüentemente uma nova versão no ano de 2006. A metodologia para realizar a estimativa de geração de metano proposta pelo IPCC se baseia no método *First Order Decay* (FOD) ou no português Método de Decaimento de Primeira Ordem (DPO). Tal método admite que o carbono orgânico degradável, se decompõe lentamente ao longo de alguns anos e que nesse período os gases metano e dióxido de carbono são gerados. O IPCC indica três níveis para a estimativa da geração de metano e são eles:

- **Nível 1:** estimativas realizadas com métodos de nível 1 estão baseadas no método DPO e utiliza principalmente dados de atividade e parâmetros padrões.

- **Nível 2:** nesse nível são utilizados alguns parâmetros padrão e dados específicos de descarte dos resíduos sólidos. Os dados devem ser de boa qualidade e são necessários ao menos 10 anos de dados para aplicação do método. Também é utilizado o método DPO do IPCC nesse caso.
- **Nível 3:** no presente nível faz-se necessário o uso de dados específicos de atividade (necessariamente de boa qualidade) e a utilização do método DPO do IPCC além de um parâmetro chave desenvolvido nacionalmente ou a medição de dados específicos do país. Nesse caso é possível a utilização de um modelo próprio de cada país que deve ser de qualidade igual ou superior ao método DPO do IPCC.

Em seu trabalho, Paustian, Ravindranath e Amstel (2006), apresenta uma árvore de decisão para auxiliar a escolha de qual dos métodos utilizar em uma estimativa da geração de metano em locais de disposição final de resíduos sólidos. Essa árvore de decisão está apresentada na Figura 26.

Uma fonte chave de emissão de CH_4 é aquela que contribui de forma significativa para um inventário nacional. Esse tipo de inventário leva em conta as principais fontes de emissão de gás, por exemplo, a emissão devida a queima de combustíveis fósseis que é uma fonte de contribuição importante a ser considerada.

Não faz parte do escopo desse trabalho decidir se as emissões de gases por aterro ou lixões são uma categoria chave de emissão. As agências nacionais quando vão desenvolver estudos para estimativa das emissões dessas fontes, devem decidir se elas são ou não primordiais no balanço de emissões do país em questão. No Brasil existem inventários realizados pelo governo para analisar as principais fontes de emissões de gases de efeito estufa.

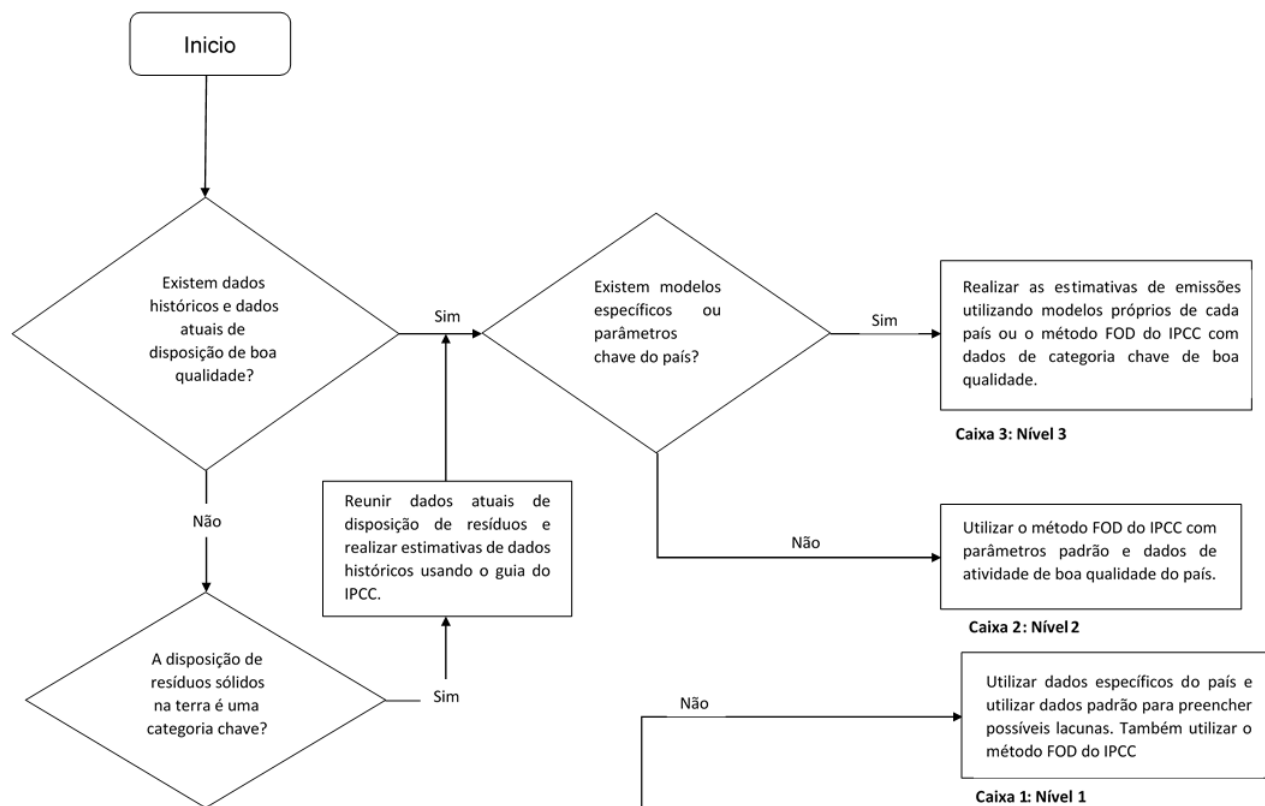


Figura 26 – Árvore de decisão para emissão de Metano produzido em terrenos de disposição de resíduos sólidos (Proposta pelo IPCC em 2006).

Fonte: Modificado de Paustian, Ravindranath e Amstel (2006)

Para o presente estudo optou-se por utilizar a metodologia proposta pelo IPCC no ano de 2000. O motivo da escolha foi devido ao fato de a metodologia proposta em 2006 necessitar de dados específicos sobre a composição do lixo e o percentual de cada tipo de resíduo depositado. Já a metodologia proposta ainda no ano de 2000 pode ser aplicada para o montante de resíduos sem a necessidade de haver a descrição do tipo de resíduo disposto.

A Equação 4.1 é apresentada no relatório do IPCC (Penman et al. (2000)) para o método de decaimento de primeira ordem. Porém ainda existe um segundo método chamado de método padrão. O modelo utilizado nessa pesquisa foi o modelo de decaimento de primeira ordem, levando-se em conta a árvore de escolha que indicou que no caso do Aterro do Jockey Club esse modelo seria o mais adequado, tendo em vista a existência de dados relativamente consistentes e disponibilidade de informações razoáveis para tanto.

$$CH_4 \text{ gerado no ano } t \left(\frac{Gg}{ano} \right) = \Sigma_x [(a.k(MSW_T.MSW_F.L_0(i))e^{-k(t-i)})] \quad (4.1)$$

Onde,

a , é o fator de correção da soma $[(1 - e^{-k})/k]$;

k , taxa de geração de metano $[1/ano]$;

MSW_T , total de resíduos sólidos municipais gerados no ano i $[Gg/ano]$;

MSW_F , fração de resíduos sólidos municipais dispostos no ano i ;

$L_0(i)$, potencial de geração de metano $[GgCH_4/Ggresíduo]$;

t , ano do inventário;

i , anos para os quais dados estão disponíveis.

Onde o potencial de geração de metano pode ser calculado conforme a Equação 4.2

$$L_0(i) = [FCM(i).COD(i).COD_F.FCH_4.16/12] \quad (4.2)$$

Onde,

$FCM(i)$, fator de correção de metano no ano i ;

$COD(i)$, carbono orgânico degradável $[GgC/Ggresíduo]$;

$COD_F(i)$, fração de COD dissimilado;

FCH_4 , fração em volume de CH_4 em gás de aterro;

16/12, fator para conversão de C para CH_4 .

E o manual ainda indica a Equação 4.3 para a estimativa do metano emitido por ano do inventário.

$$CH_4 \text{ emitido no ano } t \left(\frac{Gg}{ano} \right) = [CH_4 \text{ gerado no ano } t - P(i)].(1 - OX) \quad (4.3)$$

Onde,

$P(i)$, CH_4 recuperado no ano do inventário i [Gg/ano];

OX , fator de oxidação.

Na próxima seção há uma breve descrição de cada um deles, retirada do referido manual. Assim como existe uma árvore de decisão para o método proposto em 2006 e IPCC também elaborou em seu novo manual uma árvore de decisão para facilitar a escolha do método a ser utilizado.

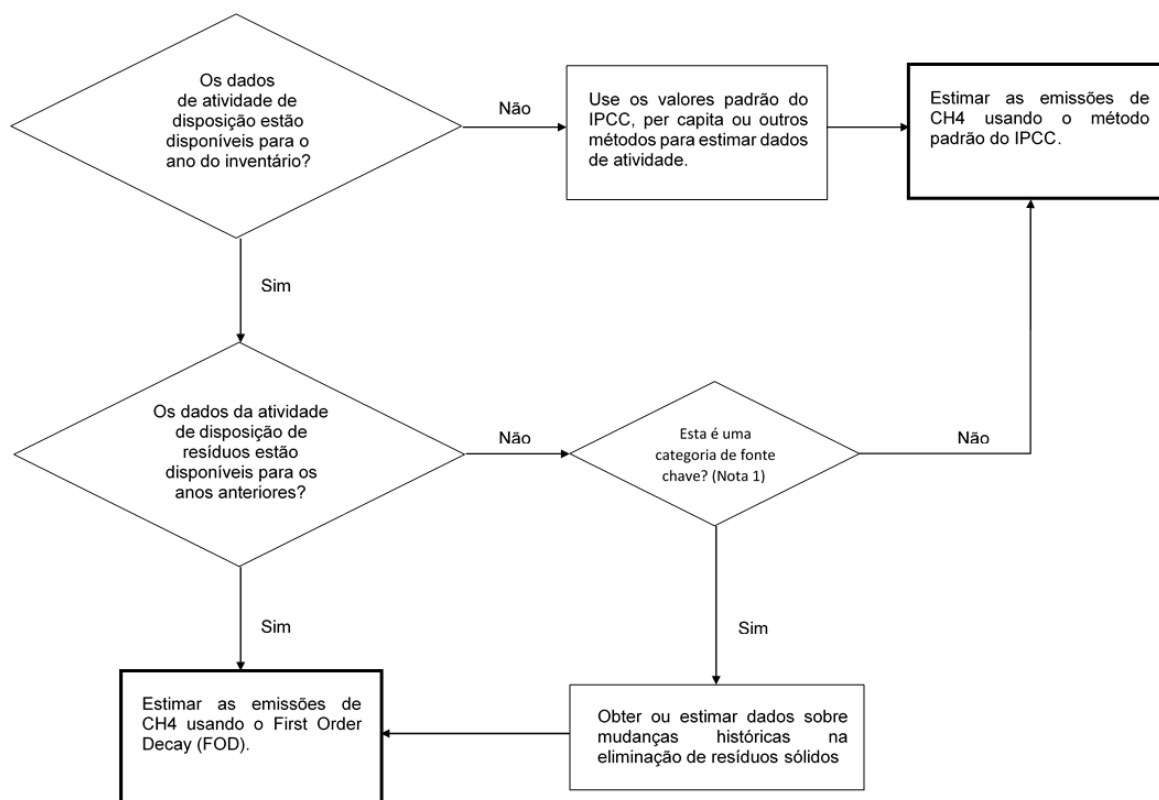


Figura 27 – Árvore de decisão para emissão de Metano produzido em terrenos de disposição de resíduos sólidos (Proposta pelo IPCC em 2000).

Fonte: Modificado de Penman et al. (2000)

¹ Uma categoria de fonte chave é aquela que é priorizada no sistema de inventário nacional porque sua estimativa tem uma influência significativa no inventário total de gases dentro efeito de estufa direto do país em termos do nível absoluto de emissões, da tendência das emissões ou de ambos.

4.1.1 Taxa de geração de metano k [$\frac{1}{ano}$]

A taxa de geração de metano k utilizada no método FOD *First Order Decay* está ligado ao tempo total gasto para que o Carbono Orgânico Degradável (COD) nos resíduos caia para metade de sua massa inicial.

Tabela 5 – Valores da taxa de geração de metano e a indicação de acordo com o tipo de decaimento.

k	Indicação
0,2	Decaimento Rápido
0,03	Decaimento Lento
0,05	Padrão

Fonte: Penman et al. (2000)

Valores da constante k devem ser escolhidos levando em conta o tipo de resíduo disposto no aterro (ou lixão). Valores de k igual a 0.2, são indicados para resíduos que se degradam rapidamente (cerca de 3 anos), já valores de k de 0.03 são para lixo seco que demoram mais tempo para se decompor (cerca de 23 anos). Se não há dados disponíveis sobre a composição do lixo um valor padrão de 0.05 pode ser usado.

Esse coeficiente depende das condições ambientais, tais como temperatura média anual, precipitação média anual e evapotranspiração potencial. O Paustian, Ravindranath e Amstel (2006) apresenta em um de seus trabalhos a Tabela 6, com a qual é possível tomar a decisão sobre o valor da taxa de geração de metano. Esses valores são oriundos de resultados experimentais, calculados em inventários e também estudos específicos.

Tabela 6 – Taxa de geração de Metano recomendada de acordo com o tipo de resíduo e o clima.

Tipo de resíduo		Zona Climática							
		Boreal e Temperado (TAM <20 °C)				Tropical (TAM ⁴ >20 °C)			
		Seco (PAM ⁵ /ETP <1)		Úmido (PAM/ETP ⁶ >1)		Seco (PAM <1000 mm)		Úmido (PAM ≥ 1000 mm)	
		Padrão	Variação	Padrão	Variação	Padrão	Variação	Padrão	Variação
RLD ¹	Resíduos de papel	0,04	0,03 - 0,05	0,06	0,05 - 0,07	0,045	0,04 - 0,06	0,07	0,06 - 0,085
	Resíduos de madeira	0,02	0,01 - 0,03	0,03	0,02 - 0,04	0,025	0,02 - 0,04	0,035	0,03 - 0,05
RMD ²	Outros	0,05	0,04 - 0,06	0,1	0,06 - 0,1	0,065	0,05 - 0,08	0,17	0,15 - 0,2
RRD ³	Resíduos alimentares	0,06	0,05 - 0,08	0,185	0,1 - 0,2	0,085	0,07 - 0,1	0,4	0,17 - 0,7
Resíduos a granel		0,05	0,04 - 0,06	0,09	0,08 - 0,1	0,065	0,05 - 0,08	0,17	0,15 - 0,2

¹ Resíduo lentamente degradante.

² Resíduo moderadamente degradante.

³ Resíduo rapidamente degradante.

⁴ Temperatura anual média.

⁵ Precipitação anual média.

⁶ Evapotranspiração potencial.

4.1.2 Potencial de geração de metano $Lo \left[\frac{GgCH_4}{Ggresíduo} \right]$

O potencial de geração de metano indica a produção total de metano por tonelada de resíduos. O seu cálculo leva em conta outros fatores que também são importantes para a estimativa global de geração de metano em um terreno de disposição de resíduos sólidos, tais como: fator de correção de metano (FCM), Carbono orgânico degradável (COD), Fração de carbono orgânico degradável dissimilado (COD_f), fração de CH_4 em gás de aterro (FCH_4) e um fator de correção de carbono a metano (16/12).

4.1.3 Fator de correção de Metano [FCM]

Esse fator é utilizado para se levar em conta o tipo de disposição final que se dá aos resíduos e o gerenciamento dos locais onde ocorre tal manejo. Por meio dele é possível explicar o fato de se gerar menos metano em terrenos de disposição final não gerenciados do que nos gerenciados. Isso se dá pelo fato de haver uma fração maior de resíduos se decompondo aeróbicamente em camadas superiores dos terrenos não gerenciados.

Tabela 7 – Fator de correção de Metano de acordo com a disposição final dos resíduos.

Tipo de Terreno	Fator de Correção de Metano (FCM) Valores Padrão
Gerenciado - anaeróbico ¹	1
Gerenciado – semi-aeróbico ²	0,5
Não gerenciado – Profundo ($\geq 5m$ resíduo) ³	0,8
Não gerenciado - pouco profundo ($<5m$ resíduo) ⁴	0,4
LERS não classificado ⁵	0,6

Em seus documentos menos recentes o IPCC desencorajava a utilização do valor 0.6 para países em desenvolvimento e sugeria a utilização do valor 0.4 nesses casos. Porém na versão mais atual realizada em 2006, passou a sugerir a utilização do fator 0.6 nos casos em que o país tem dificuldade de classificar seus locais de eliminação de resíduos sólidos.

¹ Os LERS gerenciados precisam possuir uma distribuição controlada dos resíduos, ou seja, os resíduos são depositados em áreas específicas para tal fim. Essas áreas incluirão determinado material de cobertura, um grau de compactação mecânica ou ainda nivelamento do lixo.

² Os LERS gerenciados semi-aeróbicos necessitam de uma colocação controlada de resíduos e também material de cobertura permeável, possuir um sistema para drenagem do lixiviado, regular a coleta e um sistema de ventilação de geses.

³ Os LERS não gerenciados e/ou com lençóis freáticos são aqueles que não se enquadram nos critérios dos LERS gerenciados e possuem mais que 5 metros de profundidade e lençóis freáticos ao nível do solo.

⁴ Os locais de descarte de resíduos rasos e não gerenciados são todos que não atendem aos LERS não gerenciados e possuem profundidades menores que 5 metros.

⁵ Os LERS não categorizados, só devem usar essa categoria aqueles países que não podem classificar seus LERS nas quatro outras categorias.

4.1.4 Carbono Orgânico Degradável COD [Gg C/ Gg RSU]

O carbono orgânico degradável é baseado na composição gravimétrica dos resíduos e é calculado a partir da média ponderada da quantidade de carbono dos componentes. A Equação 4.4 apresentada pelo Penman et al. (2000) é utilizada para o cálculo do carbono orgânico degradável:

$$COD = (0,40A) + (0,17B) + (0,15C) + (0,30D) \quad (4.4)$$

Porém essa equação foi substituída no Paustian, Ravindranath e Amstel (2006), incluindo fatores para outro tipo de resíduo no cálculo. Esses coeficientes estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Fatores para cálculo do Carbono Orgânico Degradável [COD].

Tipo de Resíduo	Valor	[%]
Papéis	0,40	[% de DOC em massa úmida]
Têxteis	0,24	[% de DOC em massa úmida]
Resíduos Alimentares	0,15	[% de DOC em massa úmida]
Madeira	0,43	[% de DOC em massa úmida]
Resíduos de Jardins e parques	0,20	[% de DOC em massa úmida]
Fraldas	0,24	[% de DOC em massa úmida]
Borracha e couro	0,39	[% de DOC em massa úmida]

Com esses coeficientes é possível escrever a Equação 4.5 também apresentada pelo Paustian, Ravindranath e Amstel (2006).

$$COD = (0,40A) + (0,24B) + (0,15C) + (0,43D) + (0,20E) + (0,24F) + (0,39G) \quad (4.5)$$

4.1.5 Fração de carbono orgânico degradável dissimilado COD_f

Essa fração representa a parcela de carbono que é realmente degradada e liberada do LERS e ainda o fato de que uma parte do carbono orgânico não é degradado ou é degradado lentamente, quando é depositado em um LERS. O IPCC sugere um valor padrão de 0,77, porém tem sido questionado seu uso, pois se acredita ocorrer uma superestimação com sua utilização. A recomendação é que só seja utilizado caso a parcela de resíduos de comida seja retirada do valor do COD. Caso essa parcela seja utilizada o IPCC recomenda valores entre 0,5 e 0,6.

4.1.6 Fração de CH_4 em gás de aterro (FCH_4)

Essa fração indica a quantidade de gás metano que está presente no gás de aterro. Gás de aterro é composto basicamente de metano e gás carbônico. Segundo o IPCC o valor utilizado é de 0,5, mas esse valor varia com a composição, podendo estar contido entre 0,4 e 0,6.

4.2 Método LandGEM

O método LandGEM foi desenvolvido pela USEPA para estimar as emissões de gases provenientes de aterros sanitários. É possível por meio desta ferramenta avaliar as taxas de geração de biogás, metano e dióxido de carbono (ALEXANDER; BURKLIN; SINGLETON, 2005).

O método LandGEM usa a Equação 4.6, que é uma equação de taxa de decomposição de primeira ordem. Esta equação é aplicada para estimar uma quantidade de gás emitida para cada ano de inventário.

$$Q_{CH_4} = \sum_i^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \frac{M_i}{10} e^{-kt_{ij}} \quad (4.6)$$

O programa oferece dados que são necessários para a estimativa dos gases. Isso se deve ao fato de que muitas vezes os dados específicos do local e do aterro não são disponíveis, logo o USEPA oferece dados como o potencial de geração de metano e a taxa de geração de metano.

5 Modelagem Termodinâmica

Nesse capítulo estão apresentadas as equações utilizadas para a simulação da planta híbrida de ciclo combinado Brayton-Rankine. O processo de conversão de energia térmica em elétrica foi modelada no software Engineering Equation Solver, por ser muito conveniente para cálculos termodinâmicos. A simulação do campo solar foi implementada por meio de programação no MATLAB.

5.1 Modelagem do Ciclo Combinado

Para a simulação proposta foram utilizadas equações que descrevem termodinamicamente o componente do ciclo. Tais equações foram reunidas e para a simulação foram implementadas com a ajuda do *software* EES.

O esquema do SICCS proposto no presente trabalho está apresentado na Figura 28. A planta é composta por um ciclo Brayton no qual se propõe queimar o gás metano que estava confinado no aterro. Também existe o ciclo Rankine e por fim o campo solar composto por coletores do tipo Linear Fresnel.

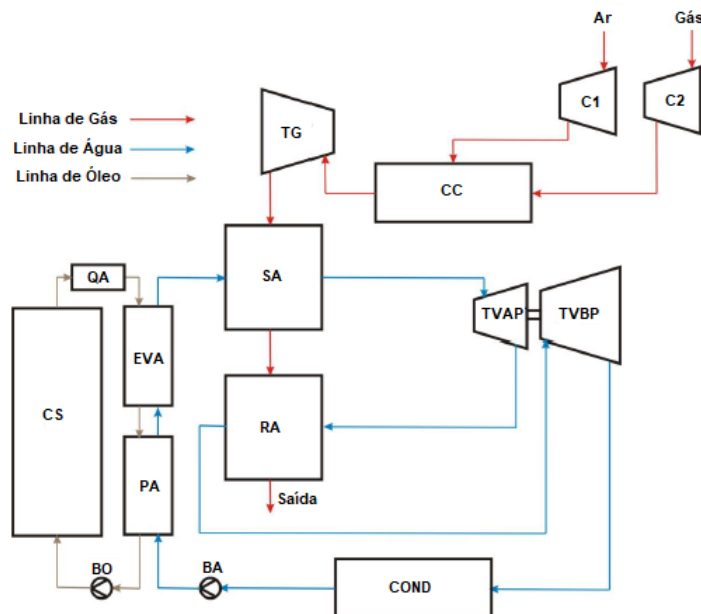


Figura 28 – Esquema do Sistema Integrado de Ciclo Combinado Solar simulado. C1- Compressor de Ar; C2- Compressor de gás; CC- Câmara de combustão; TG- Turbina a Gás; SP- Superaquecedor; RH- Reaquecedor; TVAP- Turbina a Vapor de Alta Pressão; TVBP- Turbina a Vapor de Baixa Pressão; COND- Condensador; PA- Pré-aquecedor; EVA- Evaporador; QA- Queimador Auxiliar; CS- Campo Solar Linear Fresnel.

5.1.1 Ciclo Brayton

A planta proposta nessa simulação é provida de um ciclo Brayton, sendo assim faz-se necessário a modelagem das eficiências e cálculos de potência consumida e gerada por essa parte da planta de geração de energia. Na Figura 29 está apresentado o esquema do ciclo Brayton e seus componentes.

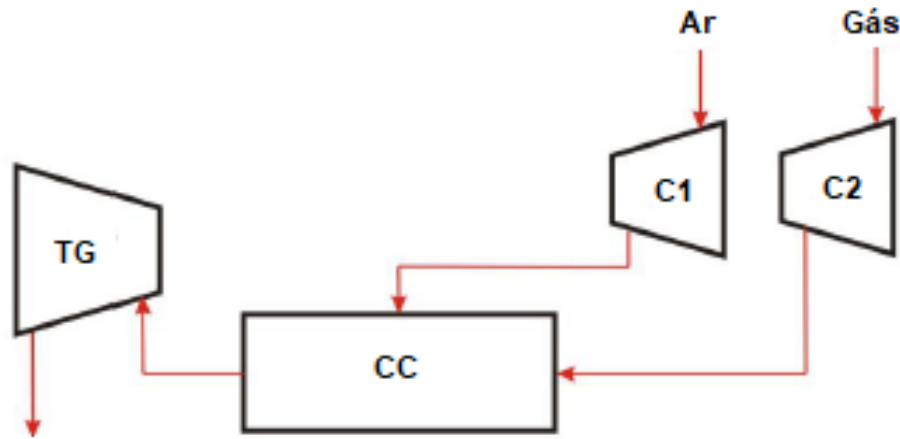


Figura 29 – Esquema do ciclo Brayton.

O primeiro componente do ciclo é o compressor de ar. A modelagem do compressor é realizada por meio da equação de eficiência isentrópica Equação 5.1.

$$\eta_{C1,ar} = \frac{h_{Ar,s,iso} - h_{Ar,e}}{h_{Ar,s} - h_{Ar,e}} \quad (5.1)$$

A modelagem do compressor do combustível é realizada de forma semelhante por meio da Equação 4.5.

$$\eta_{C2,comb} = \frac{h_{CH4s,iso} - h_{CH4,e}}{h_{CH4,s} - h_{CH4,e}} \quad (5.2)$$

Além da eficiência isentrópica a potência consumida pelo compressor de ar e o do gás metano são quantidades que precisam ser calculadas para conhecer o desempenho do ciclo Brayton, Equação 5.3 e Equação 5.4.

$$\dot{W}_{C1,ar} = \dot{m}_{ar} \cdot (h_{Ar,s} - h_{Ar,e}) \quad (5.3)$$

$$\dot{W}_{C2,comb} = \dot{m}_{comb} \cdot (h_{CH4,s} - h_{CH4,e}) \quad (5.4)$$

A câmara de combustão é modelada levando em conta a quantidade de ar e combustível necessária para queima eficiente do combustível. O último componente do

ciclo a ser modelado é a turbina a gás. A turbina foi modelada utilizando a eficiência isentrópica (Equação 5.5) e também o cálculo da potência gerada (Equação 5.6).

$$\eta_{TG} = \frac{h_{gases,e} - h_{gases,s}}{h_{gases,e} - h_{gases,iso}} \quad (5.5)$$

$$\dot{W}_{TG} = \dot{m}_{gases} \cdot (h_{gases,e} - h_{gases,s}) \quad (5.6)$$

Os gases ao saírem da turbina vão para um trocador de calor, chamado de superaquecedor, no qual sofrem perda de calor para a água no ciclo Rankine. Para o dimensionamento de tal trocador de calor foi utilizado Método da Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura. Essa metodologia foi utilizada para dimensionar outros trocadores de calor da planta.

5.1.2 Ciclo Rankine

A segunda parte da planta em estudo é o Ciclo Rankine. O ciclo Rankine proposto no presente trabalho é constituído por uma turbina de dois estágios de pressão além do superaquecedor e do reaquecedor. Na Figura 30 é representado o ciclo Rankine onde apresenta o superaquecedor e o reaquecedor.

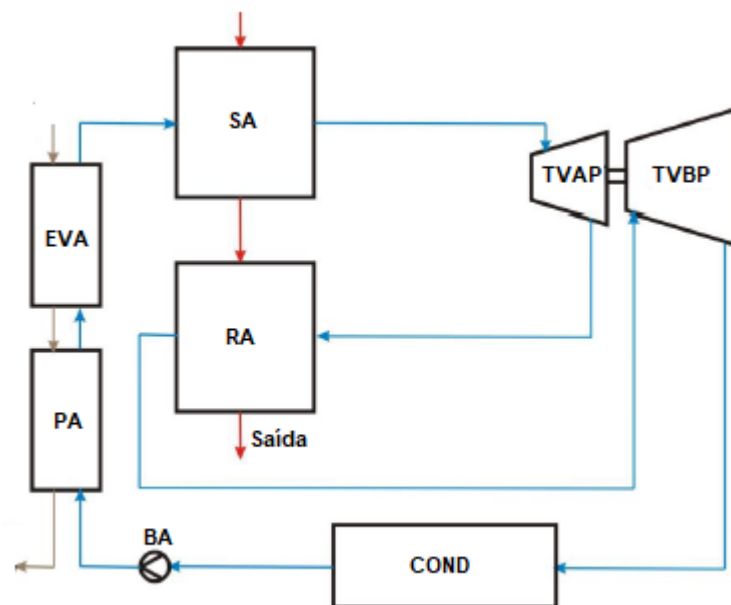


Figura 30 – Esquema do ciclo Rankine.

A turbina a vapor foi modelada como uma turbina de dois estágios, um de alta pressão e um segundo de baixa pressão que recebe o vapor após o mesmo passar pelo

reaquecedor.

$$\dot{W}_{TV,AP} = \dot{m}_{vapor} \cdot (h_{TA,e} - h_{TA,s}) \quad (5.7)$$

$$\dot{W}_{TV,BP} = \dot{m}_{vapor} \cdot (h_{TB,e} - h_{TB,s}) \quad (5.8)$$

$$\eta_{TV,AP} = \frac{h_{TA,e} - h_{TA,s}}{h_{TA,e} - h_{TAs,iso}} \quad (5.9)$$

$$\eta_{TV,BP} = \frac{h_{TB,e} - h_{TB,s}}{h_{TB,e} - h_{TBs,iso}} \quad (5.10)$$

5.2 Campo Solar

5.2.1 Configuração

O campo solar é uma parte muito importante no esquema da planta de geração proposta. O campo modelado nesse trabalho utiliza a tecnologia Linear Fresnel. Na Figura 31 é possível notar que o fluido de trabalho troca calor com o vapor de água que circula o ciclo Rankine por meio de um pré-aquecedor e de um evaporador.

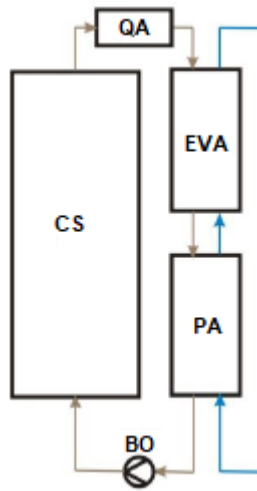


Figura 31 – Esquema do Campo Solar Linear Fresnel.

O coletor utilizado é o da *Industrial Solar* chamado LF-11. Os dados técnicos do coletor solar LF-11 fornecidos pela fabricante do produto estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados técnicos do coletor LF-11.

Dados	Valores	Unidades
Largura do Módulo	7,5	m
Comprimento do Módulo	4,06	m
Superfície de abertura dos refletores primários	22	m^2
Altura do receptor acima do refletor primário	4,0	m
Altura do refletor primário acima do nível do solo	0,5	m
Distância mínima recomendada entre linhas paralelas	0-0,5	m
Peso específico (relacionado à área de superfície de instalação)	27	Kg/m^2
Velocidade operacional máxima do vento	100	Km/h
Velocidade máxima do vento armazenada	180	Km/h
Expectativa de vida	20	anos
Máxima eficiência óptica	0,663	-

Uma das características mais importantes do coletor é a eficiência ótica e para a modelagem do coletor solar é utilizada a Equação 5.11 função dos ângulos de incidência transversais e longitudinais. São definidos modificadores longitudinais e transversais, MAI_l e MAI_t , respectivamente, que modulam a eficiência ótica máxima de acordo com esses ângulos. Sendo assim, a eficiência ótica é calculada pela Equação 5.11.

$$\eta_o = \eta_{o,máx} \cdot MAI_l \cdot MAI_t \quad (5.11)$$

O fabricante indica o comportamento experimental de MAI_l e MAI_t . Um ajuste curva polinomial, Equação 5.12 e Equação 5.13 foi usado para simular o comportamento dos modificadores em função dos respectivos ângulos de incidência.

$$\begin{aligned} MAI_t = & 2,14450(10^{-9})\theta_t^5 - 4,3262(10^{-7})\theta_t^4 + 2,77324(10^{-5})\theta_t^3 \\ & - 7,48981(10^{-4})\theta_t^2 + 7,17058(10^{-3})\theta_t + 1,00503 \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} MAI_l = & 4,78357(10^{-12})\theta_l^6 - 1,15148(10^{-9})\theta_l^5 + 1,46206(10^{-7})\theta_l^4 \\ & - 9,68414(10^{-6})\theta_l^3 + 1,68459(10^{-4})\theta_l^2 - 7,09223(10^{-3})\theta_l + \\ & 0,998438 \end{aligned} \quad (5.13)$$

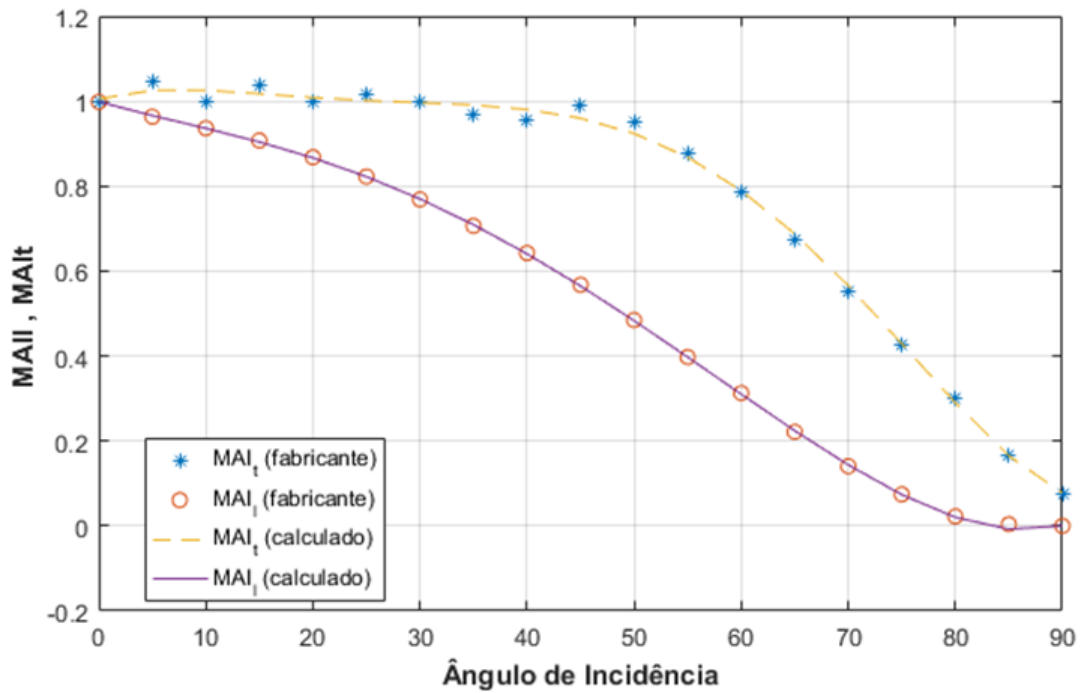


Figura 32 – Ângulos modificadores longitudinal e transversal.

Para a obtenção dos ângulos modificadores são necessários os ângulos de incidência longitudinal e transversal. O primeiro é o ângulo de incidência longitudinal que é calculado conforme a Equação 5.14. O outro é o ângulo de incidência transversal calculado de acordo com a Equação 5.15. Ambos são calculados em função do ângulo de elevação (α_{solar}) e do ângulo de azimute (γ_{solar}). Essas equações são utilizadas para coletores orientados de forma Leste-Oeste. Essa configuração proporciona maiores picos de potência (GUNTHER et al., 2017).

$$\theta_l = \arccos(\sqrt{1 - \cos^2(\alpha_{solar}) \cdot \cos^2(\gamma_{solar})}) \quad (5.14)$$

$$\theta_t = \arctan\left(\frac{|\sin(\gamma_{solar})|}{\tan(\alpha_{solar})}\right) \quad (5.15)$$

O campo solar Linear Fresnel é modelado por meio de *loops* cada um contendo 16 módulos, conforme recomendação do fabricante. A configuração foi elaborada para manter o fluido térmico em um patamar de temperatura, sem permitir que ela extrapole o valor permitido ao fluido sem que ele degrade. Sendo assim, à medida que existe abundância de recurso solar e a temperatura do fluido de trabalho começa a atingir o patamar máximo admitido ocorre a desfocagem sequencial dos módulos para evitar que o fluido se deteriore.

A configuração do campo solar foi concebida com o auxílio do *System Advisory Model* (SAM) (NREL, 2005), software de simulação de plantas heliotérmicas desenvolvido

pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) dos Estados do Unidos. O SAM foi concebido para avaliações de viabilidade técnico-econômica de plantas heliotérmicas. Ele é uma ferramenta poderosa para simulação preliminar do sistema, pois trás em suas bibliotecas propriedades de vários componentes e ainda gera um ano meteorológico típico para cada localidade a partir de dados disponibilizados por diversas fontes. Além disso, ele sugere configurações típicas de campos solares para as diversas tecnologias, inclusive a Fresnel Linear. No entanto, ele não possui capacidade de simulação termodinâmica da planta proposta. Sendo assim, o SAM foi utilizado em simulações preliminares para a construção da configuração do campo solar proposta, apresentada na Figura 33, que conta com 8 *loops*.

Cada unidade dessa apresentada na figura anterior possui um conjunto de 16 coletores, sendo assim em cada *loop* da planta existem 256 desses coletores. Além dos espelhos primários modelados, também é implementado no código desenvolvido nesse trabalho uma modelagem para o refletor secundário.

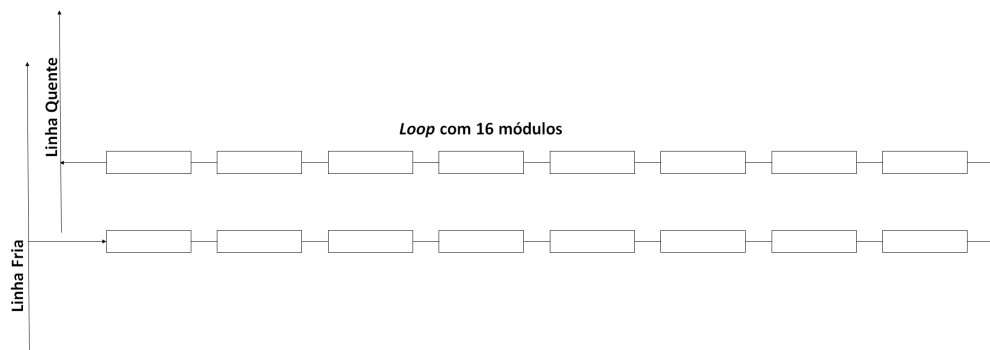


Figura 33 – Esquema de Loop proposto para a modelagem do campo solar.

O campo solar proposto para esse trabalho, para o caso de não se considerar as perdas de metano, possui 22 *loops* de coletores. Já para o caso em que foram consideradas as perdas do gás metano, o campo solar possui 16 *loops* de coletores.

Por meio da quantidade de *loops* e com o auxílio de uma simulação realizada no SAM foi possível encontrar a área necessária para a instalação do campo solar para geração de energia. A área que seria utilizada para o primeiro caso (16 *loops*) é de 84.480 m^2 , sendo que a largura do campo solar é de 75 m e o comprimento de 1126,4 m. O campo solar está apresentada na Figura 34.

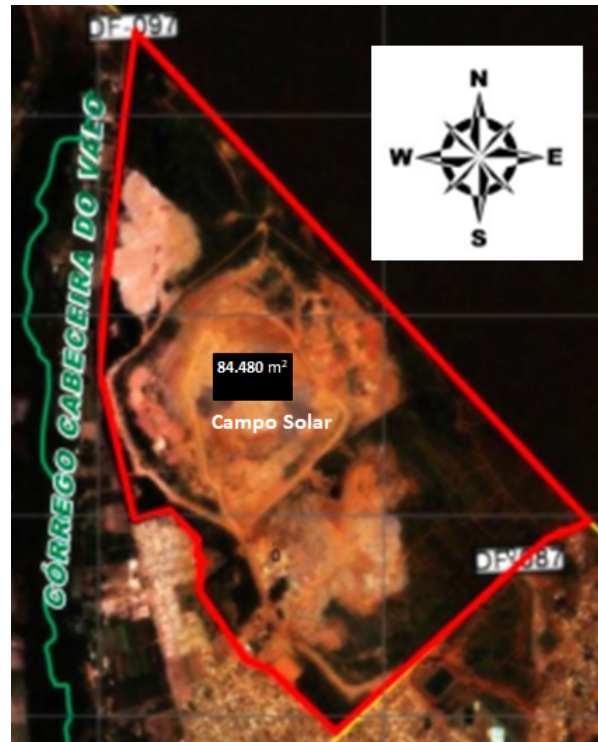


Figura 34 – Dimensão do campo solar para 16 *loops*.

5.2.2 Modelagem Térmica

O SAM não permite a simulação da configuração híbrida proposta. Sendo assim, para as estimativas de calor absorvido pelo campo solar, um modelo térmico dinâmico do campo solar foi desenvolvido. O modelo estima a entrada de energia no sistema pela irradiação solar direta e pela eficiência ótica do coletor solar. O modelo considera quatro componentes relevantes para as trocas de calor que resultarão em um ganho de energia para o fluido de transferência de calor (FTC), a saber, o próprio FTC, o tubo absorvedor, o envelope de vidro e refletor secundário. O modelo é discretizado na direção longitudinal por volumes de controle de cada componente em cada posição longitudinal considerada. Para possibilitar o cálculo do calor absorvido em cada loop do campo solar para o ciclo anual, o modelo considera as seguintes aproximações/simplificações:

- A radiação térmica emitida pelos espelhos do concentrador é estimada considerando que os mesmos estão à temperatura do ar atmosférico. Assim ele não participa como componente ativo do modelo térmico;
- A condução de calor longitudinal entre volumes de controle adjacentes no vidro, no tubo absorvedor e no coletor secundário é desprezível em comparação com as trocas transversais entre esses componentes;

- A troca de radiação térmica entre os componentes se dá somente na direção transversal;
- A advecção no FTC é considerada somente na direção longitudinal;
- A condução de calor no FTC é desprezível em relação às trocas de calor por convecção entre o tubo absorvedor e o FTC;
- As trocas de calor entre o tubo absorvedor e o FTC são estimadas por teoria de camada limite térmica.
- A distribuição de temperatura de cada volume de controle de cada componente é considerada uniforme, à exceção do coletor secundário;
- A geometria do concentrador secundário é assumida como um semi-círculo.

O modelo considera a discretização longitudinal como volumes de controle de cada componente considerando as diversas trocas de calor entre eles para calcular. O balanço de energia de cada componente permite a construção de um sistema de equações algébricas não-lineares (devido as trocas de calor por radiação) para as temperaturas dos componentes a ser resolvido de forma sequencial desde a entrada do loop até a saída. O sistema é solucionado pelo método de Newto-Raphson. Nas seções seguintes a modelagem de cada componente é apresentada

5.2.3 Modelagem do FTC

O fluido de transferência de calor (FTC) utilizado nessa modelagem é o Therminol VP-1, fluído disponível na biblioteca do *software* EES. Na Figura 35 são apresentados os componentes consideradas no balanço de energia para o FTC.

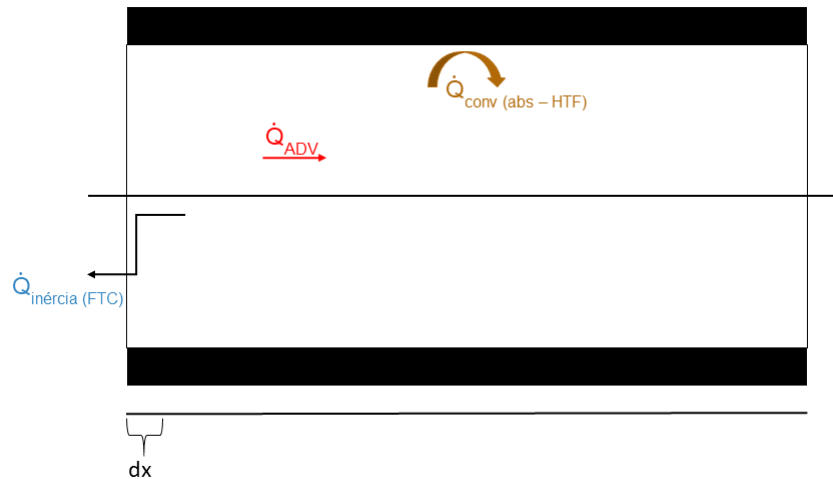


Figura 35 – Componentes do balanço de energia para o FTC.

A equação que rege o balanço térmico é a Equação 5.16.

$$m.c.\frac{dT_{FTC}}{dt} = \dot{Q}_{ADV} + \dot{Q}_{conv(abs-FTC)} \quad (5.16)$$

Onde:

m , é a massa, [kg];

c , é o calor específico, [kJ/kg.K];

$\frac{dT_{FTC}}{dt}$, derivada temporal da temperatura do FTC;

\dot{Q}_{ADV} , transferência de calor devido a advecção, [W];

$\dot{Q}_{conv(abs-FTC)}$, calor por convecção entre tubo absorvedor e FTC, [W].

O termo da esquerda da Equação 5.16 se refere ao termo de inércia térmica, responsável pelo comportamento dinâmico do campo solar, modelado pela Equação 5.17.

$$\dot{Q}_{inércia(FTC)} = -Vol_{FTC} \cdot cp_{FTC} \cdot \rho_{FTC} \cdot (T_{FTC} - T_{FTCa}) / dt \quad (5.17)$$

Onde:

$\dot{Q}_{inércia(FTS)}$, inércia térmica do tubo absorvedor, [W];

Vol_{FTC} , volume do FTC, [m³];

cp_{FTC} , calor específico do FTC, [$\frac{J}{Kg.K}$];

ρ_{FTC} , densidade do FTC, [$\frac{kg}{m^3}$];

T_{FTC} , temperatura do fluido de transferência de calor, [K];

T_{FTCa} , temperatura do fluido de transferência de calor no passo de tempo anterior, [K];

dt , passo no tempo da simulação.

Vale ressaltar aqui que, para uma melhor estabilidade da solução, a discretização temporal é determinada de forma a que uma parcela de fluido não atravessasse mais do que um volume de controle em um passo no tempo. Sendo assim, o passo no tempo dt é estimado por:

$$dt = \frac{dx}{u} \quad (5.18)$$

Sendo que o volume do FTC é calculado conforme a Equação 5.19. Onde Ri_{abs} é o raio interno do absorvedor e dx o comprimento do volume de controle considerado para o FTC.

$$Vol_{FTC} = \pi \cdot Ri_{abs}^2 \cdot dx \quad (5.19)$$

Para capturar o comportamento dinâmico do coletor solar realisticamente, os termos de inércia de todos os componentes devem ser considerados. Para os demais componentes, o termo de inércia é calculado de forma análoga.

A segunda parcela do balanço energético do FTC é a componente devido a advecção calculada pela Equação 5.20. Na formulação por volumes finitos, para a quantificação deste termo é necessário a temperatura da face do volume de controle que tem que ser estimada a partir da interpolação dos valores de temperatura nos nós. Neste trabalho, adotou-se a interpolação “upwind”, onde a temperatura na face do volume de controle é considerada igual a do nó do volume de controle a montante da referida face. Considerou-se também uma formulação completamente implícita, ou seja todas as temperaturas consideradas no balanço, à exceção do termo de inércia, se referem ao passo no tempo sendo calculado. Sendo assim o calor por advecção é dado por.

$$\dot{Q}_{ADV} = -cp_{FTC} \cdot \rho_{FTC} \cdot u \cdot A_{transv} \cdot (T_{FTC} - T_{FTC(imn1)}) \quad (5.20)$$

Onde:

cp_{FTC} , calor específico do FTC, [$\frac{J}{Kg \cdot K}$];

ρ_{FTC} , densidade do FTC, [$\frac{kg}{m^3}$];

u , velocidade média do FTC no tubo absorvedor, [$\frac{m}{s}$];

A_{transv} , área transversal do tubo absorvedor, [m^2];

T_{FTC} , temperatura do FTC, [K];

$T_{FTC(imn1)}$, temperatura do volume de controle a montante, [K].

Há também a parcela de calor trocada devido ao mecanismo de convecção entre o FTC e o tubo absorvedor, Equação 5.21.

$$\dot{Q}_{conv(abs-FTC)} = h_{abs-FTC} \cdot A_{transv} \cdot (T_{FTC} - T_{abs}) \quad (5.21)$$

Onde:

$h_{abs-FTC}$, coeficiente de transferência de calor por convecção entre FTC e absorvedor, [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$];

$A_{transv_{abs}}$, área transversal do tubo absorvedor, [m^2];

T_{FTC} , temperatura do FTC, [K];

T_{abs} , temperatura do absorvedor, [K].

O termo $h_{abs-FTC}$ é modelado por relações empíricas do número de Nusselt em função do número de Reynolds e de Prandtl ou Grashoff apropriadas para os regimes de escoamento.

5.2.4 Modelagem do tubo evacuado

O *Schott PTR70[®] Receiver* também possui um tubo interno de aço que é o tubo absorvedor. Os dados para a modelagem térmica do tubo foram retiradas de catálogos do fabricante e um detalhe do mesmo está apresentado na Figura 36.



Figura 36 – Detalhe do tubo absorvedor da *Schott PTR70[®] Receiver*.

Um esquema das componentes de transferência de calor está apresentado na Figura 37.

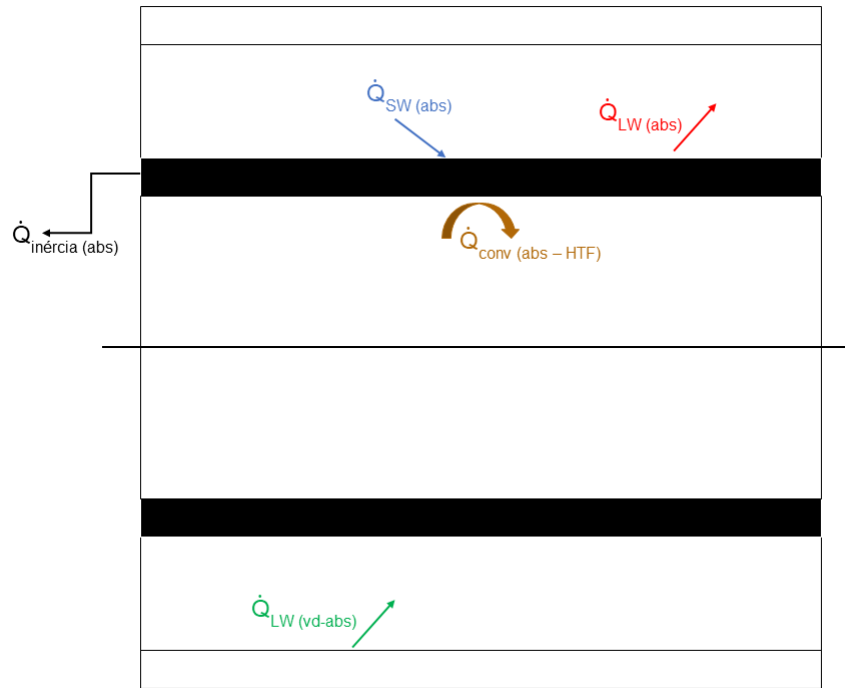


Figura 37 – Componentes do balanço de energia para o tubo absorvedor.

$$m.c.\frac{dT_{ABS}}{dt} = \dot{Q}_{LW(vd-abs)} + \dot{Q}_{SW(abs)} + \dot{Q}_{LW(abs)} + \dot{Q}_{conv(abs-FTC)}, \quad (5.22)$$

onde:

m , é a massa, [kg];

c , é o calor específico, [kJ/kg.K];

$\frac{dT_{ABS}}{dt}$, derivada temporal da temperatura do FTC;

$\dot{Q}_{LW(vd-abs)}$, radiação térmica emitida pelo vidro, [W];

$\dot{Q}_{SW(abs)}$, radiação solar absorvida pelo tubo absorvedor, [W];

$\dot{Q}_{LW(abs)}$, radiação térmica emitida pelo absorvedor, [W];

$\dot{Q}_{conv(abs-FTC)}$, calor por convecção entre tubo absorvedor e FTC, [W].

A primeira parcela do balanço energético do tubo absorvedor a ser considerada é a radiação térmica emitida pelo vidro para o absorvedor pela superfície interna ($\dot{Q}_{LW(vd-abs)}$), calculada conforme a Equação 5.23.

$$\dot{Q}_{LW(vd-abs)} = \varepsilon_{vd} \cdot F_{vd-abs} \cdot A_{i_{vd}} \cdot \sigma \cdot T_{vd}^4, \quad (5.23)$$

em que

ε_{vd} , emissividade do vidro, [-];

Ai_{vd} , área longitudinal interna do envelope de vidro;
 σ , constante de Stefan-Boltzmann, $[W/m^2.K^4]$;
 F_{vd-abs} , fator de forma do vidro para absorvedor, [-];
 T_{vd} , temperatura do envelope de vidro [K].

$$\dot{Q}_{SW(abs)} = DNI \cdot Alf_{ef} \cdot \eta_o \cdot \tau_{vd} \cdot \alpha_{abs} \quad (5.24)$$

Onde:

DNI , radiação direta normal, $[\frac{W}{m^2}]$;
 Alf_{ef} , área efetiva do coletor Linear Fresnel, $[m^2]$;
 η_o , eficiência ótica to tubo absorvedor, [-];
 τ_{vd} , transmissividade do vidro, [-];
 α_{abs} , absorptividade do tubo absorvedor, [-].

$$\dot{Q}_{LW(abs)} = \varepsilon_{abs} \cdot Ae_{abs} \cdot \sigma \cdot T_{abs}^4 \quad (5.25)$$

Onde:

ε_{abs} , emissividade do tubo absorvedor, [-];
 Ae_{abs} , área longitudinal externa do tubo absorvedor, $[m^2]$;
 σ , constante de Stefan-Boltzmann, $[W/m^2.K^4]$;
 T_{abs} , temperatura do tubo absorvedor, [K].

Assim como o vidro, o termo de inércia é modelado de forma análoga ao FTC.

Como é comum em concentradores lineares, o fluido escoia através de um tubo, que consiste de um tubo absorvedor e um envelope de vidro com vácuo entre eles. Essa configuração minimiza perdas por radiação térmica e impede trocas de calor por convecção. O coletor Linear Fresnel utilizado é o da *Industrial Solar*. Ele utiliza como seu tubo absorvedor o *Schott PTR70[®] Receiver* e está apresentado na Figura 38.

A modelagem térmica do tubo absorvedor é realizada conforme a Equação 5.26, em que o termo da esquerda é o tubo de vidro.

$$m.c. \frac{dT_{VD}}{dt} = \dot{Q}_{SW(vd)} + \dot{Q}_{LW(abs-vd)} + \dot{Q}_{LW(vd-abs)} + \dot{Q}_{LW(rf-vd)} + \dot{Q}_{LW(lf-vd)} + \dot{Q}_{LW(vd)} + \dot{Q}_{conv(vd-atm)} \quad (5.26)$$

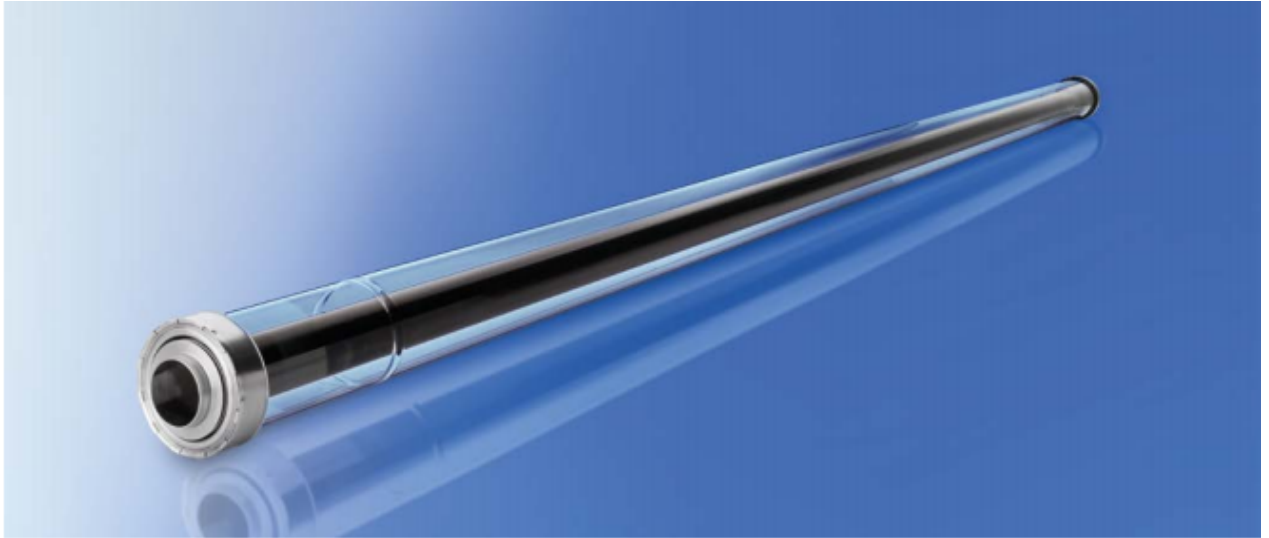


Figura 38 – Tubo absorvedor da marca *Schott*.

A modelagem desse tubo absorvedor é realizada por meio de balanço de energia considerando os mecanismos de transferência de calor apropriados. Para o vidro/envelope as componentes da transferência de calor são: radiação solar absorvida pelo vidro ($\dot{Q}_{SW(vd)}$), radiação térmica emitida pelo absorvedor para o vidro ($\dot{Q}_{LW(abs-vd)}$), radiação térmica emitida pelo vidro (superfície interna) ($\dot{Q}_{LW(vd-abs)}$), radiação térmica emitida pelo refletor (superfície interna) que vai para o vidro ($\dot{Q}_{LW(rf-vd)}$), radiação térmica emitida pelo concentrador LF que atinge o vidro ($\dot{Q}_{LW(lf-vd)}$), radiação térmica emitida pelo vidro da superfície externa, parte para o refletor ($\dot{Q}_{LW(vd)}$), calor por convecção entre tubo absorvedor e HTF ($\dot{Q}_{conv(vd-atm)}$) e por último a inércia térmica do vidro ($\dot{Q}_{inércia(vd)}$). Essas componentes estão apresentadas na Figura 39.

Todas as parcelas apresentadas na Figura 39 são apresentadas nas equações a seguir. A primeira parcela do balanço de energia é a radiação solar absorvida pelo tubo de vidro, que leva em conta a radiação refletida no absorvedor, Equação 5.27.

$$\dot{Q}_{SW(vd)} = DNI \cdot Alf_{(ef)} \cdot \eta_o \cdot (1 - \tau_{vd}) \cdot (2 - \alpha_{abs}) \quad (5.27)$$

Onde:

$\dot{Q}_{SW(vd)}$, radiação solar absorvida pelo tubo de vidro, [W];

DNI , irradiação direta normal, [$\frac{W}{m^2}$];

$Alf_{(ef)}$, área efetiva do concentrador em cada dx, [m^2];

η_o , eficiência ótica do refletor, [-];

τ_{vd} , transmissividade envelope de vidro, [-];

α_{abs} , absorvidade do absorvedor, [-].

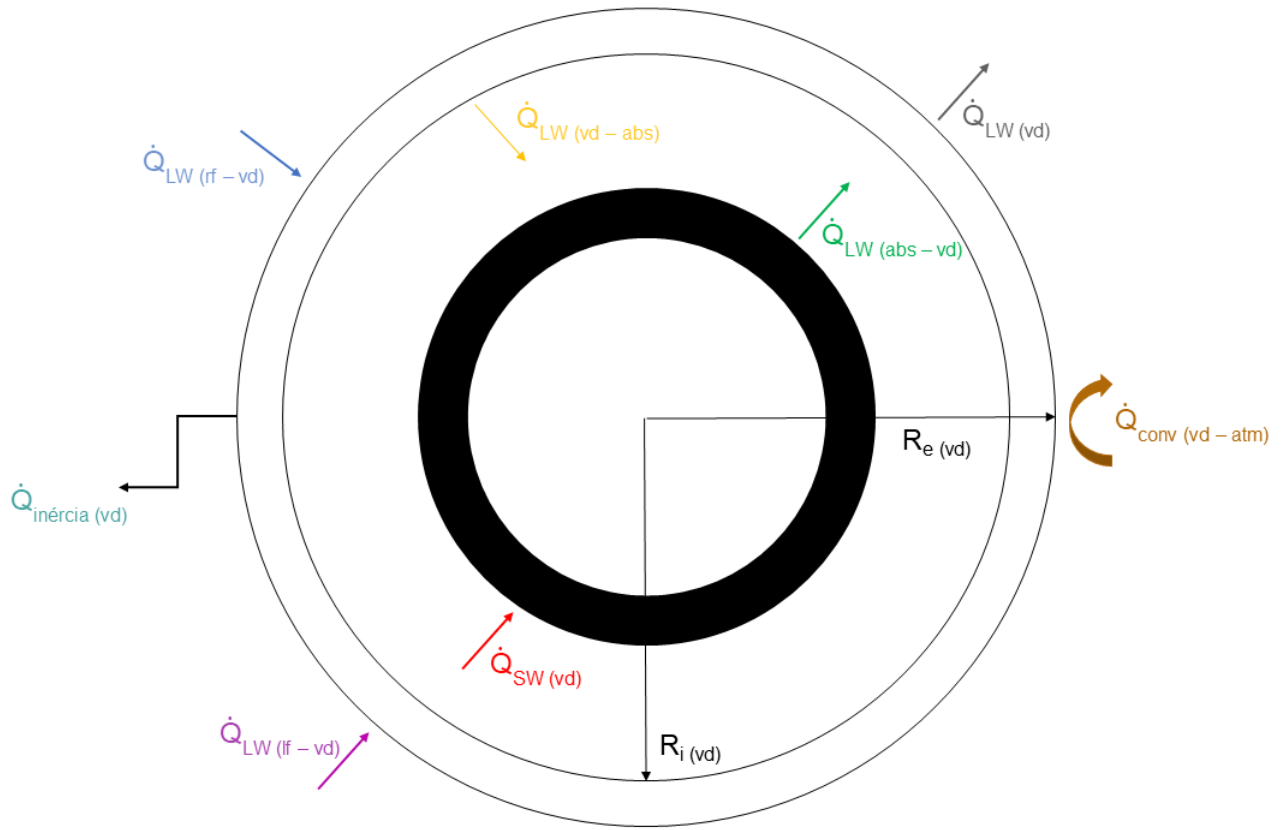


Figura 39 – Componentes do balanço térmico aplicado ao envelope de vidro do tubo absorvedor.

A segunda parcela considerada na modelagem térmica do envelope de vidro é radiação térmica emitida pelo absorvedor e absorvida pelo vidro, Equação 5.28.

$$\dot{Q}_{LW(abs-vd)} = \dot{Q}_{LW(abs)} \cdot \alpha_{vd} \quad (5.28)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(abs-vd)}$, radiação térmica emitida pelo absorvedor e absorvida pelo vidro, [W];

$\dot{Q}_{LW(abs)}$, radiação térmica emitida pelo absorvedor, [W];

α_{vd} , absorvidade do vidro, [-].

Sendo que a absorvidade do vidro é calculada conforme a Equação 5.29, onde U é a transmitância térmica.

$$\alpha_{vd} = 1 - U \quad (5.29)$$

Ainda na modelagem é necessário considerar a parcela de radiação térmica emitida pelo vidro (superfície interna) para o absorvedor, calculada conforme a Equação 5.30.

$$\dot{Q}_{LW(vd-abs)} = \varepsilon_{vd} \cdot Ai_{vd} \cdot \sigma \cdot T_{vd}^4 \quad (5.30)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(vd-abs)}$, radiação térmica emitida pelo vidro, [W];

ε_{vd} , emissividade do vidro, [-];

Ai_{vd} , área longitudinal interna do tubo absorvedor, [m^2];

σ , constante de Stefan-Boltzmann, [$W/m^2 \cdot K^4$];

T_{vd} , temperatura do vidro, [K].

A próxima parcela do balanço energético é a radiação que o refletor secundário (superfície interna) que vai para o vidro do envelope do tubo absorvedor. Essa parcela de radiação é calculada levando-se em conta a área externa longitudinal do envelope de vidro (Ae_{vd}) devido à reciprocidade. O vidro, chamado de envelope do tubo absorvedor, é modelado considerando um ΔR , ou seja, possui um raio externo (Re_{vd}) um raio interno (Ri_{vd}).

$$Ae_{vd} = 2\pi \cdot Re_{vd} \cdot dx \quad (5.31)$$

Outras duas quantidades consideradas no balanço de energia foram as de radiação térmica emitida pelo refletor secundário e pelo coletor linear Fresnel, calculadas pela Equação 5.32 e Equação 5.33 respectivamente.

$$\dot{Q}_{LW(rf-vd)} = \varepsilon_{rf} \cdot Ae_{vd} \cdot F_{vd-rf} \cdot \sigma \cdot T_{vd}^4 \quad (5.32)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(rf-vd)}$, radiação térmica emitida pelo refletor secundário, [W];

ε_{rf} , emissividade do refletor secundário, [-];

Ae_{vd} , área longitudinal externa do envelope de vidro, [m^2];

F_{vd-rf} , fator de forma do vidro para refletor secundário, [-];

σ , constante de Stefan-Boltzmann, [$W/m^2 \cdot K^4$];

T_{vd} , temperatura do refletor secundário, [K].

A radiação térmica emitida pelo concentrador Linear Fresnel que atinge o vidro é calculada pela Equação 5.33.

$$\dot{Q}_{LW(lf-vd)} = \varepsilon_{lf} \cdot Ae_{vd} \cdot F_{vd-lf} \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad (5.33)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(lf-vd)}$, radiação térmica emitida pelo concentrador Linear Fresnel, [W]

ε_{lf} , emissividade do concentrador Linear Fresnel (espelhos), [-];

Ae_{vd} , área longitudinal externa do envelope de vidro, [m^2];

F_{vd-lf} , fator de forma do vidro para LF (assumindo largura infinita), [-];

σ , constante de Stefan-Boltzmann, [$W/m^2 \cdot K^4$];

T_{ar} , temperatura do ar, [K].

O vidro também emite radiação térmica por sua superfície externa, calculada de acordo com a Equação 5.34.

$$\dot{Q}_{LW(vd)} = \varepsilon_{vd} \cdot Ae_{vd} \cdot \sigma \cdot T_{vd}^3 \quad (5.34)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(vd)}$, radiação térmica emitida pela superfície externa do envelope vidro, [W];

ε_{vd} , emissividade do vidro, [-];

Ae_{vd} , área longitudinal externa do envelope de vidro, [m^2];

σ , constante de Stefan-Boltzmann, [$W/m^2 \cdot K^4$];

T_{vd} , temperatura do vidro, [K].

Outro mecanismo de perda de calor que é necessário considerar nessa modelagem é a perda de calor por convecção entre o vidro e a atmosfera, Equação 5.35.

$$\dot{Q}_{conv(vd-atm)} = h_{ar-vd} \cdot Ae_{vd} \cdot (T_{vd} - T_{ar}) \quad (5.35)$$

Onde:

$\dot{Q}_{conv(vd-atm)}$, calor por convecção entre vidro e atmosfera, [W];

h_{ar-vd} , coeficiente de transferência de calor por convecção entre vidro e ar, [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$];

Ae_{vd} , área longitudinal externa do envelope de vidro, [m^2];

T_{vd} , temperatura do vidro, [K];

T_{ar} , temperatura do vidro, [K].

O termo de inérgica é modelado de forma análoga ao FTC dado na Equação 5.17.

5.2.5 Modelagem do Refletor Secundário

O refletor secundário é uma outra parte que precisou ser modelada para a simulação proposta. A geometria admitida para a modelagem foi a de um semicírculo conforme apresentado na Figura 40. A geometria utilizada na maioria nos refletores comerciais possui uma forma mais complexa, esse formato de semicírculo foi admitido para simplificar a modelagem.

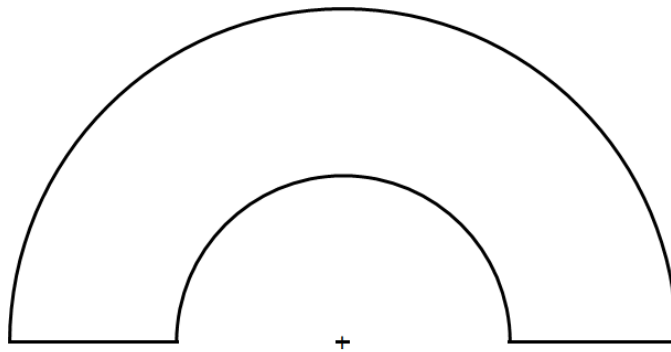


Figura 40 – Esquema do refletor secundário.

Para a modelagem térmica do refletor secundário o mesmo é discretizado em três volumes de controle, conforme apresentado na Figura 41. A razão para tal é que, como o refletor secundário é revestido por um isolamento térmico considerou-se que a aproximação de distribuição de temperatura uniforme poderia não ser válida. Para cada um desses volumes de controle é realizado um balanço de energia, considerando os mecanismos de transferência de calor pertinentes.

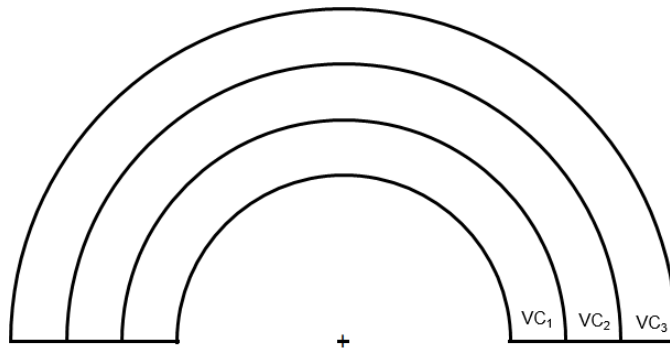


Figura 41 – Volumes de controle adotados para modelagem térmica do refletor secundário.

Para o primeiro volume de controle (VC_1) as parcelas de transferência de calor consideradas estão apresentadas na Figura 42.

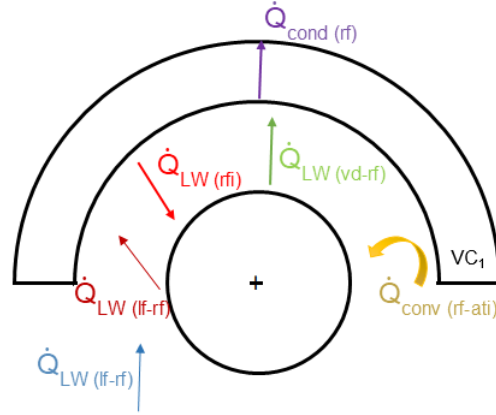


Figura 42 – Componentes do balanço energético para o volume de controle 1.

O balanço energético realizado nessa modelagem, do primeiro volume de controle, é o da Equação 5.36.

$$m.c. \frac{dT_{rf}}{dt} = \dot{Q}_{LW(vd-rf)} + \dot{Q}_{LW(lf-rf)} + \dot{Q}_{LW(abs-rf)} - \dot{Q}_{LW(rfi)} - \dot{Q}_{conv(rf-ati)} - \dot{Q}_{cond(rf)} \quad (5.36)$$

Onde, o termo à esquerda da equação é a inércia térmica do refletor secundário. Nesse balanço de energia o primeiro termo do lado direito dessa equação é a radiação térmica emitida pelo vidro ($\dot{Q}_{LW(vd-rf)}$) e a mesma é calculada pela Equação 5.37. O termo seguinte é o da radiação térmica emitida pelo coletor Linear Fresnel para o coletor secundário ($\dot{Q}_{LW(lf-rf)}$) e é obtida pela Equação 5.38 e a radiação térmica emitida pela superfície externa do tubo absorvedor ($\dot{Q}_{LW(abs-rf)}$), Equação 5.39 e ($\dot{Q}_{LW(rfi)}$) que é a radiação térmica emitida pelo superfície interna, Equação 5.40. A parcela perdida por convecção entre a superfície interna e a atmosfera é ($\dot{Q}_{conv(rf-ati)}$), conforme a Equação 5.41. O último termo do balanço é a perda de calor por condução nas faces dos volumes de controle ($\dot{Q}_{cond(rf)}$) que é calculado pela Equação 5.42.

$$\dot{Q}_{LW(vd-rf)} = \varepsilon_{vd} \cdot A_{e_{vd}} \cdot F_{vd-rf} \cdot \sigma \cdot T_{vd}^4 \quad (5.37)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(vd-rf)}$, radiação térmica emitida pelo vidro, [W];

ε_{vd} , emissividade do vidro, [-];

$A_{e_{vd}}$, área longitudinal externa do vidro que envolve o absorvedor, [m^2];

F_{vd-rf} , fator de forma do vidro para refletor secundário, [-];

σ , constante de Stefan-Boltzmann, $[W/m^2.K^4]$;
 T_{vd} , temperatura do vidro, [k].

$$\dot{Q}_{LW(lf-rf)} = \varepsilon_{lf} \cdot A_{i_{rf}} \cdot F_{rf-lf} \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad (5.38)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(lf-rf)}$, radiação térmica emitida pelo coletor Linear Fresnel para o coletor secundário, [W];

ε_{lf} , emissividade do coletor Linear Fresnel, [-];

$A_{i_{rf}}$, área longitudinal interna do refletor secundário, $[m^2]$;

F_{rf-lf} , Fator de forma do refletor secundário para solo, [-];

σ , constante de Stefan-Boltzmann, $[W/m^2.K^4]$;

T_{ar} , temperatura do ar, [k].

$$\dot{Q}_{LW(abs-rf)} = \dot{Q}_{LW(abs)} \cdot \tau_{vd} \cdot A_{e, vd} \cdot F_{vd-rf} \quad (5.39)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(abs-rf)}$, radiação térmica emitida pelo absorvedor (superfície externa), [W];

$\dot{Q}_{LW(abs)}$, radiação térmica emitida pelo absorvedor, [W];

τ_{vd} , transmissividade envelope de vidro, [-];

$A_{e, vd}$, área longitudinal externa do vidro que envolve o absorvedor, $[m^2]$;

F_{vd-rf} , fator de forma do vidro para refletor secundário, [-].

$$\dot{Q}_{LW(rfi)} = \varepsilon_{rf} \cdot A_{i_{rf}} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5.40)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(rfi)}$, radiação emitida pela superfície interna do refletor secundário, [W];

ε_{rf} , emissividade do refletor secundário, [-];

$A_{i_{rf}}$, área longitudinal interna do refletor secundário, $[m^2]$;

σ , constante de Stefan-Boltzmann, $[W/m^2.K^4]$;

T , temperatura da superfície interna do coletor, [K].

$$\dot{Q}_{conv(rf-ati)} = h_{ar-rfi} \cdot A_{i_{rf}} \cdot (T_{si} - T_{ar}) \quad (5.41)$$

Onde:

$\dot{Q}_{conv(rf-ati)}$, calor perdido por convecção pela superfície interna do refletor secundário, [W];

h_{ar-rfi} , coeficiente de transferência de calor por convecção entre refletor secundário e ar, [$W/m^2.K$];

$A_{i_{rf}}$, área longitudinal interna do refletor secundário, [m^2];

T_{si} , temperatura da superfície interna do refletor secundário, [K];

T_{ar} , temperatura do ar, [K].

$$\dot{Q}_{cond(rf)} = -A_{rf} \cdot k_{rf} \cdot (T_{rf} - T_{rf*}) / (\Delta R_{rf}) \quad (5.42)$$

Onde:

$\dot{Q}_{cond(rf)}$, calor por condução nas faces do volume de controle, [W];

A_{rf} , área das faces dos volumes de controle (somente as faces internas), [m^2];

k_{rf} , Condutividade Térmica, [$W/m.K$];

$T_{rf} - T_{rf*}$, diferença de temperatura entre as faces dos volumes de controle, [K];

ΔR_{rf} , variação do Raio do refletor secundário, [m].

De maneira semelhante um balanço de energia (Equação 5.43) é realizado para o segundo volume de controle (VC_2), no qual ocorre perdas de calor por condução nas faces dos volumes de controle. Essas parcelas são calculadas conforme a Equação 5.42. Essas parcelas estão apresentadas na Figura 43.

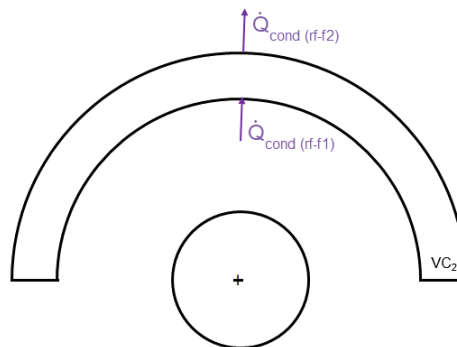


Figura 43 – Componentes do balanço energético para o volume de controle 2.

$$\dot{Q}_{cond(rf-f1)} - \dot{Q}_{cond(rf-f2)} = 0 \quad (5.43)$$

O último volume de controle é modelado conforme balanço energético Equação 5.44.

$$m.c. \frac{dT_{rf}}{dt} = \dot{Q}_{Rg(rf)} + \dot{Q}_{LW(atm-rf)} + \dot{Q}_{LW(rfe)} - \dot{Q}_{conv(rf-atm)} + \dot{Q}_{cond(rf-e)} \quad (5.44)$$

Essas componentes estão apresentadas na Figura 44.

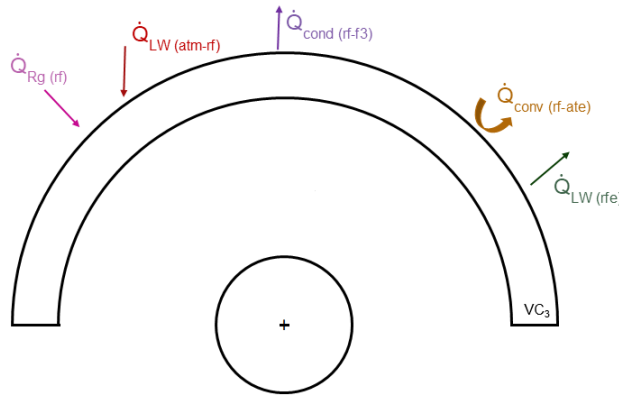


Figura 44 – Componentes do balanço energético para o volume de controle 3.

Sendo que o primeiro termo é a radiação global absorvida pelo refletor ($\dot{Q}_{Rg(rf)}$), calculado conforme a Equação 5.45.

$$\dot{Q}_{Rg(rf)} = Rg.(2Re_{rf}).\alpha_{rf} \quad (5.45)$$

Onde:

$\dot{Q}_{Rg(rf)}$, Calor de Radiação Global absorvido pelo refletor, [W];

Rg , radiação solar global, [W/m^2];

Re_{rf} , raio interno refletor secundário, [m];

α_{rf} , absortividade do refletor secundário, [-].

As duas parcelas seguintes nesse balanço são a radiação térmica do céu para o refletor ($\dot{Q}_{LW(atm-rf)}$) e a radiação térmica emitida pelo refletor na superfície externa ($\dot{Q}_{LW(rfe)}$), calculadas pela Equação 5.46 e Equação 5.48, respectivamente.

$$\dot{Q}_{LW(atm-rf)} = LW.Ae_{(rf)} \quad (5.46)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(atm-rf)}$, Radiação térmica do céu para o refletor, [W];

LW , radiação térmica da atmosfera, [W/m^2];

$Ae_{(rf)}$, área longitudinal externa do refletor secundário, [m^2].

O termo LW é o termo que contabiliza a radiação térmica da atmosfera e, segundo Brutsaert (1975) é calculado conforme Equação 5.47.

$$LW = 1,24 \cdot \sigma \cdot T_0^4 \cdot (e_0/T_0)^m \quad (5.47)$$

$$\dot{Q}_{LW(rfe)} = \varepsilon_{rf} \cdot Ae_{rf} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5.48)$$

Onde:

$\dot{Q}_{LW(rfe)}$, radiação térmica emitida pelo refletor, [W];

ε_{rf} , emissividade do refletor secundário, [-];

Ae_{rf} , área longitudinal externa do refletor secundário, [m^2];

σ , constante de Stefan-Boltzmann, [$W/m^2 \cdot K^4$];

T , temperatura da superfície externa do refletor secundário, [K].

A modelagem do coletor se deu por trocas convectivas em sua superfície interna e superfície externa. O termo de calor por convecção entre o coletor (superfície externa) e a atmosfera é o $Q_{conv(rf-atm)}$ calculado pela Equação 5.49.

$$\dot{Q}_{conv(rf-ate)} = h_{ar-rfe} \cdot Ae_{rf} \cdot (T_{se} - T_{ar}) \quad (5.49)$$

Onde:

$\dot{Q}_{conv(rf-ate)}$, calor por convecção entre o refletor (superfície externa) e a atmosfera, [W];

h_{ar-rfe} , coeficiente de transferência de calor por convecção entre vidro e ar, [$W/m^2 \cdot K$];

Ae_{rf} , área longitudinal externa do refletor secundário, [m^2];

T_{se} , temperatura da superfície externa, [K];

T_{ar} , temperatura do ar, [K].

E por último no balanço é o termo ($\dot{Q}_{cond(rf-e)}$) que é a o calor devido à condução na superfície externa.

5.3 Queimador Auxiliar

O queimador auxiliar foi modelado considerando que o combustível utilizado foi um CDR. O CDR é obtido com os resíduos outrora depositado no aterro. Para tanto é utilizado uma aproximação para os valores da composição do gás que seria obtido caso o CDR fosse produzido e gaseificado. Para o presente estudo a composição utilizada foi: 1% CO_2 , 25% CO , 9% CH_4 , 20% H_2 e 45% N_2 . Esses valores foram obtidos com base nos seguintes estudos: Arafat e Jijakli (2013) e Martínez et al. (2012). Com esses valores e os valores do PCI de cada um dos componentes do gás, foi possível calcular o PCI do gás e com isso calcular a vazão necessária para manter o queimador auxiliar funcionando.

6 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados para estimar a quantidade de metano gerado anualmente no aterro sanitário Jockey Club de Brasília. Para tanto foram utilizadas dois modelos de estimativa, o primeiro proposto pelo IPCC e o segundo pelo USEPA. Sendo que para os resultados obtidos nesse trabalho optou-se pelo segundo em detrimento do primeiro.

6.1 Dados utilizados para estimar a produção de Metano no Aterro

Os dados utilizados no presente trabalho foram retirados do trabalho de Carneiro (2002). O autor fez uma compilação de dados obtidos em relatórios da SLU para os anos 1966 até 2000. Essa compilação foi feita com base nos dados oriundos desses relatórios, porém alguns valores que não estavam disponíveis foram obtidos a partir de um processo de interpolação, que levou em conta o crescimento populacional e o crescimento da quantidade de resíduos dispostos em cada um desses anos sem dados.

Já os dados de 2001 a 2016 (ano idealizado para realizar o inventário), não estavam todos disponíveis em relatórios ou estimativas. Sendo assim se fez necessário a utilização de interpolação linear com os valores disponíveis para completar os dados. O conjunto de dados utilizados nesse trabalho estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Quantidade de resíduos gerado e aterrado ao longo dos anos de funcionamento do aterro.

Ano	Resíduo gerado [t]	Resíduo aterrado [t]
1966	16465	10674
1967	34560	27311
1968	38010	21244
1969	42032	19243
1970	58334	32354
1971	77362	50464
1972	92122	66982
1973	104637	63505
1974	102973	52625
1975	120510	59739
1976	146622	80115
1977	161516	92211

Continua.

Tabela 10 – Conclusão.

Ano	Resíduo gerado [t]	Resíduo aterrado [t]
1978	172094	93157
1979	182502	103349
1980	191757	121032
1981	188037	126526
1982	206613	145146
1983	232992	171075
1984	212039	147703
1985	214809	149044
1986	256512	181986
1987	260357	185851
1988	279598	149917
1989	293499	150168
1990	322975	176646
1991	474252	352250
1992	420367	306962
1993	347372	285112
1994	352190	298496
1995	415037	340965
1996	520761	444196
1997	597230	538782
1998	643466	581754
1999	675090	527614
2000	725419	560544
2001	742844	581779
2002	761057	603974
2003	777597	624131
2004	812320	666445
2005	831536	689863
2006	850608	713105
2007	877750	746182
2008	915858	792621
2009	934573	815428
2010	920752	798585
2011	935745	816856
2012	950247	834529
2013	1003399	899303

Continua.

Tabela 10 – Conclusão.

Ano	Resíduo gerado [t]	Resíduo aterrado [t]
2014	1026963	928019
2015	1050470	956665
2016	1011415	967980

6.1.1 Parâmetros utilizados na aplicação do método DPO do IPCC

Para a aplicação do método apresentado pelo IPCC, são necessários alguns parâmetros mencionados na seção 4.1. Muitos desses parâmetros estão relacionados com características dos resíduos, composição gravimétrica, teor de umidade, forma de disposição final além de fatores climáticos. Por meio da Tabela 4, e considerando o clima da região onde o aterro está localizado como sendo úmido e tropical de altitude. Para o valor da taxa de geração de metano k , foi escolhido 0.15. Esse valor foi escolhido com base na precipitação média anual em Brasília e na temperatura ambiente média anual. Esse valor é um valor padrão para resíduos que se degradam de maneira moderada. O valor escolhido para o fator de correção de metano foi 0.6. Esse valor é indicado para países em desenvolvimento quando não é possível a classificação do aterro em nenhuma das categorias apresentadas pelo IPCC. Devido à falta de informações e dados sobre a composição dos resíduos no Distrito Federal, para o cálculo dos valores do Carbono Orgânico Degradável (COD) foi utilizada uma expressão proposta no terceiro inventário de emissões de gases de efeito estufa MCTI (2014), Equação 6.1.

$$DOC(t) = at + b \quad (6.1)$$

Os valores obtidos com a aplicação da Equação 6.1 estão apresentados na Tabela 11. Segundo o MCTI (2006) valores ideais para o COD no Brasil estariam contidos no intervalo entre 17.8 e 28.4%. Cerca de 53% dos valores de COD obtidos nesse estudo estão contidos nesse intervalo. E também vale observar que se tomarmos os 47% restantes, ou seja, os que ficaram fora do intervalo, é possível observar que o menor valor obtido foi de 13.64% o que equivale a um desvio de 23% com relação ao limite inferior do intervalo.

Os valores do COD_f e da fração de metano presente no gás de aterro foram escolhidos com 0.6, seguindo recomendações do manual do IPCC.

Tabela 11 – Valores de COD, F e Lo obtidos para cada ano em análise.

Ano	COD	Fração de MSW aterrado	Lo [Gg CH ₄ / Gg resíduo]
1966	0.223	0.648	0.064
1967	0.221	0.790	0.064

Continua.

Tabela 11 – Conclusão.

Ano	COD	Fração de MSW aterrado	Lo [Gg CH ₄ / Gg resíduo]
1968	0.219	0.559	0.063
1969	0.217	0.458	0.063
1970	0.216	0.555	0.062
1971	0.214	0.652	0.062
1972	0.212	0.727	0.061
1973	0.211	0.607	0.061
1974	0.209	0.511	0.060
1975	0.207	0.496	0.059
1976	0.205	0.546	0.059
1977	0.204	0.571	0.058
1978	0.202	0.541	0.058
1979	0.200	0.566	0.057
1980	0.198	0.631	0.057
1981	0.197	0.673	0.056
1982	0.195	0.703	0.056
1983	0.193	0.734	0.055
1984	0.192	0.696	0.055
1985	0.189	0.694	0.054
1986	0.188	0.709	0.054
1987	0.186	0.714	0.054
1988	0.185	0.536	0.053
1989	0.183	0.512	0.053
1990	0.181	0.547	0.052
1991	0.179	0.743	0.052
1992	0.177	0.730	0.051
1993	0.176	0.821	0.051
1994	0.174	0.847	0.050
1995	0.173	0.822	0.049
1996	0.171	0.853	0.049
1997	0.169	0.902	0.048
1998	0.167	0.904	0.048
1999	0.166	0.782	0.047
2000	0.164	0.773	0.047
2001	0.162	0.783	0.046
2002	0.160	0.794	0.046
2003	0.159	0.803	0.045

Continua.

Tabela 11 – Conclusão.

Ano	COD	Fração de MSW aterrado	Lo [Gg CH4/ Gg resíduo]
2004	0.157	0.820	0.045
2005	0.155	0.829	0.045
2006	0.154	0.838	0.044
2007	0.152	0.850	0.043
2008	0.150	0.865	0.043
2009	0.148	0.873	0.043
2010	0.147	0.867	0.042
2011	0.145	0.873	0.042
2012	0.143	0.878	0.041
2013	0.142	0.896	0.041
2014	0.139	0.904	0.040
2015	0.138	0.911	0.039
2016	0.136	0.957	0.039

Já o potencial de geração de metano foi encontrado com base em valores de nos valores do FCM, COD, CODf, F e do fator de 16/12. Com posse de todos esses valores é possível obter a estimativa da geração de metano, que está apresentada na seção 6.2.

O método LandGEM, assim como o método proposto pelo IPCC, necessita de dados de disposição de resíduos, nesse caso os mesmos dados apresentados na Tabela 10 foram utilizados. Com relação à parâmetros o *software* disponibilizado pelo USEPA em seus *inputs* requer a taxa de geração de metano (k) o potencial de geração de metano (Lo) e a fração de metano contido no gás (F). Valores padrões foram escolhidos para cada um desses parâmetros. Para a taxa de geração de metano o valor de $0,04 \text{ ano}^{-1}$ foi escolhido e para o potencial de geração de metano o valor de $100 \frac{\text{m}^3}{\text{Mg}}$. Já a fração de metano foi escolhida como sendo 0,50. Esses valores são recomendados para o caso de um inventario ser realizado.

O *software* oferece a possibilidade de utilizar valores específicos para esses parâmetros, porém o modelo não respondeu como o esperado para os dados utilizados nesse estudo o que inviabilizou a utilização de tais valores.

6.2 Quantidade de gás metano gerado anualmente

Para o início da análise da planta é necessária uma estimativa da quantidade de gás que o aterro produziu ao longo dos anos. Através dos parâmetros apresentados nas seções anteriores foi possível estimar a quantidade de metano gerado no aterro ao longo dos anos. Para analisar o potencial de geração de metano os métodos aplicados foram o método proposto pelo IPCC e o método proposto pelo USEPA. Os valores obtidos por esses métodos estão apresentados na Figura 45.

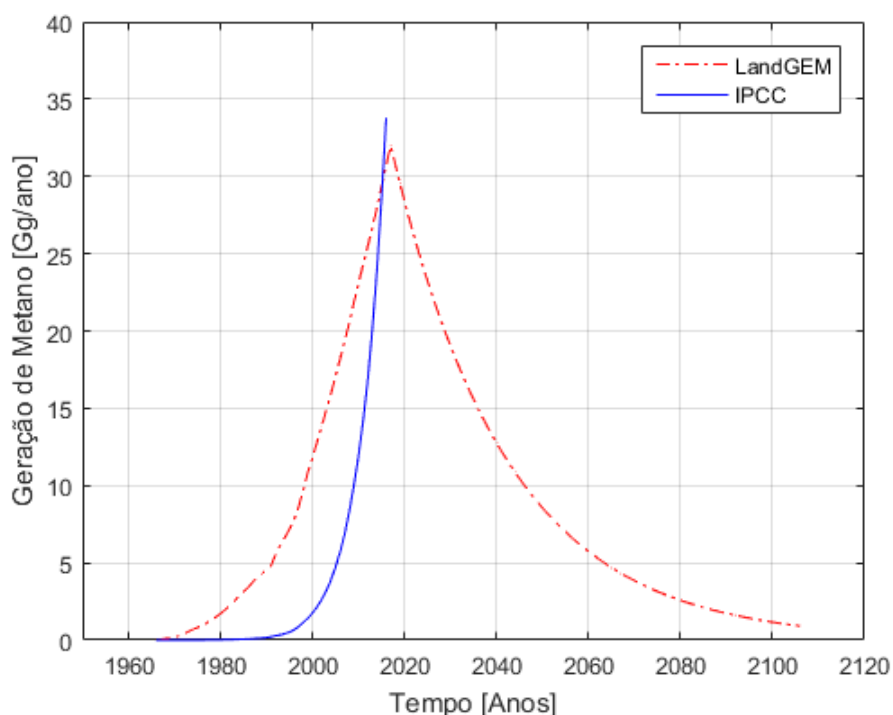


Figura 45 – Gráfico de da estimativa de geração de metano utilizando os métodos propostos pelo IPCC e pelo LandGEM.

É possível notar, analisando a Figura 45, que por meio do método proposto pelo IPCC os valores de geração de metano ao longo dos anos crescem de maneira lenta. Isso mostra que o potencial de geração de metano nos anos iniciais, segundo esse método, era pequeno e que ao longo das décadas subsequentes foi aumentando devido ao acréscimo sempre maior de resíduos no aterro. Essa análise foi realizada considerando o ano de 2016 como o ano do inventário. Sendo que para o ano em questão o valor de cerca de 34 Gg de metano foi encontrado.

Já o método landGEM apresentou resultados ligeiramente diferentes. Nesse caso a geração de metano estimada nos anos iniciais se mostrou maior quando comparada ao método proposto pelo IPCC. Quanto ao valor máximo, esse método apresentou uma quantidade de cerca de 32 Gg de CH_4 gerado, valor alcançado para o ano de 2017.

O método proposto pelo IPCC não é indicado para estimativas futuras de geração de metano. Apesar de os parâmetros utilizados no método LandGEM serem padrões, diferentemente do método proposto pelo IPCC, em que parâmetros mais próximos da realidade foram utilizados, a opção pelo método LandGEM se deu por conta da possibilidade de estimar para o futuro os valores de geração de metano. No método proposto pelo LandGEM valores padrão de taxa de geração de metano, potencial de geração de metano e a fração de metano no gás de aterro foram utilizados. Isso ocorreu devido ao fato de não se ter informações mais precisas sobre como essas constantes são utilizadas ou definidas para o modelo. Logo, a escolha foi o padrão proposto pelo USEPA para o caso de realização de inventários.

É sabido que nem todo o gás gerado ao longo dos anos no aterro pode ser utilizado ou está disponível para utilização, já que uma parcela foi perdida. Como não existe informação que permita a quantificação do gás perdido, houve a necessidade de se considerar cenários para a perda do gás para a atmosfera.

Sendo assim, é proposto um balanço de metano do aterro apresentado na Equação 6.2.

$$\frac{dS}{dt} = \text{Geração} - \text{Liberação} - \text{Uso} \quad (6.2)$$

Do presente modelo o termo de geração já foi calculado no presente trabalho e o termo de uso também é definido para manter a planta de ciclo combinado funcionando por um período de 30 anos. A proposta aqui é incluir o termo para a liberação. Como não há dados disponíveis o sugerido é considerar perdas de metano em cada um dos cenários. Para o cenário 1 a perda foi de 10% e para os demais cenários um acréscimo de 10% para cada cenário, sendo assim 20%, 30%, 40% e 50% para o último cenário. Logo o modelo é da forma apresentada na Equação 6.3.

$$\text{Liberação} = q.S \quad (6.3)$$

Onde, q é o fator que indica a porcentagem em perda, no caso em que nenhuma perda é considerada $q=0$. Para a presente modelagem é considerado $q=20\%$ (Que corresponde ao cenário 2). Esse valor foi escolhido para manter um cenário conservador, mas também levar em conta a abundância de resíduos dispostos no aterro e o potencial de geração dos mesmos. Essa escolha se deve também ao fato de que a pilha de lixo é de altura considerável e que em alguns períodos de deposição era sempre inserida uma camada de terra e realizada a compactação. Isso contribui para a premissa de que existe uma quantidade de gás confinada e que devido a essa altura, essa quantidade é considerável, admitindo-se que as camadas superiores perderam uma parcela do gás ali presente.

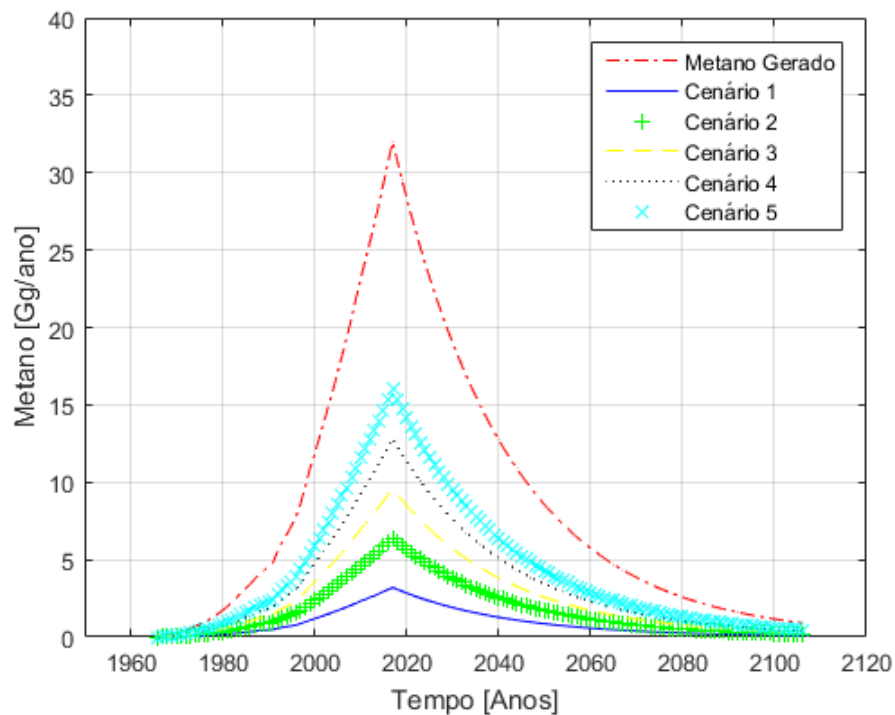


Figura 46 – Cenários adotados para análise.

Conhecendo a quantidade gerada e agora considerando as perdas ou a quantidade liberada ao longo dos anos, é possível determinar o quanto de gás disponível existe para o uso em geração de energia. Cabe, aqui, o comentário de que para a modelagem o gás começaria a ser utilizado a partir do ano de 2017 por um período de 30 anos. Estão apresentados na Figura 47 os resultados obtidos para cada uma das parcelas, incluindo a quantidade de gás Metano que seria utilizada por ano pela planta.

Com isso foi possível obter o total de gás que seria possível utilizar e somando a quantidade anual obteve-se o valor de 835,13 Gg de metano para ser queimado no ciclo combinado por 30 anos. Com esses valores disponíveis a vazão de gás necessária para a planta operar pelos 30 anos foi calculada em $0,88 \frac{Kg}{s}$ e o consumo anual de gás na turbina a gás seria de 27,84 Gg de metano.

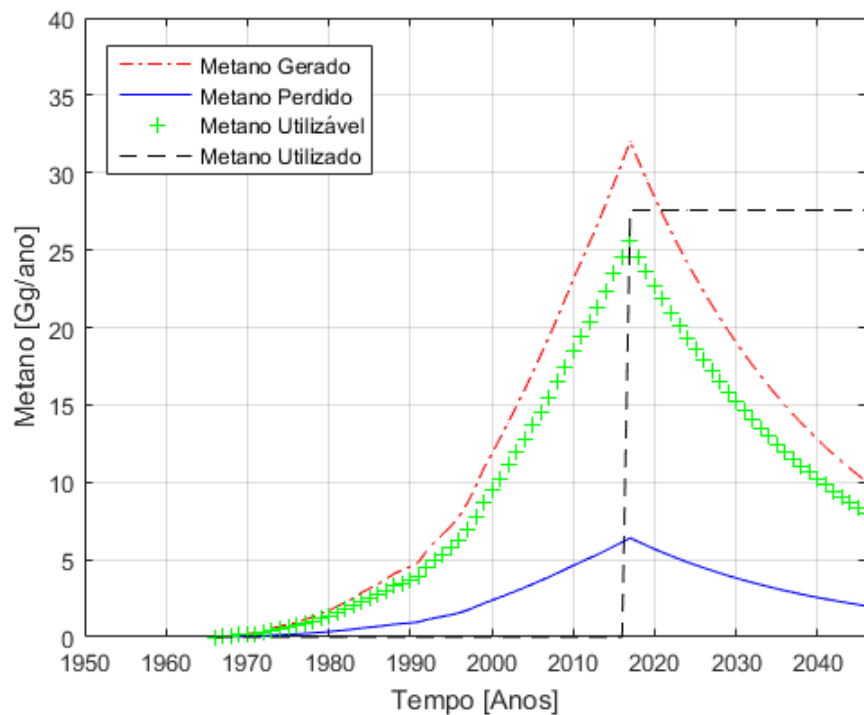


Figura 47 – Gráfico para apresentar a quantidade de metano utilizável e o metano utilizado por ano.

6.3 Geração de Energia

A geração de energia ocorre por meio do ciclo combinado Brayton e Rankine. O gás confinado no aterro é utilizado como combustível em uma câmara de combustão a qual libera os gases de exaustão para gerar energia em uma turbina a gás. A adição do campo solar permite um aumento de potência e conseqüente, maior geração de energia do que o ciclo combinado convencional. Os gráficos apresentados com respeito ao campo solar mostram o resultado de um *loop* apenas, porém é admitido que todos os loops funcionam de forma análoga. A vazão de óleo em cada um dos *loops* foi escolhida como $4,8 \frac{kg}{s}$, valor obtido pela simulações preliminares no SAM.

Os resultados são diretamente influenciados pela discretização longitudinal, representado por dx . Valores de dx muito grandes causaria perda da qualidade dos resultados. Já valores de dx menores resultaria em um resultado de melhor qualidade à custa de, um aumento significativo no tempo de processamento já que aumentaria o número de volume de controle e reduziria o passo no tempo. A Figura 48 e Figura 49 demonstram esse fato comparando o calor de saída no loop e a temperatura, respectivamente, para um dia de simulação. Para simulações subsequentes adotou-se o valor de $dx=2m$ pois, não representa uma perda significativa de qualidade do resultado e permitiu a simulação de um ciclo anual pelos computadores disponíveis para o trabalho.

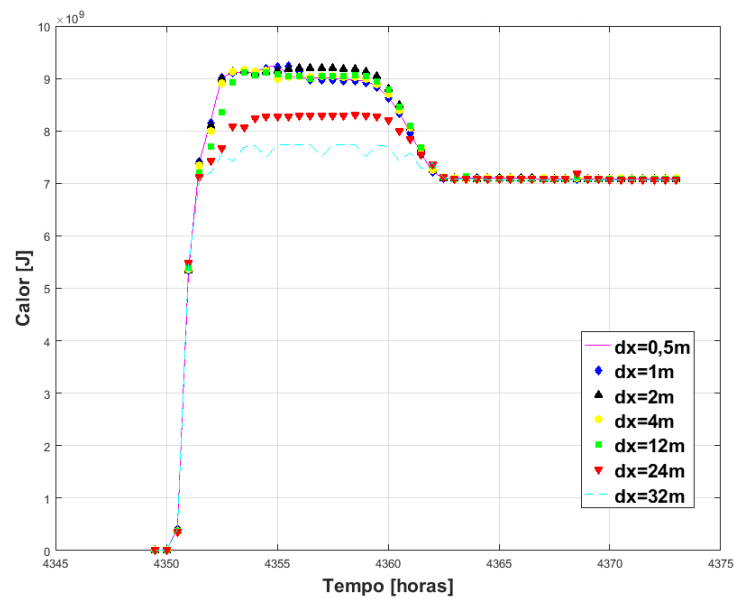


Figura 48 – Gráfico de comparação do calor na saída do *loop* para diferentes tamanhos do volume de controle.

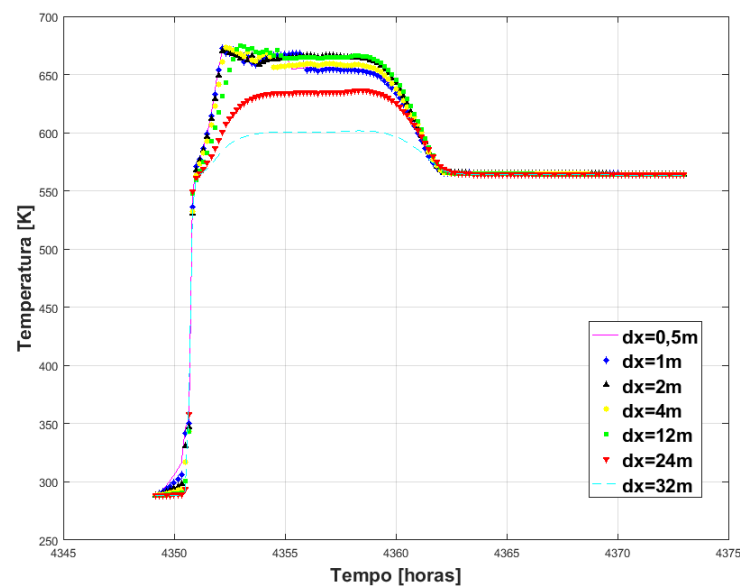


Figura 49 – Gráfico de comparação da temperatura na saída do *loop* para diferentes tamanhos do volume de controle.

Os dados de entrada para o modelo térmico do campo solar são valores horários de irradiação direta normal, irradiação global horizontal, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação térmica da atmosfera. Para simulações térmicas aqui apresentadas foram utilizados valores do ano meteorológico típico gerado pelo SAM. Uma exceção, é a radiação térmica da atmosfera em que o SAM não utiliza. Neste caso, para essa variável é utilizado um modelo proposto por Brutsaert (1975), que estima a

radiação térmica em função da temperatura e umidade relativa do ar atmosférico.

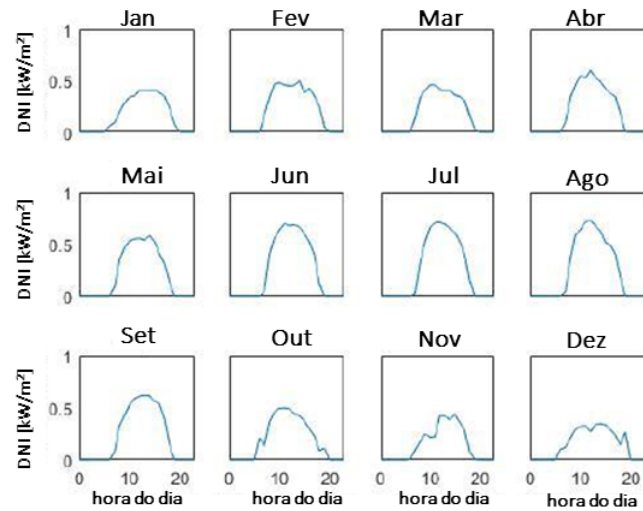


Figura 50 – Variação diurna de um dia típico em cada mês em Brasília..

É possível notar que, conforme apresentado Figura 50, o melhor período do ano para a geração é entre os meses de junho e setembro, mesmo este sendo o período de inverno.

Na Figura 51 é apresentada toda a geração de energia para a simulação de um ano inteiro de dados. Os meses que apresentaram um melhor fornecimento ou uma melhor produção de energia, uma produção mais contínua sem tantas variações mais bruscas nas quantidades de energia geradas. Vale aqui mencionar que a eficiência térmica obtida para o campo solar foi de cerca de 81%.

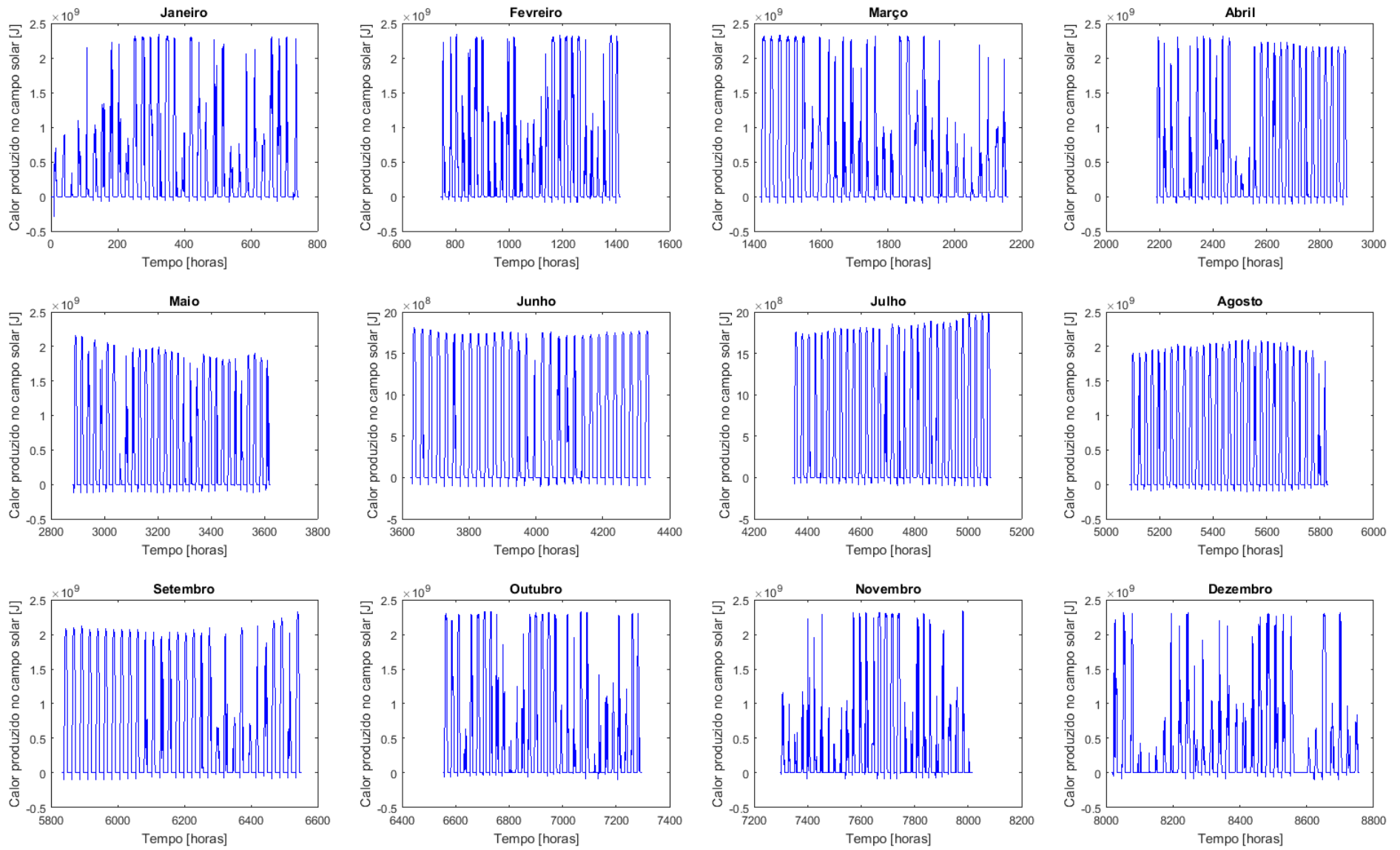


Figura 51 – Geração de calor no campo solar para cada mês do ano.

Foi então escolhido analisar o comportamento da simulação nos dias de início de cada estação do ano. Essa escolha foi feita para analisar o comportamento do campo solar para diferentes condições climáticas e quantidade de recurso solar. Na Figura 52 estão apresentadas as componentes do balanço de energia para o início de cada uma das estações do ano.

Em todas as estações nota-se uma forte influência das perdas por convecção com o ar. Sendo que são mais acentuadas no verão e no inverno. O conjunto formado pelo envelope de vidro e o tubo absorvedor também sofre alterações consideráveis por meio da inércia de cada componente.

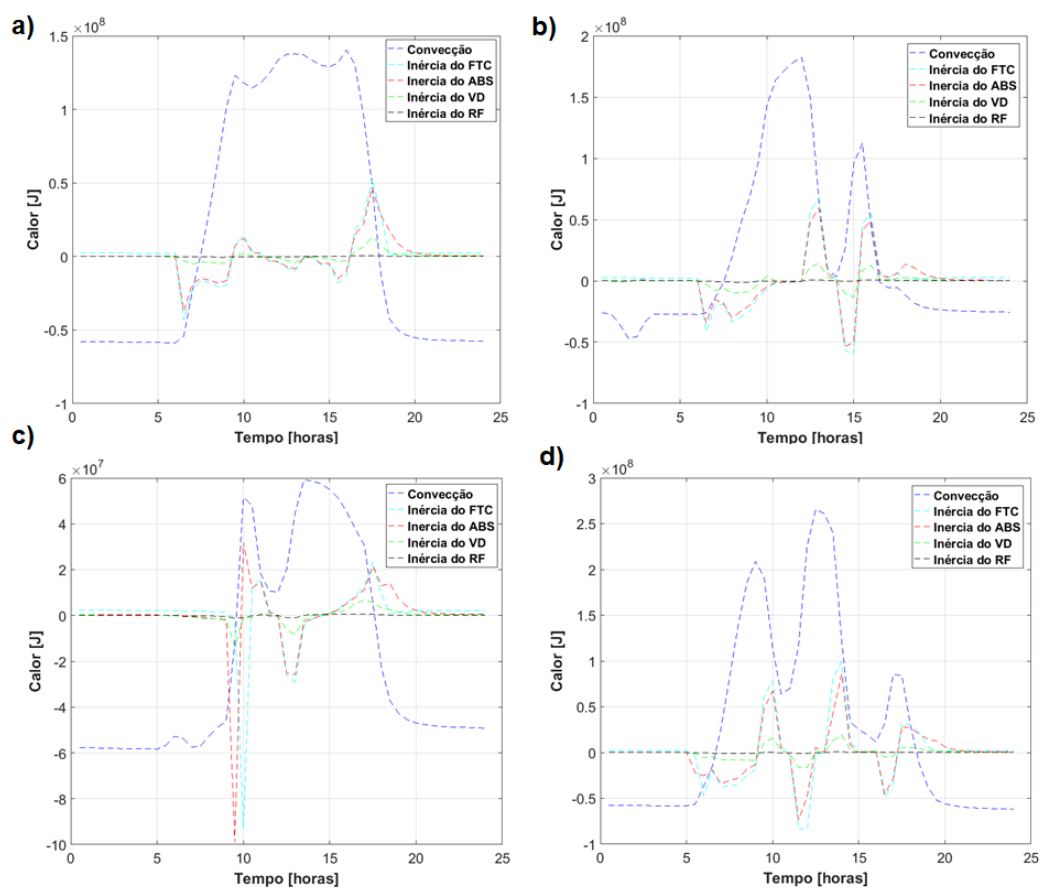


Figura 52 – Gráficos com as parcelas de perda térmicas para um dia no início de cada estação do ano. a) Outono b) Inverno c) Primavera d) Verão.

Na Figura 53 estão apresentados os resultados da geração de calor para um dia no início de cada estação do ano. É possível notar que no início do verão o campo solar consegue atingir os maiores valores de geração de calor. Apesar disso o dia no início do outono apresenta uma curva de geração mais suave.

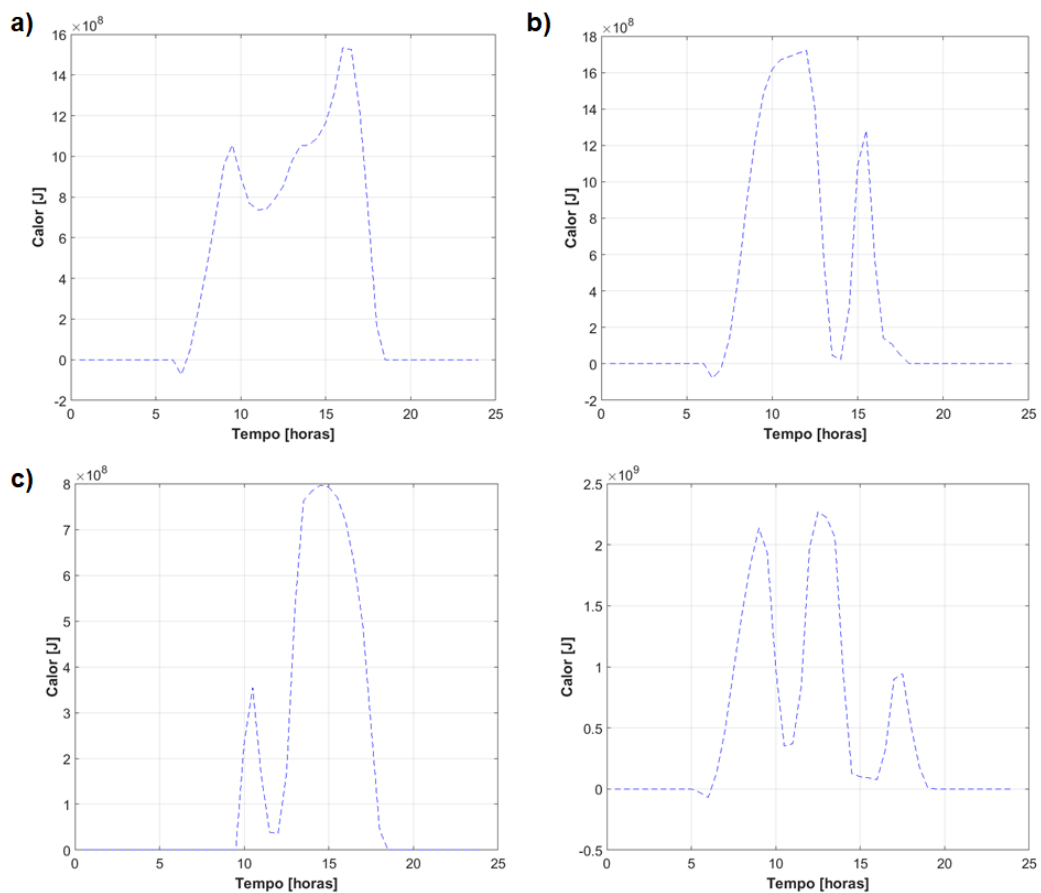


Figura 53 – a) Produção de calor para um dia inicial do Outono. b) Produção de calor para um dia inicial do inverno. c) Produção de calor para um dia inicial da Primavera. d) Produção de calor para um dia inicial do verão.

Durante a simulação a geração de energia foi mantida constante e o uso do gás no queimador auxiliar foi estimado para manter a planta funcionando nas condições de operação durante os períodos noturnos e de condições desfavoráveis durante o dia. Na Figura 54 está apresentada a contribuição do campo solar para um dia de céu claro (17 de agosto) durante o horário de inverno e na Figura 55 está apresentado o comportamento para um dia nublado (25 de março).

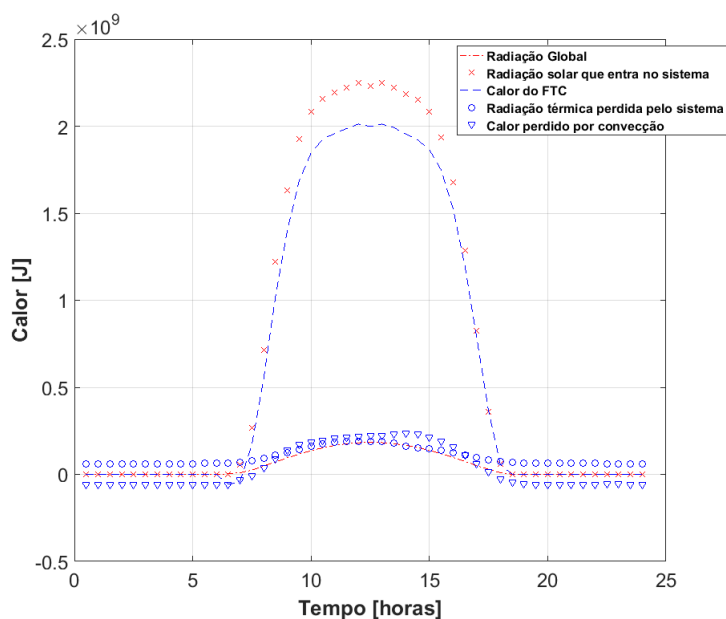


Figura 54 – Gráfico para apresentar quantidades de energia que entram e saem do sistema para o dia 17 de Agosto

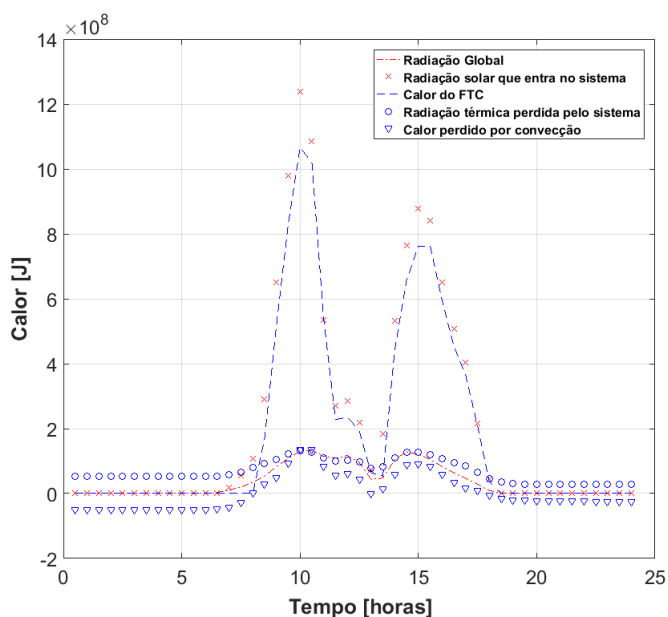


Figura 55 – Gráfico para apresentar quantidades de energia que entram e saem do sistema para o dia 25 de Março.

Por meio das figuras é possível notar que a planta, ou campo solar, funciona adequadamente para condições diversas de clima e tempo.

Na Figura 56 está apresentado o resultado da quantidade de calor fornecido pela tecnologia Linear Fresnel e pelo queimador auxiliar para cada mês do ano. É possível notar que a quantidade de calor requerida para manter a planta operando é elevada, já que a

proposta é que a mesma opere 24 horas por dia. Devido ao fato de a planta modelada não possuir armazenamento térmico, a maior quantidade de gás é utilizada no período da noite. Também se nota que no período entre os meses de maio a agosto é onde há a maior contribuição solar.

A proposta de uma planta híbrida apresentada nesse trabalho objetiva aumentar o rendimento para a mesma quantidade de metano presente no aterro. Na Tabela 12 estão apresentados os valores de energia gerada e consumida pelos componentes do sistema de geração de energia. A partir dos resultados obtidos a eficiência estimada do ciclo combinado de geração de energia é cerca de 41%. A quantidade de gás consumida pelo queimador auxiliar é 24949,18 t/ano.

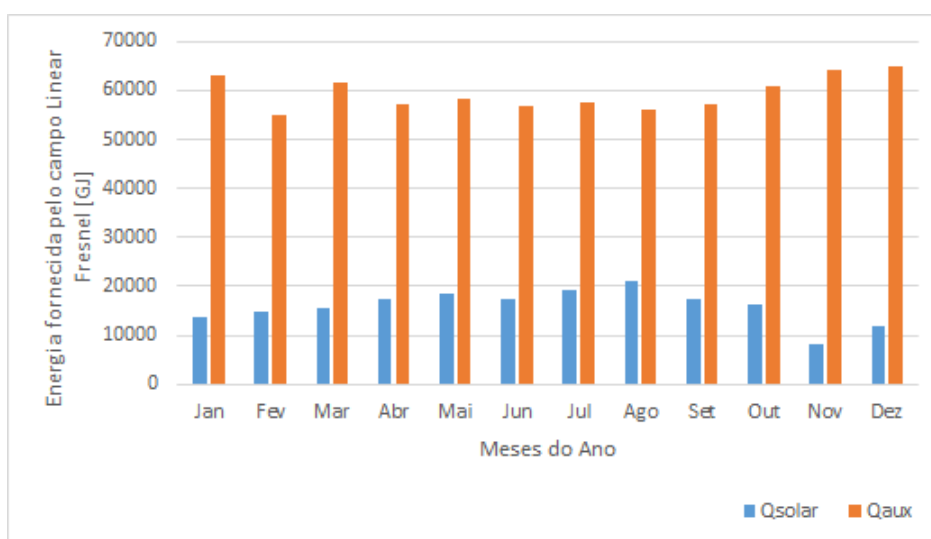


Figura 56 – Total de energia fornecida pelo sistema Linear Fresnel e o queimador auxiliar.

Por meio dos resultados obtidos é possível notar que o calor produzido pelo sistema Linear Fresnel foi responsável pela geração de cerca de 63% do calor necessário para o ciclo Rankine e cerca de 27,5% da energia total gerada do ciclo combinado. A planta de ciclo combinado ainda possui uma geração de 18,64 MW.

Outro ponto a ser discutido é o benefício ambiental que existe em se aproveitar o metano para gerar energia, já que ao queima-lo se emite o CO_2 que promove um efeito estufa muito menor. O Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês Global Warming Potential), definido como a razão entre o efeito estufa de uma massa unitária de componente qualquer e o efeito de estufa de massa unitária de CO_2 , do metano é 24 (WUEBBLES; HAYHOE, 2002). Considerando que a quantidade de metano queimado em um ano foi de $34475 \frac{t}{ano}$ e a quantidade de CO_2 emitida na queima dessa quantidade de metano foi de 94545 t/ano. Esses valores indicam que a quantidade de CO_2 -equivalente evitado na atmosfera é $732.855 \frac{t}{ano}$. Todos os resultados apresentados até aqui para o ciclo, se considerou a planta funcionando sem perdas de metano.

Tabela 12 – Quantidades de energia produzidas e consumidas pelos componentes da planta de geração.

Quantidade	Símbolo	Valor	Unidade
Energia fornecida pelo Sistema linear Fresnel	\dot{Q}_{Solar}	195519,90	GJ
Energia fornecida pelo Queimador Auxiliar	\dot{Q}_{Aux}	710323,23	GJ
Energia consumida no compressor do Gás Metano	\dot{W}_{C2}	22251,14	GJ
Energia consumida no compressor do Ar	\dot{W}_{C1}	61137,83	GJ
Energia gerada na Turbina a Gás	\dot{W}_{TG}	402046,68	GJ
Energia Consumida pela bomba do Ciclo Rankine	\dot{W}_{BR}	3376,93	GJ
Energia Consumida pela bomba do Óleo	\dot{W}_{BO}	37048,46	GJ
Energia gerada no estágio de alta pressão da Turbina a Vapor	\dot{W}_{TVAP}	109032,81	GJ
Energia gerada no estágio de baixa pressão da Turbina a Vapor	\dot{W}_{TVBP}	200597,68	GJ
Energia liberada na queima do metano no ciclo Brayton	\dot{W}_{TVBP}	533434,69	GJ

Agora são apresentados os resultados descontando os 20% de perda do gás Metano no ciclo Brayton. Para esse caso o campo solar é escolhido utilizar 16 *loops* da tecnologia Linear Fresnel. Na Figura 57 são apresentados os resultados mensais de geração de energia por meio do campo solar e do queimador auxiliar para esse caso. De forma semelhante ao caso anterior a maior produção de energia ocorre entre os meses de maio e agosto. Nesse cenário em que há menor disponibilidade de gás metano no ciclo Brayton o total de energia produzida pela planta é reduzido para 17,07 MW. A ideia é manter uma quantidade de geração semelhante ao caso anterior utilizando um campo solar menor que a primeira opção.

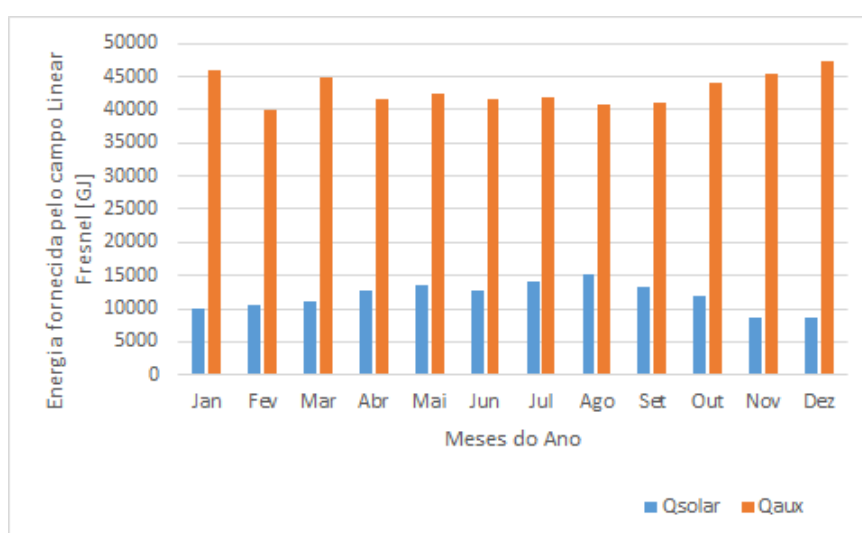


Figura 57 – Total de energia fornecida pelo sistema Linear Fresnel e o queimador auxiliar (caso com perdas do gás Metano).

Na Tabela 13 estão apresentados os valores de energia gerada e consumida pelos componentes do sistema de geração de energia. A partir desses resultados a eficiência

estimada do ciclo combinado de geração de energia é cerca de 44,6%. A quantidade de gás consumida pelo queimador auxiliar é 18138,83 t/ano. Sendo assim é possível notar que o calor produzido pelo sistema Linear Fresnel foi responsável pela geração de cerca de 63,3% do calor necessário para o ciclo Rankine e cerca de 26,5% da energia total gerada do ciclo combinado.

Tabela 13 – Quantidades de energia produzidas e consumidas pelos componentes da planta de geração (caso com perdas do gás Metano).

Quantidade	Símbolo	Valor	Unidade
Energia fornecida pelo Sistema linear Fresnel	\dot{Q}_{Solar}	142588,22	GJ
Energia fornecida pelo Queimador Auxiliar	\dot{Q}_{Aux}	516807,71	GJ
Energia consumida no compressor do Gás Metano	\dot{W}_{C2}	18912,05	GJ
Energia consumida no compressor do Ar	\dot{W}_{C1}	36354,78	GJ
Energia gerada na Turbina a Gás	\dot{W}_{TG}	312941,21	GJ
Energia Consumida pela bomba do Ciclo Rankine	\dot{W}_{BR}	2443,62	GJ
Energia Consumida pela bomba do Óleo	\dot{W}_{BO}	23320,03	GJ
Energia gerada no estágio de alta pressão da Turbina a Vapor	\dot{W}_{TVAP}	78889,56	GJ
Energia gerada no estágio de baixa pressão da Turbina a Vapor	\dot{W}_{TVBP}	146365,05	GJ
Energia liberada na queima do metano no ciclo Brayton	\dot{W}_{TVBP}	366227,92	GJ

A quantidade de metano queimada anualmente para esse cenário é de 27581,39 e a quantidade de CO_2 é de 75654,86 t/ano. Para esse caso em que uma menor quantidade de metano é utilizada devido à consideração de perdas do metano confinado no aterro. É notado a partir desse resultado que a quantidade de metano queimada é cerca de 3 vezes menor que a quantidade de CO_2 liberada, assim como no caso anterior.

7 Considerações Finais

Por meio do estudo de plantas de geração de energia solares híbridas é possível notar a importância de se estudar a viabilidade por meio da quantidade de recurso no local indicado para implantação da planta de geração. Entender a dinâmica térmica de um sistema de geração de energia que utiliza a tecnologia Linear Fresnel é também de fundamental importância. Cada parcela do balanço energético deve ser avaliada de acordo com as condições climáticas e ambientais locais. No presente trabalho notou-se uma forte influência, em alguns momentos, da componente de convecção natural que afetava de forma direta a produção de energia do campo solar. O valor de energia perdido por convecção natural em alguns dias do verão alcançou cerca de 10% do valor gerado para o mesmo período. Isso mostra a relevância de um balanço completo, que não desconsidere nenhuma parcela de imediato.

Há uma grande importância em estudar o recurso com o qual a tecnologia solar será combinada com o intuito de geração de energia. É bem verdade que há muita informação sobre a maior parte das fontes com as quais essa hibridização ocorre, porém no caso do presente trabalho o levantamento de dados foi um obstáculo razoável para a obtenção dos resultados. Apesar de existirem leis para indicar meios de gerenciamento de resíduos no Brasil, infelizmente, ainda ocorre, em alguns lugares, o descarte incorreto dos mesmos. Por meio dos métodos aplicados e utilizando uma situação hipotética de perda de gás para a atmosfera é possível afirmar que a quantidade de gás existente seria útil para geração em uma planta com vida útil de 30 anos. Aqui cabe uma ressalva que é a de que um estudo mais detalhado e um mapeamento devem ser realizados para concretizar essa afirmação, porém esse estudo não faz parte da proposta dessa pesquisa.

Os resultados apontaram que a partir da análise térmica dessa planta é possível sua implementação para suprir parte da demanda energética do Distrito Federal. As simulações realizadas demonstraram que a combinação de tecnologia solar térmica e gás extraído de um aterro para gerar energia elétrica poderia ser vantajosa e estratégica para mitigar os problemas ambientais de desmantelar aterros fechados. O campo solar aumentou a eficiência do ciclo de energia, permitindo maior energia elétrica do gás armazenado no aterro, evitando as consequências ambientais de deixar o aterro abandonado após o fechamento. A simulação ainda indicou que a utilização do metano confinado em aterros para a geração de energia minimiza impactos ambientais causados na atmosfera terrestre, já que o gás carbônico é menos nocivo que o gás metano que seria liberado. Com a inserção da componente solar, foi possível alcançar uma eficiência do ciclo combinado de cerca de 44%.

Como sugestões para próximos trabalhos são possíveis de citar: estudo de aproveitamento dos gases de exaustão tanto do ciclo Brayton quanto os do queimador auxiliar. Tal possibilidade ainda poderia contribuir para aumentar a produção de energia da planta em estudo. Estudar ou dimensionar uma planta inteira de gaseificação e produção do CDR, para melhor entender e analisar o desempenho do combustível gerado por meio dos resíduos depositados em aterros e lixões pelo Brasil. Estudar diferentes configurações de uma planta que utiliza tecnologia heliotérmica Linear Fresnel. Como houve uma certa dificuldade em levantar dados para cálculos da estimativa de metano confinado no aterro da Estrutural ou Jockey Clube, uma proposta de estimativa ou análise daquele amontoado de resíduos para uma melhor ideia dessa quantidade seria excelente na tentativa de dimensionar algo mais próximo à realidade.

Referências

- ABRELPE. Relatório, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2012*. 2013.
- ABRELPE. Relatório, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2013*. 2014.
- ABRELPE. Relatório, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2014*. 2015.
- ABRELPE. Relatório, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2015*. 2016.
- ALEXANDER, A.; BURKLIN, C.; SINGLETON, A. *Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide*. [S.l.]: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2005.
- ALMEIDA, G. S. M. *Pesquisa e desenvolvimento de um sistema termoelétrico do tipo linear fresnel reflector*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013.
- ALMEIDA, V. G. O esverdeamento da economia e os tributos verdes: um duro caminho rumo à sustentabilidade da gestão dos resíduos sólidos urbanos (rsu). 2016.
- ARAFAT, H. A.; JIJAKLI, K. Modeling and comparative assessment of municipal solid waste gasification for energy production. *Waste management*, Elsevier, v. 33, n. 8, p. 1704–1713, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação*. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
- ASTOLFI, M. et al. Technical and economical analysis of a solar–geothermal hybrid plant based on an organic rankine cycle. *Geothermics*, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 58–68, 2011.
- AZEVEDO, J. P. M. de; NASCIMENTO, R. S. do; SCHRAM, I. B. Energia eólica e os impactos ambientais: um estudo de revisão. *REVISTA UNINGÁ*, v. 51, n. 1, 2018.
- BAGHERNEJAD, A.; YAGHOUBI, M. Exergy analysis of an integrated solar combined cycle system. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 35, n. 10, p. 2157–2164, 2010.
- BARBOSA, L. Q.; BERNARDES, R. S.; BRITO, A. J. Propostas de remediação de área degradada por resíduos sólidos urbanos - estudo de caso aterro jokey club Brasília, df. In: *XXI Simpósio brasileiro de recursos hídricos. Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável: desafios do conhecimento e da gestão*. Brasília-DF: [s.n.], 2015.
- BRAKMANN, G. et al. Construction of the iscc kuraymat. In: *International SolarPACES Conference, Berlin, Sept*. Berlin: SolarPACES, 2009. p. 15–18.
- BRANCALIÃO, N. F. *Sistemas heliotérmicos: Recurso solar, tecnologia e infraestrutura*. 2015.
- BRONZATTI, F. L.; NETO, A. I. Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, v. 28, p. 13–16, 2008.
- BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 11, n. 5, p. 742–744, 1975.

- BUCK, D. R. et al. Relatório, *TOWER CSP TECHNOLOGY STATE OF THE ART AND MARKET OVERVIEW*. 2014.
- CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de köppen-geiger para o estado de goiás e o distrito federal. *Acta Geográfica*, v. 8, n. 16, p. 40–55, 2015.
- CARNEIRO, G. A. *Estudo de contaminação do lençol freático sob a área do aterro de lixo do Jockey Club-DF e suas adjacências*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília., 2002.
- CASTRO, L. C. Análise comparativa para geração de energia heliotérmica em diferentes regiões brasileiras. 2016.
- CAVALCANTI, M. M. Aplicação de métodos geoeletricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do aterro controlado do jokey clube de Brasília. 2013.
- CAVALCANTI, M. M. et al. Levantamento geofísico (eletroresistividade) nos limites do aterro controlado do jokey clube, vila estrutural, Brasília-DF. *Geociências (São Paulo)*, Geociências (São Paulo), v. 33, n. 2, p. 298–313, 2014.
- CHEREMISINOFF, N. P. *Handbook of solid waste management and waste minimization technologies*. 1. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2003.
- COCCO, D.; MIGLIARI, L.; PETROLLESE, M. A hybrid csp-cpv system for improving the dispatchability of solar power plants. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 114, p. 312–323, 2016.
- CONSONNI, S.; VIGANÒ, F. Waste gasification vs. conventional waste-to-energy: A comparative evaluation of two commercial technologies. *Waste management*, Elsevier, v. 32, n. 4, p. 653–666, 2012.
- COSTA, R. S.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Aerossóis atmosféricos e a quantificação do recurso energético solar: experimentos em modelo de transferência radiativa. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 3, n. 1, p. 62, 2017.
- COT, A. et al. Termosolar borges: a thermosolar hybrid plant with biomass. In: *Third international symposium on energy from biomass and waste*. [S.l.: s.n.], 2010.
- DERSCH, J. et al. Trough integration into power plants—a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems. *Energy*, Elsevier, v. 29, n. 5, p. 947–959, 2004.
- ENERGY, U. D. of. *SOLAR TWO TOWER SYSTEM*. 2017. Disponível em: <energy.gov>.
- FORD, G. Csp: bright future for linear fresnel technology? *Renewable Energy Focus*, Elsevier, v. 9, n. 5, p. 48–51, 2008.
- GEOSPATIALTOOLKIT. *Geospatial Toolkit*. 2005. Disponível em: <www.nrel.gov>.
- GOMES, S.; NETO, P. H. W. Potencial de recuperação de energia de resíduos sólidos domiciliares (rsd) do município de ponta grossa, pr, brasil. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 6, n. 1, p. 457–469, 2017.

- GREEN, A. et al. High capacity factor csp-pv hybrid systems. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 69, p. 2049–2059, 2015.
- GUNTHER, M. et al. Linear fresnel technology. *i Advanced CSP Teaching Materials, Enermena*, 2017.
- HÄBERLE, D. A. et al. Relatório, *FRESNEL CSP TECHNOLOGY STATE OF THE ART AND MARKET OVERVIEW*. 2014.
- HENRIQUES, R. M. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica. *Rio de Janeiro: UFRJ*, 2004.
- HLUSIAK, M. et al. Hybrid photovoltaic (pv)-concentrated solar thermal power (csp) power plants: modelling, simulation and economics. In: *Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Netherlands*. [S.l.: s.n.], 2014.
- HORN, M.; FÜHRING, H.; RHEINLÄNDER, J. Economic analysis of integrated solar combined cycle power plants: A sample case: The economic feasibility of an isccs power plant in egypt. *Energy*, Elsevier, v. 29, n. 5, p. 935–945, 2004.
- IBGE. Relatório, *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000*. 2002.
- IBGE. Relatório, *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. 2010.
- IBICT, I. B. de Informação em Ciência e T. *Energia Heliotérmica*. 2017. Disponível em: <energiaheliotermica.gov.br>.
- IEA. Relatório, *Technology Roadmap Solar Thermal Electricity*. 2014.
- IPEA. Relatório, *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos*. Brasília: [s.n.], 2012.
- JOHANSSON, T. B.; BURNHAM, L. *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. [S.l.]: Island press, 1993.
- JU, X. et al. A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (pv-csp) hybrid systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Elsevier, v. 161, p. 305–327, 2017.
- KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. *Progress in energy and combustion science*, Elsevier, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004.
- KELLY, B.; HERMANN, U.; HALE, M. Optimization studies for integrated solar combined cycle systems. *Solar Engineering*, p. 393–398, 2001.
- KOIDE, S.; BERNARDES, R. S. Contaminação do lençol freático sob a área do aterro do jockey club, distrito federal. *Águas Subterrâneas*, n. 1, 1998.
- KOLOKOTSA, D. Smart cooling systems for the urban environment. using renewable technologies to face the urban climate change. *Solar Energy*, Elsevier, 2017.
- LIMA, L. *Lixo: tratamento e biorremediação*. Hemus, 2004. ISBN 9788528901498. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=xHOumpJRU5QC>>.

- LOVEGROVE, K.; STEIN, W. *Concentrating solar power technology: principles, developments and applications*. [S.l.]: Elsevier, 2012.
- MALAGUETA, D. C. et al. Análise do uso de gás natural na hibridização de plantas termosolares (csp) na bacia do são francisco (ba). *Rio Oil and Gas 30 anos Expo and Conference*, 2012.
- MARANHÃO, D. C. Projeto e construção de um concentrador solar tipo fresnel linear. 2017.
- MARTÍNEZ, J. D. et al. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 38, n. 1, p. 1–9, 2012.
- MARTINS, A. F. et al. Caracterização dos produtos líquidos e do carvão da pirólise de serragem de eucalipto. *Química nova*, SciELO Brasil, v. 30, n. 4, p. 873, 2007.
- MARTINS, B. L. Gestão dos resíduos sólidos urbanos: análise documental e estudo comparativo entre aterro sanitário e incineração para geração de energia. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2017.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Modelo brasil-sr. 2003.
- MARTINS, F. R. et al. Mapeamento dos recursos de energia solar no brasil utilizando modelo de transferência radiativa brasil-sr. In: *Anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 8–10.
- MAZZONETTO, A. W.; FIALHO, L. Geração de energia através de resíduos sólidos na indústria de autopeças-estudo de caso. *Bioenergia em Revista: Diálogos*, p. 8, 2016.
- MCDONALD, C. F. A hybrid solar closed-cycle gas turbine combined heat and power plant concept to meet the continuous total energy needs of a small community. *Journal of heat recovery systems*, Elsevier, v. 6, n. 5, p. 399–419, 1986.
- MCTI. *Primeiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa*. São Paulo - SP, 2006.
- MCTI. *Terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa*. São Paulo - SP, 2014.
- MORAES, J. L. D. Dificuldades para o aproveitamento energético de resíduos sólidos através da incineração no brasil. *GEOSABERES-Revista de Estudos Geoeducacionais*, v. 6, n. 3, p. 173–180, 2016.
- MORAES, P. L. *USINA HÍBRIDA HELIOTÉRMICA-BIOMASSA EM CICLO RANKINE ORGÂNICO*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.
- MORIN, G. et al. Road map towards the demonstration of a linear fresnel collector using single tube receiver. 2006.
- MUNHOZ, C. B. R.; FELFILI, J. M. Fenologia do estrato herbáceo-subarbusivo de uma comunidade decampo sujo na fazenda água limpa no distrito federal, brasil. SciELO Brasil, 2005.

- NREL. *Martin Next Generation Solar Energy Center*. 2010. Disponível em: <www.nrel.gov>.
- NREL, N. R. E. L. *System Advisor Model*. 2005. Disponível em: <sam.nrel.gov>.
- OLIVEIRA, E. Menezes de; PALHETA, G. S.; SEABRA, L. B. O ensino de ciências e energias renováveis: proposta metodológica do forno solar. *Ciência e Natura*, Universidade Federal de Santa Maria, v. 39, n. 1, 2017.
- OLIVEIRA, L. B. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e abatimento de emissões de gases do efeito estufa. *Programa de Planejamento Energético/COPPE. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*, 2000.
- OLIVEIRA, L. B. Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no brasil. *Rio de Janeiro*, 2004.
- OLIVEIRA, T. A. d. S. de et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos da região de curitiba: Uma análise da viabilidade econômica à luz da teoria das opções reais. 2017.
- PAUSTIAN, K.; RAVINDRANATH, N.; AMSTEL, A. van. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. [S.l.], 2006.
- PENMAN, J. et al. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. Kanagawa, Japan, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.
- PEREIRA, E. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. INPE, 2006. ISBN 9788517000300. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=oTt0MQAACAAJ>>.
- PETERSEIM, J. H. et al. Concentrating solar power/energy from waste hybrid plants-creating synergies. *Proceedings of SolarPaces, SolarPaces*, 2012.
- PETERSEIM, J. H. et al. Concentrating solar power hybrid plants-enabling cost effective synergies. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 67, p. 178–185, 2014.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Relatório, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2014.
- POUSINHO, H. et al. Robust optimisation for self-scheduling and bidding strategies of hybrid csp-fossil power plants. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 67, p. 639–650, 2015.
- REEKEN, F. v. et al. Relatório, *PARABOLIC TROUGH CSP TECHNOLOGY STATE OF THE ART AND MARKET OVERVIEW*. 2014.
- RESTREPO, J. C. L. et al. *Avaliação de uma planta de cogeração assistida por concentradores solares do tipo linear fresnel do setor sucroalcooleiro*. Dissertação (B.S. thesis) — Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- SAMPAIO, R. P. *Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduos (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014.

- SANTANA, O.; IMAÑA-ENCINAS, J. Modelo espacial de contaminação do solo e do lençol freático do aterro do jockey club para o parque nacional de Brasília, Brasília-DF. *Cartografia Geotécnica e Geoambiental (Conhecimento do Meio Físico)* ISBN, p. 85–984506, 2004.
- SANTOS, P. *Estudo da contaminação de água subterrânea por percolado de aterro de resíduos—caso jockey club—DF*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 1996.
- SBP. *10 kw Dish/stirling EuroDish - Country reference unit*. 1980. Disponível em: <<http://www.sbp.de/en/project/10-kw-dishstirling-eurodish-country-reference-unit/>>.
- SLEDZINSKA, A. *Projects Tracker Overview | CSP Today*. 2017. Disponível em: <tracker.newenergyupdate.com>.
- SOARES, F. R. Desempenho ambiental da destinação e tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida no ctr-caieiras. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 22, n. 5, 2017.
- SOUZA, G. A. d. Estimativa da produção de biogás no antigo lixão do Itacorubi. Florianópolis. sc. 2009.
- SPLIETHOFF, H. et al. Combining energy from waste and concentrated solar power: New solutions for sustainable energy generation. 2010.
- TIBA, C.; REIS, R. J. dos; SOARES, M. A. S. Estudo de localização de centrais termoelétricas solares de grande porte no estado de Minas Gerais. *Revista Espinhaço/UFVJM*, p. 49–62, 2017.
- TOLMASQUIM, M.; (CENTER), C. *Fontes renováveis de energia no Brasil*. [S.l.]: CENERGIA, COPPE-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação em Engenharia, UFRJ-Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003. ISBN 9788571930957.
- TURCHI, C. S.; MA, Z.; ERBES, M. Gas turbine/solar parabolic trough hybrid designs. *ASME Paper No. GT2011-45184*, 2011.
- VOIGT, N. *Gestão Ambiental de Resíduos*. 1999.
- WUEBBLES, D. J.; HAYHOE, K. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, Elsevier, v. 57, n. 3-4, p. 177–210, 2002.
- ZHOU, C.; DOROODCHI, E.; MOGHTADERI, B. An in-depth assessment of hybrid solar-geothermal power generation. *Energy conversion and management*, Elsevier, v. 74, p. 88–101, 2013.
- ZHU, G. et al. History, current state, and future of linear fresnel concentrating solar collectors. *Solar Energy*, Elsevier, v. 103, p. 639–652, 2014.

Apêndices

APÊNDICE A – Resultados da Estimativa da geração de Metano pelo método IPCC

O método IPCC foi aplicado para a estimativa da quantidade de metano gerada desde do ano de 1966 onde ocorreu a abertura do lixão, até o ano de fechamento considerado nesse estudo, a saber 2016. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 14. Nessa estimativa não se levou em conta perdas nem queima do gás em *flare*. Isso se deve ao fato de não existir sistema de recuperação do gás no lixão.

Tabela 14 – Quantidade de Metano gerado anualmente estimada pelo método IPCC.

Ano	Gg
1966	0
1967	0,00020824
1968	0,000347691
1969	0,000493295
1970	0,000775469
1971	0,001282731
1972	0,002058696
1973	0,002906502
1974	0,003716074
1975	0,004775005
1976	0,006411215
1977	0,008580882
1978	0,01110599
1979	0,014332948
1980	0,018685835
1981	0,023926841
1982	0,030850954
1983	0,040248965
1984	0,049592143
1985	0,06044741
1986	0,075707213
1987	0,093647295
1988	0,110305255
1989	0,129510593

Continua.

Tabela 14 – Conclusão.

Ano	Gg
1990	0,1555112
1991	0,215177149
1992	0,27500674
1993	0,338945173
1994	0,41595719
1995	0,517152611
1996	0,66879252
1997	0,880334039
1998	1,14301013
1999	1,416946771
2000	1,751564722
2001	2,150824677
2002	2,627282494
2003	3,193184167
2004	3,887628428
2005	4,713649756
2006	5,694683727
2007	6,873979329
2008	8,312895638
2009	10,01305655
2010	11,92511569
2011	14,17076582
2012	16,8046285
2013	20,06261772
2014	23,92120542
2015	28,48570677
2016	33,78471187

APÊNDICE B – Resultados da Estimativa da geração de Metano pelo método LandGEM.

O segundo método utilizado para estimar a quantidade de gás gerada no aterro é o método *Landfill Gas Emissions Model* (LandGEM). A metodologia foi aplicada utilizando o *software LandGEM version 3.02*. A quantidade de gás gerado em cada ano foi calculada, da mesma forma que no modelo do IPCC, sem considerar perdas ou extração do gás ao longo dos anos. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Quantidade de Metano gerado anualmente pelo método LandGEM

Ano	Gg
1966	0
1967	0.027978
1968	0.098468
1969	0.150291
1970	0.194837
1971	0.272002
1972	0.393611
1973	0.553748
1974	0.698492
1975	0.809043
1976	0.933905
1977	1.10728
1978	1.305563
1979	1.498551
1980	1.710686
1981	1.960854
1982	2.215613
1983	2.509188
1984	2.859217
1985	3.134259
1986	3.402031
1987	3.74565
1988	4.085927
1989	4.318672

Continua.

Tabela 15 – Conclusão.

Ano	Gg
1990	4.542949
1991	4.827835
1992	5.561837
1993	6.148352
1994	6.654596
1995	7.176072
1996	7.788418
1997	8.647339
1998	9.720507
1999	10.86423
2000	11.8212
2001	12.82696
2002	13.84895
2003	14.88904
2004	15.94118
2005	17.06298
2006	18.20217
2007	19.35762
2008	20.55446
2009	21.8261
2010	23.10765
2011	24.29481
2012	25.48331
2013	26.67153
2014	27.98295
2015	29.31821
2016	30.6762
2017	32.0106
2018	30.75545
2019	29.54951
2020	28.39085
2021	27.27763
2022	26.20806
2023	25.18043
2024	24.19309
2025	23.24447

Continua.

Tabela 15 – Conclusão.

Ano	Gg
2026	22.33304
2027	21.45735
2028	20.61599
2029	19.80763
2030	19.03096
2031	18.28474
2032	17.56779
2033	16.87895
2034	16.21711
2035	15.58123
2036	14.97028
2037	14.38329
2038	13.81931
2039	13.27745
2040	12.75683
2041	12.25663
2042	11.77604
2043	11.3143
2044	10.87066
2045	10.44441
2046	10.03488
2047	9.641407
2048	9.263362
2049	8.900141
2050	8.551161
2051	8.215865
2052	7.893717
2053	7.5842
2054	7.286819
2055	7.001099
2056	6.726582
2057	6.462829
2058	6.209417
2059	5.965943
2060	5.732015
2061	5.507259

Continua.

Tabela 15 – Conclusão.

Ano	Gg
2062	5.291317
2063	5.083841
2064	4.884501
2065	4.692977
2066	4.508963
2067	4.332164
2068	4.162297
2069	3.999091
2070	3.842284
2071	3.691626
2072	3.546876
2073	3.407801
2074	3.274179
2075	3.145796
2076	3.022448
2077	2.903936
2078	2.790071
2079	2.680671
2080	2.57556
2081	2.474571
2082	2.377542
2083	2.284317
2084	2.194748
2085	2.10869
2086	2.026007
2087	1.946567
2088	1.870241
2089	1.796907
2090	1.72645
2091	1.658755
2092	1.593714
2093	1.531223
2094	1.471183
2095	1.413497
2096	1.358073
2097	1.304823

Continua.

Tabela 15 – Conclusão.

Ano	Gg
2098	1.25366
2099	1.204503
2100	1.157274
2101	1.111896
2102	1.068298
2103	1.02641
2104	0.986164
2105	0.947496
2106	0.910344

Anexos

ANEXO A – Dados técnicos do FTC THERMINOL[®] VP-1

Tabela 16 – Dados técnicos do FTC THERMINOL[®] VP-1

PROPRIEDADES TÍPICAS	
Aparência	Líquido branco claro
Composição	Misturas eutécticas
Temperatura máxima a granel	400 °C (750 °F)
Temperatura máxima do filme	430 °C (800 °F)
Ponto de ebulição normal	257 °C (495 °F)
Ponto de cristalização	12 °C (54 °F)
Ponto de inflamação, COC (ASTM D-92)	124 °C (255 °F)
Ponto de inflamação, PMCC (ASTM D-93)	110 °C (230 °F)
Temperatura de auto-ignição (ASTM E-659)	601 °C (1114 °F)
Temperatura de auto-ignição (DIN 51794)	621 °C (1150 °F)
Coeficiente de expansão térmica a 200 °C	0,000979 / °C (0,000544 / °F)
Calor de vaporização no máximo use a temperatura	206,0 kJ / kg (88,7 Btu / lb)
Viscosidade cinemática a 100 °C (ASTM D-445)	0,99 $\frac{mm^2}{s}$ (cSt)
Viscosidade cinemática a 40 °C (ASTM D-445)	2,48 $\frac{mm^2}{s}$ (cSt)
Densidade líquida a 15 °C (ASTM D-4052)	1068 $\frac{kg}{m^3}$ (8,91 lb / gal)
Densidade líquida a 25 °C (ASTM D-4052)	1060 $\frac{kg}{m^3}$ (8,85 lb / gal)
Acidez total (ASTM D-664)	<0,2 mg KOH / g
Peso molecular médio	166
Temperatura pseudocrítica	499 °C (930 °F)
Pressão pseudocrítica	33,1 bar (480,0 psia)
Densidade pseudocrítica	327 $\frac{kg}{m^3}$ (20,4 lb / ft ³)
Conteúdo de enxofre, ppm (ASTM D-7691)	<10 ppm
Corpo de cobre (ASTM D-130)	«1a
Teor de umidade, máximo (ASTM E-203)	300 ppm
Contração de volume após o congelamento,%	6,27%
Expansão do volume após a fusão,%	6,69%
Tensão superficial no ar a 25 °C	36,6 dynes / cm
Constante dielétrica @ 23 °C (ASTM D-924)	3.35

ANEXO B – Dados técnicos do tubo *Schott* PTR70[®]

Tabela 17 – Dados técnicos do tubo *Schott* PTR70[®]

Componentes	Especificação
Dimensão	comprimento: 4060 mm a 20 °C temperatura ambiente)
	comprimento da abertura: >96,7% do comprimento do volume
Absorvedor	diâmetro externo: 70 mm
	tipo aço: DIN 1.4541 ou similar
	absorção solar: $\alpha_{ISO} >95.5\%$ $\alpha_{ASTM} >96\%$
	emitância térmica: $\varepsilon \leq 9,5\%$
Envelope de Vidro	vidro de borossilicato
	diâmetro externo: 125 mm
	revestimento anti-reflexo
	transmitância solar: $\tau \geq 97\%$
Perdas térmicas	em conjunto com os escudos patenteados SCHOTT Solar
	<250 W/m (@ 400°C)
	<165 W/m (@ 350°C)
	<110 W/m (@ 300°C)
<70 W/m (@ 250°C)	
Vácuo	residual gas pressure: $\leq 10^{-3}$ mbar
Fluido de transferência de calor	óleo térmico não corrosivo
Pressão de operação	$\leq 41bar$ (absolute)

ANEXO C – Estados termodinâmicos para as plantas simuladas

Na Tabela 18 são apresentados os estados termodinâmicos da planta para o caso em que se considerou as perdas de gás metano na modelagem.

Tabela 18 – Estados termodinâmicos para a planta considerando perdas de gás metano

Temperatura	C	Pressão	kPa	Entalpia	kJ/kg
T_1	23,0	P_1	102,2	h_1	-19,73
T_2	418,5	P_2	1100	h_2	38,51
T_3	1000	P_3	1100	h_3	-1247
T_4	625,9	P_4	102,2	h_4	-1944
T_5	281,9	P_5	6600	h_5	2777
T_6	490,0	P_6	6600	h_6	3391
T_7	469,9	P_7	1700	h_7	3405
T_8	96,71	P_8	90	h_8	2898
T_9	96,71	P_9	90	h_9	405,2
T_{10}	97,55	P_{10}	6600	h_{10}	413,7
T_{11}	164,0	P_{11}	6600	h_{11}	696,5
T_{12}	288,0	P_{12}	3000	h_{12}	530,6
T_{13}	399,8	P_{13}	2061,2	h_{13}	802,9
T_{14}	299,0	P_{14}	2061	h_{14}	554,7
T_{15}	287,2	P_{15}	2061	h_{15}	521

Já na tabela Tabela 19 estão apresentados os estados termodinâmicos para o caso em que as perdas de gás metano são consideradas.

Tabela 19 – Estados termodinâmicos para a planta sem considerar perdas de gás metano

Temperatura	C	Pressão	kPa	Entalpia	kJ/kg
T_1	23,0	P_1	102,2	h_1	-19,73
T_2	397,9	P_2	1000	h_2	38,51
T_3	1000	P_3	1000	h_3	-1247
T_4	636,2	P_4	102,2	h_4	-1944
T_5	281,9	P_5	6600	h_5	2777
T_6	490,0	P_6	6600	h_6	3391
T_7	464,1	P_7	1700	h_7	3405
T_8	96,71	P_8	90	h_8	2898
T_9	96,71	P_9	90	h_9	405,2
T_{10}	97,55	P_{10}	6600	h_{10}	413,7
T_{11}	164,0	P_{11}	6600	h_{11}	696,5
T_{12}	288,0	P_{12}	3000	h_{12}	530,6
T_{13}	399,8	P_{13}	2061,2	h_{13}	802,9
T_{14}	299,0	P_{14}	2061	h_{14}	554,7
T_{15}	287	P_{15}	2061	h_{15}	521