UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDO DAMBRÓS DE CASTILHOS

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE POLIGERAÇÃO APLICADO A UMA UNIDADE HOSPITALAR

Recife - PE
2023

EDUARDO DAMBRÓS DE CASTILHOS

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE POLIGERAÇÃO APLICADO A UMA UNIDADE HOSPITALAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero
Coorientador: Prof. Daniel Rodríguez López

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Castilhos, Eduardo Dambrós de.
Análise de viabilidade técnica de um sistema de poligeração aplicado a uma unidade hospitalar / Eduardo Dambrós de Castilhos. - Recife, 2023.
65 p. : il., tab.

Orientador(a): Jorge Recarte Henriquez Guerrero
Cooorientador(a): Daniel Rodríguez López
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

1. Poligeração. 2. Energia solar. 3. Biogás. 4. Hospital. 5. Biomassa. I. Guerrero, Jorge Recarte Henriquez. (Orientação). II. López, Daniel Rodríguez. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP

DEMEC

ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 29.° dia do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e três, às 09:00 horas, de forma virtual através da plataforma google meet, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Análise da viabilidade técnica de um sistema de poligeração aplicado a uma unidade hospitalar**, elaborado pelo aluno **Eduardo Dambrós de Castilhos**, matrícula 20160006486, composta pelos avaliadores Prof. **Jorge Recarte Henriquez Guerrero** (orientador), Me. **Daniel Rodríguez López** (coorientador), Prof. **Flávio Augusto Bueno Figueiredo** (avaliador) e Profa. **Maria Helena de Sousa** (avaliadora). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua Aprovação, atribuindo-lhe a média 8,5 (oito vírgula cinco), julgando-o apto(X) / inapto( ) à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador:	Prof. Jorge Recarte Henriquez Guerrero	Nota: 8,5
Assinatura	_____	
Coorientador:	Me. Daniel Rodríguez López	Nota: 8,5
Assinatura	_____	
Avaliador Interno:	Prof. Flávio Augusto Bueno Figueiredo	Nota: 8,5
Assinatura	_____	
Avaliadora Externa:	Profa. Maria Helena de Sousa	Nota: 8,5
Assinatura	_____	

Recife, 29 de setembro de 2023.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, desejo agradecer a minha família por sempre me apoiar e providenciar condições plenas, apesar de todas as dificuldades, para que possa me dedicar aos estudos e as atividades deste curso. Também agradeço meus amigos e colegas de curso por todo apoio direto e indireto ao longo dessa longa e árdua jornada.

A todos os professores que contribuíram positivamente na minha trajetória acadêmica. Em especial, ao professor Jorge Guerrero por, primeiramente, me estender a chance de realizar duas iniciações científicas e pela orientação na realização deste trabalho. Nesse sentido, também agradeço Daniel López pelo auxílio adicional na execução das tarefas deste trabalho.

Agradeço aos funcionários da ACTA Elevadores por me receberem e contribuírem significativamente no meu desenvolvimento como profissional de engenharia, e possibilitar que eu pudesse estar aqui finalizando o meu ciclo acadêmico.

A todos, meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Com o aumento gradual dos efeitos das mudanças climáticas na vida humana diária, cada vez mais sociedade civil e governos buscam maneiras de conter tais impactos e evitar o agravamento da situação. Esses esforços geralmente se concentram no desenvolvimento ou aprimoramento de tecnologias já existentes a fim de reduzir a poluição atmosférica e de outros ambientes naturais. Nesse sentido, o presente trabalho busca contribuir com uma análise teórica a respeito da viabilidade técnica de se substituir o fornecimento de energia pela rede elétrica por uma geração elétrica de uma planta local. Mais especificamente, o uso de biogás, um combustível renovável e menos poluente, auxiliado por um arranjo de painéis solares para suprir a demanda energética de uma edificação de grande porte, como o Hospital das Clínicas da UFPE. A planta energética proposta é um sistema de poligeração que consiste numa unidade de geração de energia elétrica e térmica (frio e calor) formada por grupo gerador alimentado com biogás e uma planta fotovoltaica integrada a este sistema. O biogás será produzido a partir de resíduos do campus UFPE. A análise é teórica. A produção de energia elétrica e térmica do grupo gerador é avaliada utilizando um modelo de ciclo motor a gás simulado em Matlab. O sistema fotovoltaico foi simulado com o software HelioScope e a produção de frio com chiller de absorção foi avaliada com base em parâmetros de catálogo deste tipo de equipamentos. Em termos de viabilidade estritamente técnica, o estudo constatou que existe a possibilidade de tal planta de poligeração ser construída e que seria capaz de atender a todas as demandas analisadas do Hospital das Clínicas, havendo como único problema a falta de um biodigestor no campus com capacidade de produzir o volume de biogás necessário para suprir as necessidade do hospital.

Palavras-chave: Poligeração. Energia solar. Biogás. Hospital. Biomassa

ABSTRACT

With the gradual increase in the effects of climate change on daily human life, more and more civil society and governments are looking for ways to contain such impacts and prevent the situation from worsening. These efforts generally focus on developing or improving existing technologies to reduce pollution of the air and other natural environments. In this sense, the present work seeks to contribute with a theoretical analysis regarding the technical feasibility of replacing the energy supply from the electrical grid with electrical generation from a local plant. More specifically, the use of biogas, a renewable and less polluting fuel, assisted by an arrangement of solar panels to meet the energy demand of a large building, such as the Hospital das Clínicas at UFPE. The proposed energy plant is a polygeneration system that consists of an electrical and thermal energy generation unit (cold and heat) formed by a generator set fed with biogas and a photovoltaic plant integrated into this system. The biogas will be produced from waste from the UFPE campus. The analysis is theoretical. The electrical and thermal energy production of the generator set is evaluated using a gas engine cycle model simulated in Matlab. The photovoltaic system was simulated with the HelioScope software and the cold production with an absorption chiller was evaluated based on catalog parameters for this type of equipment. In terms of strictly technical feasibility, the study found that there is the possibility of such a polygeneration plant being built and that it would be capable of meeting all the analyzed demands of the Hospital das Clínicas, with the only problem being the lack of a biorefinery on the campus with capacity to produce the volume of biogas necessary to meet the hospital's needs.

Keywords: Polygeneration. Solar energy. Biogas. Hospital. Biomass

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biodigestor de domo flutuante (tipo indiano).
Figura 2 - Biodigestor de domo fixo (tipo chinês).
Figura 3 - Diagrama do ciclo produtivo do biogás.
Figura 4 - Diagrama da cogeração de ciclo de topo.
Figura 5 - Diagrama da cogeração de ciclo de base.
Figura 6 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica.
Figura 7 - Diagrama de uma instalação de painel solar ligado a rede elétrica.
Figura 8 - Configuração da planta de poligeração proposta.
Figura 9 - Funcionamento do chiller por absorção da Yazaki Inc.
Figura 10 - Visão geral de um projeto do HelioScope.
Figura 11 - Detalhamento individual de design do projeto geral do HelioScope.
Figura 12 - Desenho esquemático da planta de geração solar.
Figura 13 - Visão geral do *System Designer* do HelioScope.
Figura 14 - Aba *Mechanical* do HelioScope.
Figura 15 - Descrição detalhada do segmento de painéis solares no HelioScope.
Figura 16 - Aba *Keepout* da seção de projeto do HelioScope.
Figura 17 - Design de demonstração após a simulação do sombreamento.
Figura 18 - Hospital das Clínicas da UFPE vista por imagens de satélite do Google Earth
Figura 19 - Vista superior do Hospital das Clínicas da UFPE
Figura 20 - Planejamento dos segmentos de painéis solares sobre o Hospital das Clínicas.
Figura 21 - Visão superior do projeto da planta solar no Hospital das Clínicas.
Figura 22 - Simulação da geração anual de eletricidade da planta
Figura 23 - Resultado geral da simulação de desempenho da planta.
Figura 24 - Configuração dos painéis solares do Design 5
Figura 25- Arranjo final escolhido para a planta de poligeração.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção volumétrica de biogás em condições normais com base na biomassa.
Tabela 2 - Avaliação do potencial de energia do biogás em cada teste.
Tabela 3 - Comparação entre resultados obtidos por diferentes autores.
Tabela 4 - Indicadores do perfil de consumo mensal de um hospital do SUS.
Tabela 5 - Perfil de consumo estimado do Hospital das Clínicas da UFPE.
Tabela 6 - Dados relevantes do motor diesel (DABB-AG31) da biorrefinaria da UFPE.
Tabela 7 - Poder calorífico inferior e densidade do biogás
Tabela 8 - Resultado da simulação de desempenho do motogerador (D4BB-AG31).
Tabela 9 - Entalpia dos gases e da água para a entrada e saída do trocador de calor.
Tabela 10 - Produção de água quente a partir dos gases da exaustão.
Tabela 11 - Dados de operação do *chiller* por absorção modelo WFC-SC5.
Tabela 12 - Entalpias da água saturada fornecida ao *chiller*.
Tabela 13 - Modelo de painel solar escolhido para cada segmento da planta
Tabela 14 - Resultados da simulação de desempenho do motor.
Tabela 15 - Produção de água quente (50ºC) para a lavanderia do hospital.
Tabela 16 - Vazão de gases da exaustão alocados para cada aplicação.
Tabela 17 - Vazão de água quente destinada ao chiller por absorção.
Tabela 18 - Desempenho geral da planta de cogeração.
Tabela 19 - Resumo de desempenho das diferentes configurações de painéis solares.

LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{alim,\,méd}$	Produção de biogás específica média de alimentos	Nm^3/kg
$C_{comb,\,ar}$	Concentração de combustível na mistura ar-combustível	
$C_{e,\,vol}$	Coeficiente de geração elétrica por volume de biogás	kWh/Nm^3
C_{veg}	Produção de biogás específica de resíduos vegetais	Nm^3/kg
E_{inst}	Capacidade energética instalada do biogás	kWh
E_{total}	Capacidade energética teórica do biogás	kWh
h_{CO_2}	Entalpia do dióxido de carbono	kJ/kg
$h_{água,\,entrada}$	Entalpia da água na entrada do trocador de calor	kJ/kg
$h_{água,\,saída}$	Entalpia da água na saída do trocador de calor	kJ/kg
h_{gases}	Entalpia dos gases da exaustão	kJ/kg
$h_{gases,\,entrada}$	Entalpia dos gases na entrada do trocador de calor	kJ/kg
$h_{gases,\,saída}$	Entalpia dos gases na saída do trocador de calor	kJ/kg
h_{H_2O}	Entalpia da água	kJ/kg
h_{N_2}	Entalpia do gás nitrogênio	kJ/kg
$m_{bio,\,alim}$	Massa de sobras de alimentos	kg
$m_{bio,\,veg}$	Massa de resíduos vegetais	kg
m_{CO_2}	Massa molar do dióxido de carbono	g
m_{H_2O}	Massa molar da água	g
m_{N_2}	Massa molar do gás nitrogênio	g
$m_{produtos}$	Massa molar dos produtos da combustão	g
N_{cil}	Número de cilindros	
$Q_{massa,\,água\ quente}$	Vazão mássica de água quente	kg/s
$Q_{massa,\,gases}$	Vazão mássica de gases quentes da exaustão	kg/s

$Q_{vol,\,comb}$	Vazão de mistura combustível	m^3/min
Q_{volume}	Volume de combustível aspirado por segundo	cm^3/min
t_{func}	Tempo de funcionamento do motogerador	dias
$V_{biogás,\,alim}$	Volume de biogás a partir de sobras de alimentos	Nm^3
$V_{bio,\,inst}$	Volume de biogás produzido nas instalações atuais	Nm^3
$V_{biogás,\,veg}$	Volume de biogás a partir de resíduos vegetais	Nm^3
V_{cil}	Volume do cilindro (cilindrada)	m^3
$V_{total,\,biogás}$	Volume total de biogás disponível	Nm^3
ω_{motor}	Rotação do motor	rpm

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza e Resíduos Especiais

BEN - Balanço Energético Nacional

NOAA - Administração Nacional Oceânica e Atmosférica

PCI - Poder Calorífico Inferior

RSU - Resíduo Sólido Urbano

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SUS - Sistema Único de Saúde

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO ……...12

1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA ……12
1.2 OBJETIVOS ……13

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ……14

2.1 BIOMASSA ……14
2.1.1 Resíduos sólidos urbanos …...……..14
2.1.2 Utilização de biomassa na geração de energia……15
2.2 BIOGÁS……15
2.2.1 Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos ……..16
2.2.2 Aplicação de biogás como fonte de energia……19
2.2.3 Análise ecológica e econômica do biogás……20
2.3 COGERAÇÃO……..22
2.3.1 Configurações de uma planta de cogeração ……22
2.3.2 Principais componentes de uma planta de cogeração ……..24
2.3.3 Aplicação da cogeração e suas vantagens……24
2.4 ENERGIA SOLAR ……...25
2.4.1 Funcionamento e componentes de um painel solar fotovoltaico ……26
2.4.2 Aplicação de painéis solares fotovoltaicos ……27

3. METODOLOGIA ……...29

3.1 SISTEMA DE POLIGERAÇÃO ……29
3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS ……30
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS……31
3.3.1 Capacidade instalada do biogás ……...32
3.4 COGERAÇÃO……..33
3.4.1 Geradores e consumo de combustível……..33
3.4.2 Simulação de desempenho do motogerador……35
3.4.3 Gases quentes da combustão……37
3.4.4 Chiller por absorção ……38
3.5 PLANTA DE ENERGIA SOLAR ……41
3.5.1 HelioScope ……...41
3.5.2 Planta de energia solar no Hospital das Clínicas da UFPE……..48

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO……54

4.1 BIOGÁS E A PLANTA DE COGERAÇÃO……54
4.2 A PLANTA DE ENERGIA SOLAR ……56
4.3 CONFIGURAÇÃO DA POLIGERAÇÃO……...57
4.3.1 Outras configurações possíveis……58

5. CONCLUSÃO ……60
5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS ……60

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a sociedade passou a reconhecer que as mudanças climáticas representam uma das maiores ameaças globais enfrentadas atualmente, com impactos potencialmente irreversíveis aos biomas e à própria existência humana. A compreensão geral é de que as atividades humanas, especialmente a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, frutos de um desenvolvimento industrial acelerado sem os devidos cuidados quanto aos seus impactos, estão contribuindo significativamente para o aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera e para o aquecimento global. Observações de 2022 da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA, sigla em inglês) mostram que a concentração do principal gás de efeito estufa, o dióxido de carbono, aumenta todos os anos desde o começo dos levantamentos.

Com a compreensão da real gravidade das mudanças climáticas, houve um aumento em ações por parte da sociedade civil e estados em trazer ao discurso público a importância da implementação de políticas ambientais para frear a mudança climática e seus consequentes impactos na vida humana. Nesse sentido, as ações governamentais e de entidades da sociedade civil, têm se voltado para o desenvolvimento de novas tecnologias ou o reaproveitamento de técnicas e processos já desenvolvidos de maneira a torná-los mais eficientes e menos poluentes.

Dentre as principais frentes do desenvolvimento tecnológico e científico, está a busca por formas alternativas de geração de energia que contribuam menos com a emissão de gases de efeito estufa, nem com ciclos produtivos que destroem o meio ambiente terrestre e aquático. Isso tanto para o âmbito das matrizes energéticas de escala nacional, como usinas e plantas de energia, quanto para produção de energia mais localizada para médias e grandes edificações ou instalações. O que geralmente passa pelo desenvolvimento de tecnologias de geração de energia de fonte renovável, como células fotovoltaicas e turbinas eólicas, ou uso de biocombustíveis como o etanol, o biodiesel ou o biogás.

1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

Para fins deste presente trabalho, o interesse é tentar contribuir no desenvolvimento de alternativas sustentáveis dentro das limitações e especificidades da realidade brasileira. Com isso em mente, um dos grandes desafios enfrentados é a coleta e tratamento de resíduos

sólidos urbanos (RSU) que no Brasil, de acordo com o Panorama 2022 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), totaliza mais de 80 milhões de toneladas todos os anos. Desse total, aproximadamente metade são resíduos orgânicos, que poderiam ser reutilizados, por exemplo, para a produção de biocombustíveis.

Ainda de acordo com a Abrelpe (2022), 42% dos municípios nordestinos sequer fazem coleta seletiva do lixo para reciclagem ou reutilização. Portanto, é interessante que se encontre alguma maneira barata e eficaz de utilizar todos esses resíduos para fins ecológicos e socioeconômicos.

Uma das formas de aproveitar essa biomassa, seria no processo de fabricação de biocombustíveis, como o biogás. Dessa forma, levando em consideração o intuito do trabalho em realizar um estudo de caso de uma planta de poligeração de energia para o Hospital das Clínicas da UFPE, em que se torna interessante a análise técnica a partir da utilização da biomassa para a produção de biogás.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse projeto é analisar numericamente a viabilidade técnica da instalação de uma planta de poligeração com biogás e painéis fotovoltaicos aplicada ao setor de serviços (Hospital das Clínicas UFPE) para atender demandas de energia elétrica e térmicas. Entre os objetivos específicos tem-se:

- Estudar o uso do biogás em grupos geradores para produção de energia elétrica e avaliar o potencial da energia térmica residual;
- Avaliar a produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos;
- Definir um sistema de poligeração baseado nas demandas de energia elétrica e térmica de uma unidade hospitalar (Hospital das Clínicas da UFPE) e do uso de biogás e energia solar fotovoltaica para atender essas demandas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é explicado todo o arcabouço teórico necessário para o entendimento do projeto, assim como a motivação por trás das decisões tomadas na delimitação do escopo do trabalho. Para isso, serão definidos em detalhes nas seções seguintes os principais objetos e processos utilizados na realização dessa pesquisa, assim como a explanação de outros trabalhos científicos realizados pertinentes para os objetivos desse projeto.

2.1 BIOMASSA

Biomassa é um termo utilizado para descrever a matéria orgânica de origem vegetal, animal ou microbiana que pode ser utilizada como fonte de energia. Essa matéria orgânica pode incluir resíduos agrícolas, restos de culturas, resíduos de madeira, esterco animal, resíduos de alimentos, algas e outros materiais biodegradáveis.

2.1.1 Resíduos sólidos urbanos

Como já citado anteriormente, pelo levantamento da Abrelpe (2022), mais de 80 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos são gerados anualmente no Brasil, dos quais 45-50% desse são resíduos orgânicos. Apesar do grande volume de lixo, esse número coloca o Brasil num patamar apenas intermediário na produção de resíduos sólidos per capita na esfera global, ficando atrás dos países mais ricos e industrializados, como mostra o estudo do *World Bank*, *"What a Waste 2.0"* (2018).

O problema particular do Brasil, em relação aos demais países estudados, está mais na forma como esses rejeitos são tratados do que na quantidade em massa em si. Apesar da cobertura dos serviços de coleta domiciliar de resíduos sólidos no Brasil ser relativamente alta, em média 92,9% da população tem acesso a algum tipo de serviço de coleta (SNIS 2018), somente 56% dos municípios possuem algum tipo de coleta seletiva. Além disso, apenas cerca de 2,2% desse total de resíduos sólidos coletados é reaproveitado de alguma maneira, sendo o valor específico para resíduos sólidos orgânico, a biomassa, ainda mais baixo, sendo próximo de 1% (SNIS 2018)

Dessa maneira, muito do custo material e logístico utilizado para a coleta seletiva é direcionado para levar esses rejeitos a aterros sanitários, nos quais, ainda de acordo com o

SNIS (2018), quase 30% dos resíduos sólidos depositados não são devidamente descartados sob as normas sanitárias e ambientais, mesmo estando em aterros sanitários.

2.1.2 Utilização de biomassa na geração de energia

Dentre as múltiplas formas que a biomassa pode ser utilizada para a geração de energia, destacam-se a seguir quatro das principais:

- Combustão direta: A biomassa pode ser usada diretamente como combustível sólido para produção de energia. Isso pode ser feito em caldeiras ou fornos especiais, nos quais a biomassa é queimada para a geração de vapor quente, que pode ser utilizado para diversos fins, tais como a produção de eletricidade através do acionamento de uma turbina a vapor ligada a um gerador. Também pode ser usado para fornecer vapor quente a um chiller por absorção, como será visto mais adiante.
- Gaseificação: A gaseificação da biomassa é um processo termoquímico que transforma a matéria orgânica em um gás combustível chamado de gás de síntese ou gás de gaseificação.
- Digestão anaeróbia (ou biogasificação): A digestão anaeróbica é um conjunto de processos biológicos no qual a matéria orgânica é decomposta por bactérias em um ambiente sem oxigênio. Esse processo resulta no biogás, que é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) e pode ser utilizado, por exemplo, para a geração eletricidade, de maneira semelhante ao gás síntese.
- Produção de biocombustíveis: A biomassa também pode ser convertida em biocombustíveis líquidos, como o etanol e o biodiesel. O etanol é produzido a partir da fermentação da biomassa rica em açúcares, enquanto o biodiesel é produzido por meio da transesterificação de óleos vegetais ou gorduras animais.

2.2 BIOGÁS

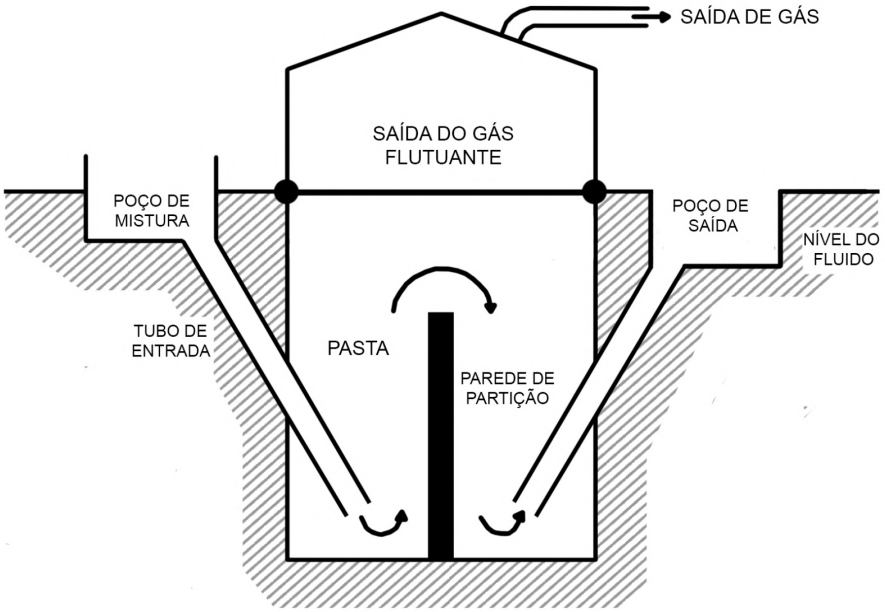
Dentre as diferentes aplicações da biomassa na produção dos chamados biocombustíveis, destaca-se o biogás, que é objeto deste presente estudo. Nesta seção, será avaliada a sua aplicação, vantagens e limitações dentro do contexto do estudo de caso como um combustível economicamente e tecnicamente viável.

2.2.1 Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos

Como parte nos esforços de se desenvolver maneiras alternativas e econômicas de gerar energia térmica e elétrica para cidadão de países em desenvolvimento, Surendra et. al (2014) analisaram a produção de biogás local através de biodigestores para a geração de energia elétrica em zonas rurais que não tenham conexão à rede elétrica. O estudo se concentra em analisar, primeiramente, a dependência em fontes de energia local, principalmente combustíveis sólidos como a madeira ou outros materiais combustíveis, que são usados para cozinhar e para o aquecimento domiciliar. O problema dessa queima direta dos combustíveis sólidos, como o mesmo estudo mostra, é o impacto na saúde humana, que pode desenvolver diversos problemas respiratórios devido à exposição à fumaça.

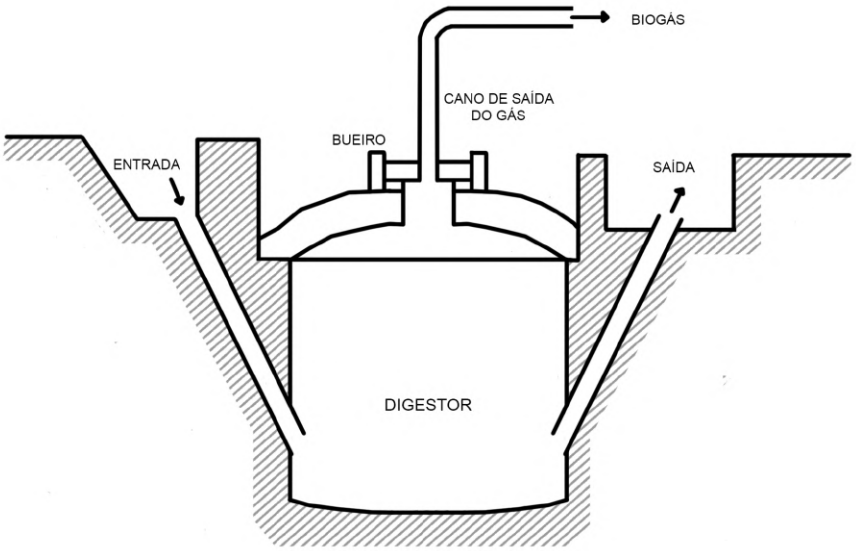
Dessa forma, torna-se crucial a análise e implementação de métodos de aproveitamento energético da matéria orgânica disponível localmente, sem expor a população diretamente a esses gases tóxicos da combustão. Nesse sentido, os autores propõem o uso de biodigestores de tecnologia comumente encontrada em países em desenvolvimento para o processamento desse material orgânico na produção de biogás. As figuras 1 e 2 mostram duas instalações diferentes de biodigestores, uma de construção indiana e outra chinesa.

Figura 1- Biodigestor de domo flutuante (tipo indiano).



Fonte: Adaptado de Surendra et. al (2014)

Figura 2- Biodigestor de domo fixo (tipo chinês).



Fonte: Adaptado de Surendra et. al (2014).

O estudo ainda provê um compilado de estimativas do volume, em condições normais de temperatura e pressão (25°C e 1 atm), de biogás produzido por quilo a partir do tipo de material orgânico utilizado. Uma seleção de algum desses dados estão expostos na tabela 1

Tabela 1 - Produção volumétrica de biogás em condições normais com base na biomassa.

Tipo de biomassa	Produção de biogás específica (Nm^3/kg)
Estrume de gado	0,2 - 0,3
Resíduos de abatedouro	0,3 - 0,7
Resíduos vegetais	0,4
Melaços	0,3 - 0,7
Sobras de alimentos	0,4 - 1,0
Resíduos sólidos urbanos (Porção orgânica)	0,1 - 0,93

Fonte: Adaptado de Surendra et. al (2014).

Dalpaz (2019) realizou alguns testes empíricos para determinar o potencial de geração de eletricidade e energia térmica do biogás a depender de sua concentração de metano (CH_4). Para tanto, foi utilizado uma instalação com um motor a combustão apropriado para utilizar o biogás, acoplado a um gerador que seria analisado para checar a capacidade de geração de eletricidade do biogás, assim como um trocador de calor junto ao exaustor por onde os gases

quentes da combustão eram expelido para medir a energia térmica aproveitável. O resultado desse estudo está exposto na tabela 2.

Tabela 2: Avaliação do potencial de energia do biogás em cada teste.

	CH_4(%)	Potencial energético do biogás (KWh/m^3)	Energia elétrica (KWh/m^3)	Energia térmica (KWh/m^3)	Energia total (KWh/m^3)	Eficiência Energética (%)
Teste 1	68,54	6,20	2,04	1,15	3,19	51,45
Teste 2	83,46	9,34	3,21	1,57	4,78	51,18
Teste 3	92,33	9,71	3,57	1,67	5,24	53,97

Fonte: Adaptado de Dalpaz (2019).

Nota-se a partir da tabela 2 que o potencial energético do biogás aumenta à medida que a concentração do metano aumenta, o que já era esperado uma vez que o metano é a parcela combustível do biogás, a contrário do dióxido de carbono, gás nitrogênio, entre outros compostos de baixo potencial energético. Adicionalmente aos resultados apresentados na tabela 2, Dalpaz (2019) ainda realizou um levantamento de resultados de outras pesquisas semelhantes como forma de verificar a acurácia dos resultados obtidos. Alguns dos dados desse levantamento são apresentados na tabela 3, em que é possível perceber uma certa variação no potencial energético do biogás mesmo em amostras com o mesmo de teor de CH_4

Tabela 3 - Comparação entre resultados obtidos por diferentes autores.

Autor	Teor de CH_4 (%)	Geração de energia elétrica (KWh/m^3)
Santos (2013)	60	1,30
Yingjian (2014)	71	2,00
Coser et al. (2015)	60	1,54
Coser et al. (2015)	75	2,85
Coser et al. (2015)	60	1,28
Coser et al. (2015)	75	3,20
Mello (2018)	65	1,44
Mello (2018)	50	1,43
Mello (2018)	53	1,45
Mello (2018)	50	1,44

Fonte: Adaptado de Dalpaz (2019).

2.2.2 Aplicação de biogás como fonte de energia

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) 2022, com uma queda na geração de energia hidrelétrica em termo de GWh nos últimos anos, as demandas energéticas foram supridas com um aumento no uso de gás natural, em relação anos anteriores, além de um crescimento no uso de derivados do petróleo (para além dos combustíveis líquidos já comumente usados). Apesar de no mesmo período avaliado ter aumentado, na mesma escala, o uso de energia eólica, uma fonte de energia limpa e renovável. O aumento no uso de combustíveis gasosos não renováveis e altamente poluentes poderia ser evitado com a devida adaptação do sistema energético para utilizar biogás, ao invés do gás natural, por exemplo.

Nesse mesmo balanço, foi mostrado que diversos estados brasileiros, principalmente regiões com grande produção agrícola ou produção de resíduos sólidos urbanos, possuem uma capacidade instalada energética de biogás que poderia ser mais bem explorada. Uma das maneiras mais econômicas de se fazer essa transição entre combustíveis gasosos, quando a troca da instalação ou dos principais componentes é custosa demais, seria a adaptação para uso combinado de dois ou mais combustíveis, assim diminuindo o uso de gás natural em detrimento do uso de biogás. Xiang et. al (2019) analisaram a intercambiabilidade entre múltiplas fontes de energia, desde o uso conjunto de motores a diesel com injeção de gás, até a troca total desses por motores a combustíveis gasosos somente. Dessa maneira, o estudo verificou a possibilidade na troca da matriz energética de diversos maquinários por combustíveis gasosos, como o biogás sem grandes perdas na performance, ou na quantidade de emissão liberada durante a combustão.

Para além da aplicação do biogás como gás auxiliar na combustão de motores comumente utilizados com combustíveis líquidos, Hakawati et. al (2017) analisaram não somente motores veiculares, mas também outras possíveis áreas em que o biogás poderia ser aplicado e qual delas o seu uso seria mais efetivo. Ao fim das simulações computacionais para a análise de desempenho do biogás em diversas situações, verificou-se que a máxima eficiência para o seu uso é em um sistema de cogeração de energia elétrica e térmica, em que o grupo de motores usam o biogás para acionar geradores elétricos e os gases quentes da combustão são reaproveitados para aquecer água ou cômodos.

Aprofundando na análise do biogás como fonte de energia em sistemas de geração de energia, Villa et. al (2011) analisaram a eficiência energética e ecológica do biogás em plantas

de cogeração. Apesar de em certos aspectos o biogás mostrou-se inferior ao gás natural, como a eficiência ecológica e a temperatura dos gases de exaustão, devido ao seu menor poder calorífico, verificou-se a capacidade de se utilizar o biogás como um combustível alternativo em sistemas de cogeração sem grandes perdas energéticas. Ainda, o uso de biogás representou uma redução na emissão de dióxido de carbono e metano em relação à potência gerada, principalmente comparado a combustíveis fósseis convencionais.

2.2.3 Análise ecológica e econômica do biogás

Além do que já foi previamente discutido, é importante ressaltar que as análises técnicas do biogás realizadas nos trabalhos supracitados foram feitas somente no momento da combustão dos gases na planta de cogeração ou motor veicular, ou seja, não foi feito um estudo do ciclo produtivo completo dos combustíveis. A produção do biogás se utiliza da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos oriundos de outros ciclos econômicos já existentes, ou seja, o biogás é uma forma de subproduto reaproveitado de outra atividade agrícola ou pecuária já estabelecida. Dessa maneira, é necessário mais estudos que analisem o ciclo produtivo do biogás como um todo e seus impactos no meio ambiente e na vida humana.

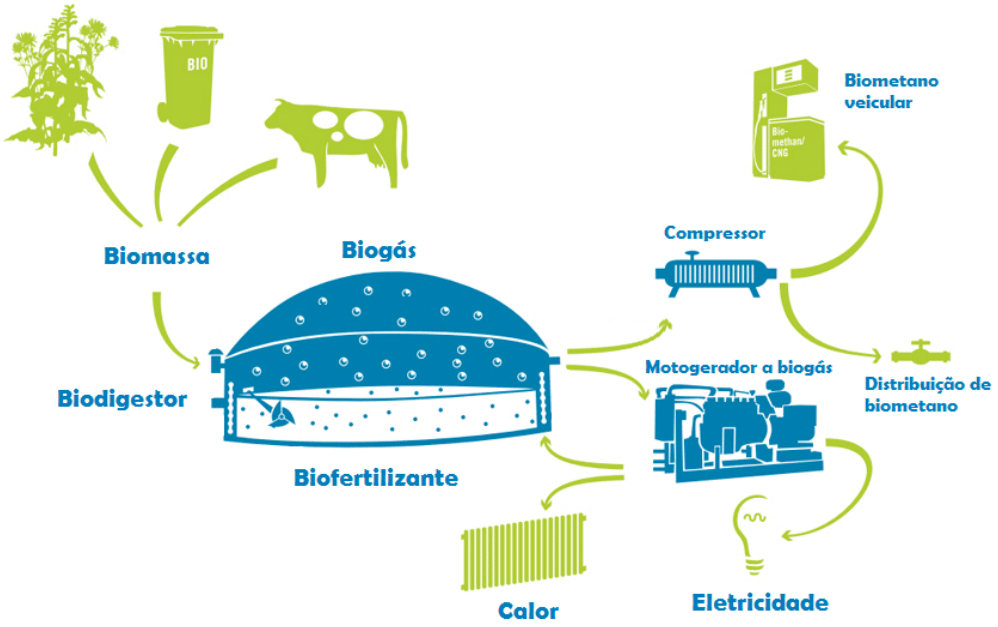
Hijazi et. al (2015) analisaram diferentes maneiras de se produzir, distribuir e utilizar o biogás e os diferentes impactos que cada uma dessas etapas podem causar. Idealmente, como o estudo sugere, o biogás apresenta maiores vantagens quando produzido localmente onde será utilizado, uma vez que isso não somente poupa financeiramente e logisticamente o consumidor do transporte do biogás, mas também reduz as emissões do ciclo produtivo causados pela combustão dos veículos transportadores. Para além disso, a natureza da matéria orgânica, origem animal ou vegetal por exemplo, também influencia consideravelmente nos impactos ambientais e emissões. No entanto, o estudo verificou que a produção do biogás é menos impactante do que os ciclos convencionais de extração e refino de combustíveis fósseis, como o petróleo.

Enquanto isso, o gás natural, combustível gasoso cuja aplicação se assemelha a do biogás, é um combustível fóssil não renovável, cujo ciclo produtivo baseia-se na perfuração do solo para a extração do gás de depósitos subterrâneos de material orgânico fossilizado. Notoriamente, um dos processos utilizados para a extração de gás natural em reservatórios continentais é o fraturamento hidráulico, técnica baseada na injeção em alta pressão de uma mistura de água e diversos produtos químicos para facilitar a extração de óleo e gás do

subsolo. Os impactos no meio ambiente e na saúde humana das regiões afetadas são diversos. Estudos como o de Meng (2017), mostram uma extensa poluição de reservatórios de água subterrâneos com os produtos químicos que os tornam inutilizáveis para o consumo humano.

A figuras 3 mostra o ciclo produtivo do biogás desde a biomassa aos diferentes usos da mesma, corroborando com a importância de se analisar o ciclo por completo quando se quer verificar a opção combustível mais ecologicamente sustentável em termos de emissão e poluição em geral.

Figura 3 - Diagrama do ciclo produtivo do biogás.



Fonte: Engenharia 360, 2022.

Para além da análise ecológica, é interessante analisar o desempenho econômico do biogás na geração de energia. Nesse sentido, Cervi et. al (2011) analisaram a viabilidade técnica e econômica do uso de biogás como fonte renovável de energia para propriedades rurais, com um estudo de caso numa propriedade rural de São Paulo que cultiva café e cria galinhas, porcos e bovinos em menor escala.

Utilizando somente a biomassa local da propriedade para abastecer o biodigestor que estava conectado diretamente com o grupo de geradores elétricos, verificou-se uma produção de energia excedente à demanda local, suprindo totalmente a demanda energética da propriedade, mas acarretando custos de manutenção, além de troca e instalação dos equipamentos. Ao fim do estudo, a produção de eletricidade por meio dos biodigestores locais

gerou prejuízos, tendo custos de manutenção mais altos do que a economia com energia, propondo que a instalação só vale a pena economicamente para propriedades com um consumo de energia elétrica maior. Destacando-se assim a importância do cálculo econômico e do dimensionamento apropriado da planta para conferir benefícios para as comunidades usuárias dessa instalação de biodigestores.

2.3 COGERAÇÃO

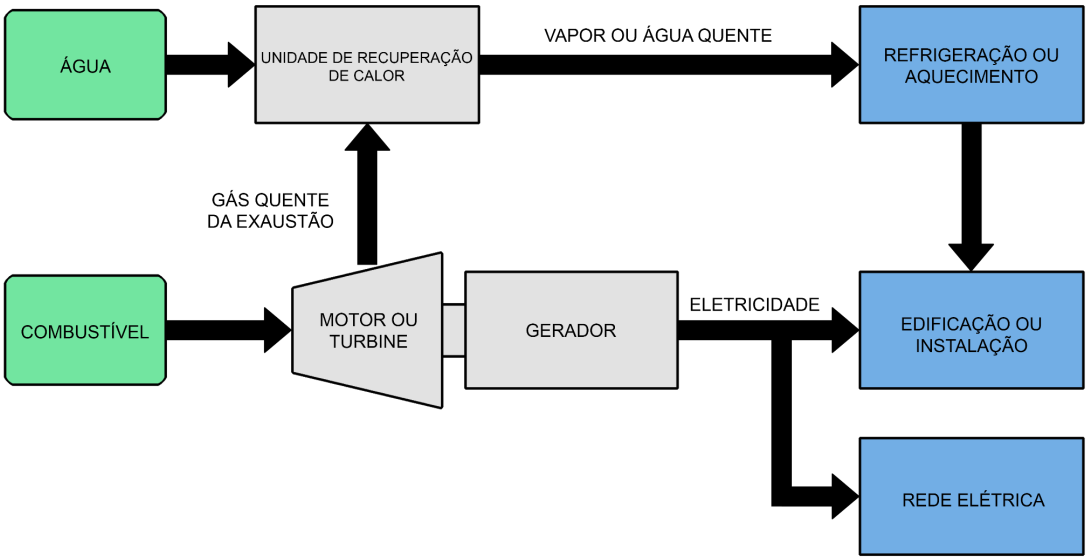
Pode-se definir cogeração como o processo de geração de duas formas de energia, mais comumente a eletricidade e a energia térmica, de forma a aproveitar o máximo possível a matéria combustível em uso. Geralmente emprega um sistema conjunto de motor e gerador, onde o motor é abastecido com algum tipo de mistura combustível, seja sólido, líquido ou gasoso, que fornece potência mecânica a um gerador elétrico. Enquanto utiliza os gases quentes da exaustão para fornecer energia térmica útil a alguma outra finalidade, como aquecer água ou prover calor a um *chiller* por absorção.

A planta de cogeração pode ser usada como única fonte de energia elétrica e térmica de uma determinada edificação, como já foi constatado anteriormente no estudo conduzido por Cervi et. al (2011), em que se avaliaram a viabilidade técnica e econômica da poligeração para uma propriedade rural. Porém, também pode ser usada como fornecimento auxiliar ou emergencial para grandes edificações em que se avalia mais sustentável um modelo híbrido de fornecimento de energia. Ainda, a planta de poligeração pode trabalhar em paralelo com outras formas de geração de energia, como células fotovoltaicas, que são outro objeto de análise do presente trabalho.

2.3.1 Configurações de uma planta de cogeração

Existem basicamente dois tipos de configurações, ciclos de topo e de base. No primeiro caso, o processo começa com a queima de um combustível, em um motor de combustão interna ou em uma turbina a gás. Esse processo, por sua vez, aciona um gerador convertendo a energia mecânica do eixo do motor em eletricidade primariamente. O restante da energia da combustão, em forma de calor, é expelida pelo exaustor onde é reaproveitado para, por exemplo, aquecer água. Esse processo usa a energia diretamente extraída do combustível para produção de eletricidade, a figura 4 apresenta um diagrama.

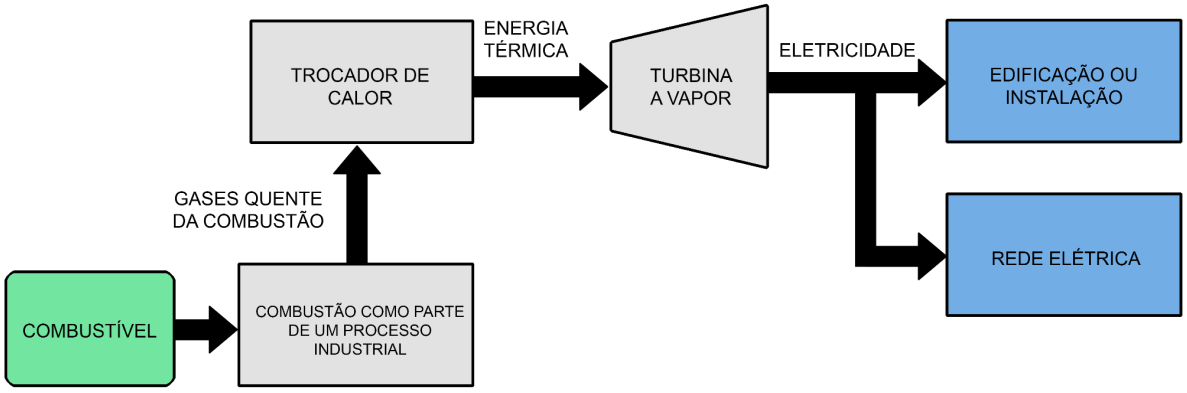
Figura 4 - Diagrama da cogeração de ciclo de topo.



Fonte: o próprio autor.

O ciclo de base, por outro lado, utiliza o combustível primariamente para entregar energia térmica a algum processo industrial ou semelhante, como caldeiras. Com o calor remanescente dessa atividade, através de um trocador de calor, é fornecido vapor de água quente para acionar uma turbina para a produção de eletricidade. Assim, o ciclo base é aquele em que a energia do combustível é diretamente usada para geração de energia térmica, e a eletricidade torna-se secundária. A figura 5 mostra a configuração desse ciclo

Figura 5 - Diagrama de cogeração de ciclo de base.



Fonte: o próprio autor.

2.3.2 Principais componentes de uma planta de cogeração

As plantas de cogeração podem ter diversas configurações e finalidades para além das supracitadas, mas a título de simplificar o entendimento básico de uma planta de cogeração. Pode-se dizer que os componentes principais são:

- Motor à combustão interna: Motor de ciclo Otto convencional que é abastecido com combustível líquido ou gasoso para a transmissão de energia mecânica através do seu eixo para um gerador acoplado. Pode ser substituído por uma turbina a vapor a depender da aplicação.
- Gerador elétrico: Gerador acoplado ao eixo do motor usado para a conversão da energia mecânica em eletricidade. Também está conectado ou a alguma instalação para abastecimento direto ou a rede elétrica local.
- Unidade de recuperação de calor: Utilizada para reaproveitar os gases quentes que saem do exaustor do motor a combustão. Geralmente constitui um trocador de calor para aquecer água para múltiplas aplicações.
- Armazenamento de energia: Em casos que a planta de poligeração esteja sendo usada como fornecedora de energia auxiliar ou emergencial, pode-se utilizar equipamentos de armazenamento de energia elétrica, como baterias, para garantir eletricidade o suficiente em horários de picos de demanda ou escassez de entrega de energia.

A depender das aplicações, pode-se adicionar mais equipamentos à planta, ou ter que configurá-la para melhor suprir as necessidades da edificação. Por exemplo, como parte do projeto, é possível adicionar chillers por absorção, que irão receber água quente fornecida pela unidade de recuperação de calor, para refrigerar ambientes.

Também é preciso considerar equipamentos e instalações que estejam trabalhando em paralelo com a planta para conseguir suprir adequadamente as necessidades locais. Que apesar de não serem componentes instalados no mesmo espaço do resto da planta de cogeração, são parte fundamental dos cálculos de dimensionamento e operação da mesma.

2.3.3 Aplicação da cogeração e suas vantagens

Como citado anteriormente, o sistema de poligeração é projetado de maneira a extrair o máximo possível de energia do material combustível usado, Silveira et. al (2012) buscaram

analisar a eficiência desse tipo de planta em entregar energia útil para a instalação de interesse. Além disso, também há o interesse de verificar a eficiência ecológica da poligeração em quesitos de emissão de poluentes.

O estudo tomou como base a aplicação da poligeração para suprir as demandas de uma unidade hospitalar e o gás natural como combustível dessa planta de geração. Das cinco propostas de configuração de planta de poligeração, apenas uma obteve retorno financeiro positivo para o hospital, o que corrobora com a análise de Cervi et al. (2011), em que a viabilidade econômica vai depender da configuração da planta e dimensionamento adequado da mesma.

Para além da análise econômica, Silveira et. al (2012) ainda verificaram um importante ganho ecológico em utilizar a planta de cogeração, mesmo utilizando um combustível fóssil não renovável como o gás natural. Nesse aspecto, o estudo utilizou uma métrica percentual de eficiência de 0-100%, em que quanto mais próximo de cem, mais ecologicamente eficiente a planta é, e menor a concentração de dióxido de carbono emitido. Para o gás natural usado em motores convencionais, o valor fica em torno de 20%, enquanto para a aplicação em plantas de cogeração com recuperação de calor a eficiência sobe para 80% em média.

Essas análises levaram somente o gás natural como combustível base da planta e não foi adicionado nenhum outro método auxiliar de suprir as demandas de energia do hospital. Para além da troca do gás natural por biogás, a proposição de utilizar energia solar paralelamente ao conjunto de geradores pode reduzir ainda mais a poluição causada por essa instalação

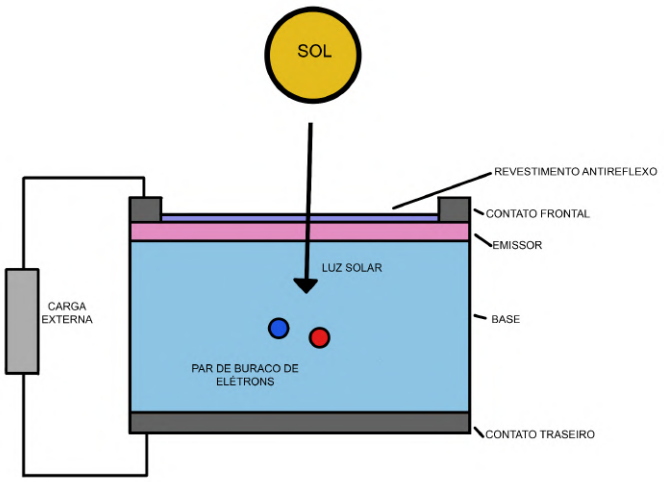
2.4 ENERGIA SOLAR

Com os crescentes esforços em desenvolver maneiras mais eficientes e baratas de aproveitamento energético, a planta de energia solar em centros urbanos através de instalações prediais torna-se de suma importância. Pois são versáteis quanto ao local em que é possível ser instalado, além de terem a capacidade de gerar energia elétrica e térmica de maneira limpa e renovável.

2.4.1 Funcionamento e componentes de um painel solar fotovoltaico

O painel solar funciona a partir do efeito fotovoltaico, em que há o deslocamento de elétrons entre a banda de valência e a banda de condução de materiais semicondutores quando expostos a certas frequências de fótons oriundos dos raios solares, gerando corrente elétrica. Esse deslocamento de elétrons é causado pelo "buraco de elétrons", fenômeno em que há ausência de um elétron onde um poderia existir num átomo, deslocado por ser excitado pela energia dos fótons de raios solares. Isso, por sua vez, causa um desequilíbrio de cargas elétricas dentro do semicondutor a ponto de criar uma corrente elétrica. A figura 6 ilustra de maneira simplificada a estrutura de uma célula fotovoltaica.

Figura 6 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de PVEducation.

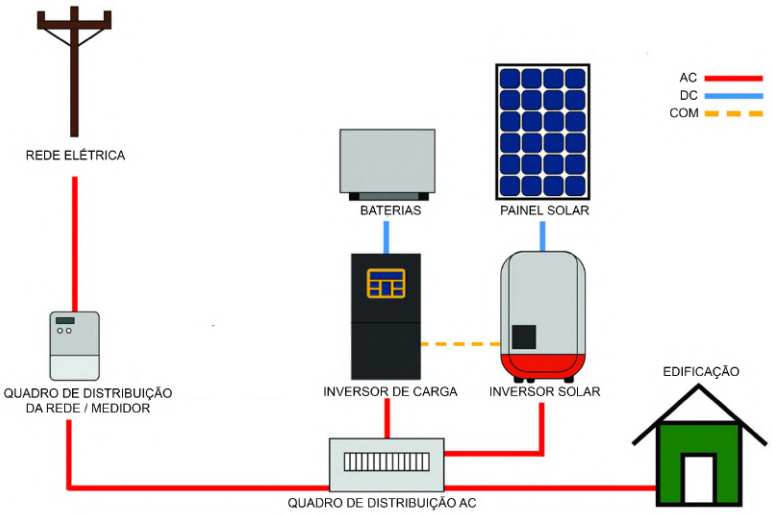
É relevante também ressaltar que a capacidade instalada de uma usina de energia solar é dependente de uma série de fatores locais e globais para ser determinada. Assim, para fins de simplificação, não será exposto em detalhes o embasamento matemático desse cálculo. De maneira semelhante a outros trabalhos, para a estimativa da capacidade instalada, será usado um *software* de simulação computacional especializado em usinas de energia solar.

A figura 7 mostra um exemplo de instalação *on-grid* de uma painel solar, ou seja, uma instalação ligada diretamente tanto a edificação, quanto a rede elétrica. Ao contrário, o *off-grid* é conectado somente à fiação elétrica da edificação, mas esse tipo de sistema é mais utilizado para propriedades rurais afastadas da rede elétrica.

2.4.2 Aplicação de painéis solares fotovoltaicos

Com o interesse de avaliar a disponibilidade de áreas apropriadas para a instalação de painéis solares, Kouhestani et. al (2019) analisaram a região urbana do município canadense Lethbridge, de aproximadamente 101 mil habitantes em 2019. Com mais de 38.496 telhados com alguma área disponível para instalação, e uma área total da cidade de 2,372 km^2, o estudo concluiu que, dados as condições geográficas e meteorológicas da região, uma instalação completa de painéis solares nessa cidade seria capaz de gerar uma potência de 218 MW. Essa potência seria capaz de suprir cerca de 38% de todo o consumo elétrico da cidade, considerando instalações comerciais e industriais, que notoriamente possuem equipamentos e maquinários de alto consumo de energia elétrica.

Figura 7 - Diagrama de uma instalação de painel solar ligado a rede elétrica.



Fonte: Adaptado de Off-grid energy Australia.

Além do estudo de Kouhestani et. al (2019), que focaram a análise em uma cidade relativamente pequena do Canadá, Ko et. al (2014) também realizaram um estudo semelhante para avaliar a viabilidade da energia solar como fonte de eletricidade para Taiwan, uma região bem mais urbanizada e densamente povoada. A capacidade instalada foi de 12.428,5 MW, uma vez que a região avaliada era maior, contudo essa potência estimada seria capaz de entregar apenas cerca de 7,77% da demanda de eletricidade anual de Taiwan. O percentual menor pode ser atribuído ao fato de se tratar de uma região com alta concentração de prédios elevados, em que a relação entre área de telhado disponível e número de habitantes por km^2

se torna significativamente menos do que o outro estudo.

Dessa maneira, a tecnologia de geração de energia solar ainda é incapaz de substituir totalmente as matrizes energéticas convencionais, principalmente em centros urbanos de alta densidade populacional. Contudo, para aplicações mistas em que se utilizam painéis solares fotovoltaicos em conjunto com plantas de cogeração, a geração de eletricidade e calor não somente foi capaz de suprir a demanda energética, mas também oferecer vantagens econômicas em longo prazo. (MAREFATI, 2021)

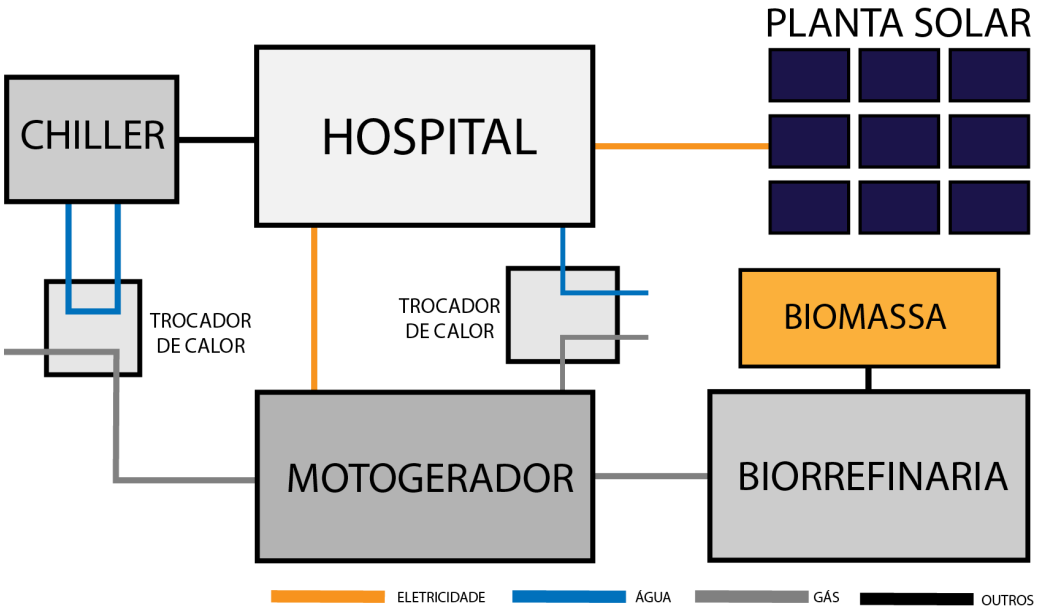
3. METODOLOGIA

Nesta seção serão explicados todos os procedimentos, métodos e materiais utilizados para a configuração do sistema de poligeração. Isso inclui o levantamento de dados, modelos matemáticos e software necessários para a realização do estudo de caso.

3.1 SISTEMA DE POLIGERAÇÃO

Primeiramente, é interessante desenvolver uma proposta de configuração para a planta de poligeração para guiar as futuras decisões. Além de facilitar o entendimento do processo de desenvolvimento da planta proposta. A figura 8 ilustra de maneira esquemática a configuração da planta para atender o Hospital das Clínicas.

Figura 8 - Configuração da planta de poligeração proposta.



Fonte: O próprio autor

A configuração do sistema energético conta, então, com uma planta de cogeração a biogás que fornece eletricidade e água quente diretamente ao hospital. Essa instalação é abastecida por uma biorrefinaria que reaproveita biomassa do próprio campus UFPE. Além disso, há um sistema de reaproveitamento dos gases da exaustão para operar um *chiller* por absorção que auxilia na refrigeração de certos setores do hospital. Por fim, uma planta de painéis solares para auxiliar na entrega de eletricidade ao Hospital das Clínicas.

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

Como o projeto tem como objetivo principal a análise de um sistema de geração de energia elétrica e térmica local para abastecer uma unidade hospitalar, mais especificamente o Hospital das Clínicas da UFPE, o primeiro passo é obter o perfil de consumo do mesmo. Contudo, por uma dificuldade de obter essas informações diretamente do hospital, para a realização deste trabalho, será estimado o perfil de consumo com base no número de leitos e modalidade de atendimento.

Szklo et. al. (2003) realizaram um levantamento sobre diversos hospitais brasileiros, públicos e privados, com relação aos tipos de maquinários e equipamentos médicos presentes e a frequência dos mesmos em cada categoria. Por exemplo, por esse estudo, 86,8% dos hospitais do Sistema Único de Saúde (SUS) possuem lavanderia própria, enquanto apenas 13,6% possuem sistemas de ar-condicionado central.

A partir das tabelas de dados do estudo, é possível traçar um perfil razoável para o Hospital das Clínicas da UFPE, principalmente para o consumo de energia elétrica e térmica, com base no número de leitos funcionais. A tabela 4 mostra uma relação de dados relevantes para a presente pesquisa.

Tabela 4 - Indicadores do perfil de consumo mensal de um hospital do SUS.

Indicador	Valor
Total de energia consumido por leito mensalmente (kWh/leito)	248
Parcela da energia total reservada para ar-condicionados (%)	15,4
Volume mensal total de água quente por leito (m^3/leito/mês)	0,93

Fonte: Adaptado de Szklo et. al. (2003).

O Hospital das Clínicas possui cerca de 415 leitos ativos, de acordo com dados do governo disponibilizados em 2022. Assim, com os indicadores da tabela 4, pode-se estimar a quantidade de energia elétrica mensal, além da quantidade de água quente consumida total.

Tabela 5 - Perfil de consumo estimado do Hospital das Clínicas da UFPE.

Indicador	Valor
Total de energia consumido mensal (kWh)	102.920
Energia total reservada para ar-condicionados (kWh)	15.849,68
Volume mensal total de água quente (m^3)	230

Fonte: O próprio autor.

Esses três dados expostos na tabela 5 são de suma importância para a escolha da configuração do sistema de poligeração posteriormente, uma vez que o sistema entregará energia elétrica primariamente, mas também pode, através de um trocador de calor, usar os gases da combustão para aquecer água ou fornecer calor para um *chiller* por absorção. A escolha do que priorizar depende da capacidade do sistema e das demandas indicadas na tabela 5.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS

É necessário primeiramente averiguar qual as características do biogás, já que é a principal matriz energética da instalação. Com base no estudo de Surendra et. al. (2014) apresentado anteriormente, pode-se estimar o volume de biogás obtido a partir do tipo de biomassa utilizada.

Adicionalmente, Sousa et al (2020) conduziram um estudo sobre o reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos no campus da UFPE em Recife. A partir deste levantamento, constatou-se uma produção mensal de cerca de 35 toneladas de resíduos orgânicos oriundos das cantinas dos centros da universidade. Mas a principal fonte de matéria orgânica são as folhas, galhos e grama oriunda da limpeza dos mais de 140 ha do campus.

A partir dessas duas informações, tem-se que os tipos de biomassa predominante do campus são as sobras de alimento e os resíduos vegetais, ambos descritos na tabela 1. Dessa forma, tem-se os seguintes volumes de biogás produzido por ambas as fontes.

$$V_{biogás,\,alim} = m_{bio,\,alim} \,.\, C_{alim,\,méd} = \; 35.000[kg]\; x\; 0,7\; [\frac{Nm^3}{kg}] \; = \; 24.500[Nm^3] \qquad (1)$$

$$V_{biogás,\,veg} = m_{bio,\,veg} \,.\, C_{veg} = 253.000[kg]\; x\; 0,4\; [\frac{Nm^3}{kg}] = 101.200\; [Nm^3] \qquad (2)$$

Primeiramente, o coeficiente C igual 0,7 veio do quadro adaptado de Surendra et. al. em que a produção volumétrica de biogás em condições normais de pressão e temperatura a partir de biomassa de sobras de alimento era entre 0,4-1,0. Assim, o coeficiente 0,7 é o valor médio desse intervalo experimental do estudo. Além disso, o valor de 0,4 para resíduos vegetais vem do mesmo quadro adaptado de Surendra et. al, que apesar de ser menor, ainda assim constituiu a maior parte do volume de biogás produzido pela quantidade expressiva de resíduos vegetais no campus.

3.3.1 Capacidade instalada do biogás

O valor encontrado nas equações 1 e 2 são as capacidades máximas teóricas de produção de biogás a partir da biomassa encontrada no campus Recife da UFPE. Além disso, é relevante para o presente trabalho saber a capacidade já instalada. De acordo ainda com Sousa et. al, o biodigestor presente hoje no campus é capaz de produzir em média 1,14 Nm^3/dia, ou seja, 34,2 $Nm^3/mês$.

Para início de estudo, as configurações propostas e avaliação serão baseadas nessa produção de biogás instalada. Caso seja verificada a insuficiência do sistema atual, então será estimado uma nova capacidade de produção de biogás suficiente para suprir as demandas do hospital.

A partir do cálculo desenvolvido nas equações 1 e 2, também é possível estimar quantitativamente a capacidade energética máxima que a biomassa do campus da UFPE consegue fornecer. Usando agora o quadro adaptado de Dalpaz, pode-se fazer o seguinte cálculo expresso nas equações 3, 4 e 5.

$$E_{total} = V_{bio,\,alim} \,.\, C_{e,\,vol} = 24.500[Nm^3]\; x\; 3,19\; [\frac{kWh}{Nm^3}] = 78.155\; kWh \qquad (3)$$

$$E_{total} = V_{bio,\,veg} \,.\, C_{e,\,vol} = 101.200[Nm^3]\; x\; 3,19\; [\frac{kWh}{Nm^3}] = 322.828\; kWh \qquad (4)$$

$$E_{inst} = V_{bio,\,inst} \,.\, C_{e,\,vol} = 34,2[Nm^3]\; x\; 3,19\;[\frac{kWh}{Nm^3}] = 109,1\;kWh \qquad (5)$$

A capacidade máxima fornecida por toda biomassa coletada no campus representa mais do que o dobro da demanda de energia do hospital, enquanto a capacidade já instalada não chega a 0,2% da demanda. Esse gargalo na produção instalada atual de biogás deverá constar, portanto, dentro das propostas de sistemas de geração de energia a partir do biogás para o Hospital das Clínicas.

Ademais, também é importante salientar que essa estimativa serve apenas para ter-se uma noção inicial do potencial energético, uma vez que a geração de energia real irá depender da eficiência do gerador usado. Essa performance do grupo de motogeradores será realizada por meio de simulação computacional no *software* Matlab.

3.4 COGERAÇÃO

Dando continuidade ao estudo das características do biogás e a capacidade de geração de energia a partir somente da biomassa encontrada no campus da UFPE, será conduzido agora uma análise do consumo de biogás requerido pelo modelo de motor escolhido e seu desempenho como grupo de cogeração.

3.4.1 Geradores e consumo de combustível

Havia sido discutido anteriormente as propriedades do biogás, como o poder calorífico, além da capacidade de produção do mesmo a partir da biomassa. Agora, a fim de iniciar a análise da planta de cogeração, é necessário estipular um modelo de motor-gerador base para ser utilizado. Por praticidade, escolheu-se trabalhar com um dos geradores já instalados no campus da UFPE, seu modelo e características de funcionamento estão descritos no tabela 6. Apesar do modelo escolhido ser de um motor de ciclo Diesel, com as devidas adaptações da sua estrutura, principalmente de injeção, é plenamente possível de se trabalhar com o biogás. Inclusive, o projeto de motor a Diesel já pressupõe de uma operação com menores rotações e maiores taxas de compressão que um motor ciclo Otto, o que se mostrou na prática mais eficiente de se trabalhar com o biogás (BERNARDES 2020).

Tabela 6 - Dados relevantes do motor diesel (DABB-AG31) da biorrefinaria da UFPE.

Modelo do motor	D4BB-AG31
Tipo de motor	4 cilindros
Tipo de injeção	Injeção indireta
Número de cilindros	4 em linha
Cilindrada	2.607
Taxa de compressão	22:01
RPM	1800

Fonte: O próprio autor.

Com esses dados, tem-se o volume de combustível que é aspirado em cada rotação (cilindrada e o número de cilindros), assim como a taxa em que essa aspiração ocorre (rotação por minuto). Assim, é possível estimar o consumo volumétrico de mistura combustível aproximado do motor.

Tomando como base que o motor de quatro tempos com rotação de 1800RPM irá injetar combustível 900 vezes por minuto, já que o pistão rotaciona duas vezes para cada ciclo de combustão. Assim, a vazão da mistura admitida no motor, no período de um minuto, pode ser obtida com base na rotação do motor e na cilindrada do mesmo conforme a equação 6.

$$Q_{volume} = \frac{\omega_{motor}}{2} \cdot V_{cil} \cdot N_{cil} = 900[\frac{1}{min}]x\ 2607\ [cm^3]x\ 4 = 9.385x10^6[\frac{cm^3}{min}] \quad (6)$$

Contudo, para saber a quantidade de biogás consumido nesse intervalo é necessário, primeiramente, saber a razão de ar e combustível que é injetada no motor. Para tanto, realiza-se uma análise estequiométrica da combustão do biogás a fim de se determinar a quantidade de ar necessária para a combustão completa do biogás.

$$x\ (0,6CH_4 + 0,4CO_2) + y\ (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow a\ CO_2 + b\ H_2O + c\ N_2 \quad (7)$$

Com base em dados da literatura já revisada anteriormente neste projeto, a proporção média comumente utilizada para cálculos do biogás é de 60% metano e 40% dióxido de carbono.

$$(0,6CH_4 + 0,4CO_2) \; + \; 1,2(O_2 + 3,76N_2) \rightarrow CO_2 \; + 1,2\,H_2O \; + \; 4,5\,N_2 \qquad (8)$$

A partir da equação 8, que se trata da combustão do biogás devidamente equilibrada, temos a relação volumétrica entre ar e biogás. Para cada 1 mol de biogás injetado no motor, deve-se colocar 5,71 mols de ar atmosférico (1,2 mols de oxigênio e 4,51 mols de nitrogênio) para que possa haver a combustão completa.

Dessa forma, durante a injeção da mistura combustível, cerca de 14,9% do volume aspirado é biogás, e o restante é ar atmosférico. Assim tem-se a equação 9.

$$t_{func} = \frac{V_{total,\,biogás}}{Q_{vol,\,comb}\,x\,C_{comb,\,ar}} = \frac{24.500+101.200\,[m^3]}{9{,}385\,[\frac{m^3}{min}]\;x\;0{,}149} = 89.890,7\,[min] \; = 62,4\,[dias] \qquad (9)$$

Portanto, a partir desse resultado, o volume de biogás produzido a partir da biomassa coletada mensalmente no campus da UFPE, possibilita o funcionamento do motogerador ininterruptamente por até 62,4 dias. Alternativamente, visando o funcionamento ao longo de um mês inteiro, o biogás possibilita o funcionamento de três modelos desse motogerador por 30 dias, operando 16 horas por dia.

Contudo, é preciso lembrar que essa é a quantidade máxima de biogás possível de ser produzido, a capacidade instalada na biorrefinaria da UFPE não produz nem 5% dessa quantidade de biogás no presente estado, como visto anteriormente.

3.4.2 Simulação de desempenho do motogerador

Para poder avaliar com maior precisão o abastecimento do Hospital das Clínicas somente com a planta de cogeração, precisa-se analisar a potência do modelo de motogerador escolhido quando operado apenas com mistura combustível de biogás. Para tanto, serão utilizados os dados já coletados e calculados anteriormente com auxílio de um algoritmo em ambiente Matlab desenvolvido por Cuddihy e Beyerlein (2014) e adaptado para os fins deste trabalho, que é a modelagem de um motogerador. Contudo, ainda no assunto da razão ar-biogás na mistura combustível, outro valor importante para a simulação da potência do motor é a razão mássica entre o ar e biogás. Anteriormente, foi estimado as relações volumétricas entre ar e biogás, a partir da concentração molar de ambos na combustão

completa. A partir dessas quantidades de mols de biogás e ar obtidos, assim como as massas molares de cada elemento das moléculas em questão (carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio), é possível calcular as massas do biogás e do ar para uma combustão estequiométrica, conforme equações 10 e 11

$$(0,6CH_4) + (0,4CO_2) = 0,6x(12 + 4) + 0,4x(12 + 32) = 27,2 \text{ g/mol} \quad (10)$$

$$1,2(O_2 + 3,76N_2) = 1,2(32 + 3,76\,x\,28) = 164,736 \text{ g/mol} \quad (11)$$

Dos resultados das massas, pode-se obter a razão ar/combustível em massa. Seu valor corresponde a 6,06 kg ar/kg biogás. A título de comparação, a razão ar-combustível da gasolina é cerca de 12,5, e o diesel por volta de 15. Além disso, para que se possa realizar a simulação de desempenho do motor, ainda é necessário encontrar o poder calorífico inferior do biogás. Com base num estudo conduzido por Zilotti (2012), pode-se encontrar tanto o PCI do biogás em kcal/kg, quanto a densidade do mesmo quando composto por 60% metano e 40% dióxido de carbono. Esses valores estão dispostos na tabela 7.

Tabela 7 - Poder calorífico inferior e densidade do biogás.

Biogás 60% metano - 40% Dióxido de carbono	
PCI	4.230 $kcal/kg$ (ou 17,698 MJ/kg)
Densidade	1,2143 kg/Nm^3

Fonte: Adaptado de Zilotti (2012).

Com ambos valores para o PCI em MJ/kg e a razão mássica de ar combustível do biogás, é possível realizar a simulação do funcionamento do motor ao longo de um ciclo de combustão em ambiente Matlab, utilizando o algoritmo desenvolvido por Cuddihy e Beyerlein (2014). Os resultados mais relevantes para a análise da planta de cogeração são explicitados no Tabela 8.

Considerando que os três motogeradores operem durante 16 horas todos os dias, como previamente calculado sendo o máximo possível somente com o biogás do campus UFPE, tem-se uma energia fornecida ao hospital de 67.719,4 kWh, o que representa cerca de 66% da demanda mensal.

Tabela 8 - Resultado da simulação de desempenho de um motogerador (D4BB-AG31).

Potência do motogerador	47,16 kW
Vazão de gases quentes da combustão	0,095 kg/s
Temperatura de saída dos gases da combustão	319 ºC

Fonte: o próprio autor.

3.4.3 Gases quentes da combustão

Ademais, com a vazão mássica de gases quentes e sua temperatura, é possível calcular a quantidade de água quente que o sistema consegue aquecer através do trocador de calor na saída do motor. Para tanto, é utilizada a equação 12 que corresponde a um balanço de energia.

$$Q_{massa,\,água\ quente} = Q_{massa,\,gases}\ x\ \frac{h_{gases,\,entrada} - h_{gases,\,saída}}{h_{água,\,saída} - h_{água,\,entrada}} \qquad (12)$$

Pela equação 12, ve-se que a vazão mássica de água quente ($Q_{massa,\,água\ quente}$) será igual a vazão mássica dos gases quentes da exaustão ($Q_{massa,\,gases}$) multiplicado pela razão entre a diferença de entalpia de entrada e saída da água e dos gases expelidos.

No caso, é importante lembrar que os produtos da combustão não são um único gás, mas uma mistura do gás nitrogênio, dióxido de carbono e vapor de água. Assim, a entalpia da mistura (entalpia do gás) pode ser obtida pela média ponderada da fração mássica de cada gás na mistura, conforme a equação 13. Nesta equação, a massa de cada componente é calculada pela multiplicação da massa molar e o número de mols correspondente.

$$h_{gases} = \frac{m_{CO2}h_{CO2} + m_{H_2O}h_{H_2O} + m_{N_2}h_{N_2}}{m_{produtos}}$$

$$h_{gases} = [(1x44g)h_{CO_2} + (1,2x18g)h_{H_2O} + (4,5x28g)h_{N_2}]\ x\ 1/(191,6) \qquad (13)$$

Considera-se que a água na saída, que é entregue ao hospital, seja aquecida até 50 ºC, uma vez que essa é a temperatura comumente usada para lavar tecidos com o intuito de

desinfetá-los para ambientes hospitalares. Já a água na entrada está à temperatura ambiente de 25ºC, uma vez que é oriunda do sistema municipal de abastecimento de água. Sabe-se também que os gases quentes da exaustão entram no trocador de calor a 319 ºC. Por fim, estipula-se que a temperatura dos gases na saída será cerca de 120 ºC, uma vez que o trocador de calor não será capaz de aproveitar todo calor dos gases, então eles não irão sair em temperatura ambiente de 25 ºC.

Com todas essas devidas considerações, a tabela 9 mostra as entalpias encontradas usando uma tabela termodinâmica desenvolvida por Moran et al. (2014).

Tabela 9 - Entalpia dos gases e da água para a entrada e saída do trocador de calor.

$h_{gases,\,entrada}$ (kJ/kg)	$644,74$
$h_{gases,\,saída}$ (kJ/kg)	$415,64$
$h_{água,\,entrada}$ (kJ/kg)	104,83
$h_{água,\,saída}$ (kJ/kg)	209,34

Fonte: O próprio autor.

Com isso, para uma operação de 16 horas diárias dos três motogeradores, tem-se os seguintes valores de fornecimento de água quente mensal na tabela 10.

Tabela 10 - Produção de água quente a partir dos gases da exaustão do conjunto de motogeradores.

Vazão mássica de água quente (50ºC)	$0,624\ kg/s$
Vazão volumétrica de água quente (50ºC)	$6,25x10^{-4}\ m^3/s$
Volume mensal	$1.080\ m^3$

Fonte: O próprio autor.

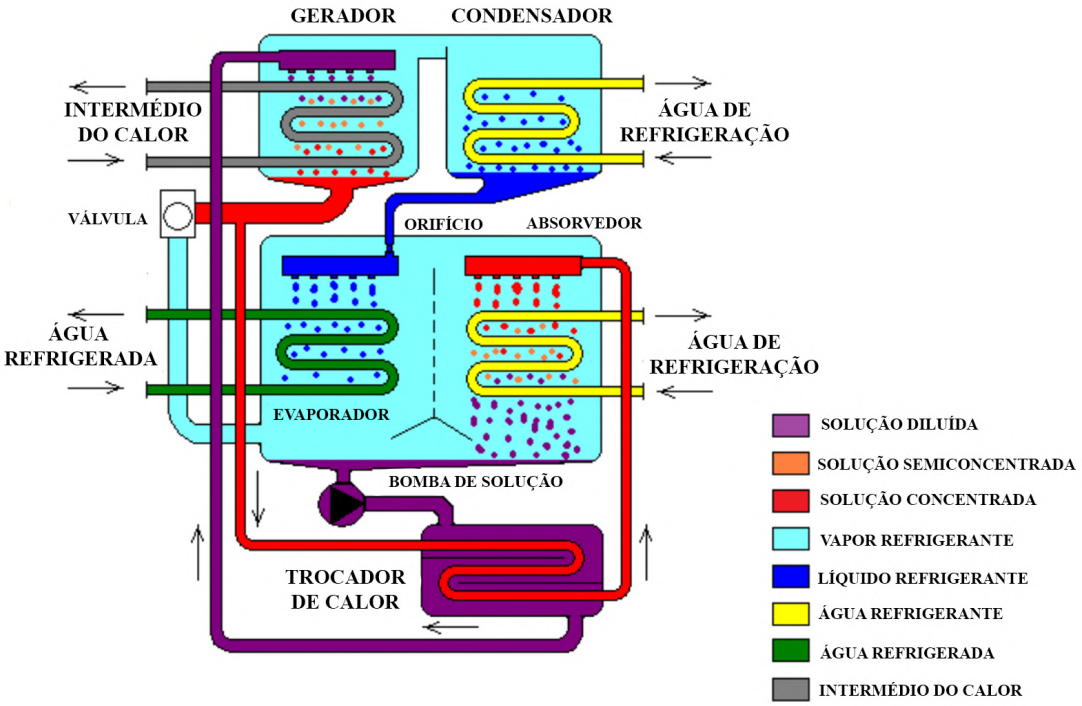
3.4.4 Chiller por absorção

Ao final da seção anterior foi apresentado na tabela 10 o volume de água quente que um motor é capaz de prover ao hospital. Nota-se ao comparar esses resultados com a demanda do hospital descrita na tabela 5 que o motogerador é capaz de entregar um volume de água quente superior a demanda do hospital. Assim, uma das propostas de planta inclui o uso de

um chiller por absorção para aproveitar parte da água quente para reduzir os custos de eletricidade para refrigerar certas salas do hospital.

Primeiramente, selecionando um catálogo de um chiller por absorção que apresente as informações necessárias, como a temperatura e a vazão de água quente de sua operação, além claro da quantidade de refrigeração fornecida a partir disso. Portanto, foi selecionado o catálogo da Yazaki Energy System Inc, em que é fornecida a seguinte imagem esquemática do funcionamento do *chiller*, como mostra a figura 9.

Figura 9 - Funcionamento do chiller por absorção da Yazaki Inc.



Fonte: Adaptado de Yazaki Inc.

Para os fins do presente trabalho, não será feito uma análise aprofundada do funcionamento de um chiller por absorção, assim a imagem esquemática da figura 9 serve apenas para compreender melhor o significado dos valores expostos no catálogo. Assim, para realizar a análise da refrigeração a partir do fluxo de água quente da cogeração, o foco será nas características do intermédio de calor, que é a água quente que será fornecido para o funcionamento do *chiller*. Os dados mais relevantes encontrados no catálogo para os fins deste projeto estão dispostos na tabela 11.

Tabela 11 - Dados de operação do *chiller* por absorção modelo WFC-SC5.

Capacidade de refrigeração	17,6 kW
Intermédio do calor [Fluido usado]	Água
Temperatura de entrada	88ºC
Temperatura de saída	83ºC
Vazão volumétrica nominal	4,31 m^3/h
Percentual permitido da vazão nominal	30-120%

Fonte: Adaptado de Yazaki Inc.

Como é possível perceber a partir da tabela 11, o *chiller* permite a entrega da vazão de água quente abaixo do valor nominal, podendo ser somente 30% do valor tabelado. Esse fato pode ser relevante, uma vez que será calculado adiante a vazão de água quente que é possível entregar a partir do excedente de gases quentes do sistema. Outro fato relevante de salientar é que o *chiller* trabalha num sistema de circulação de água quente com retroalimentação, em que a água quente de 88ºC é expelida do *chiller* com temperatura ainda elevada de 83ºC para ser aquecido novamente no trocador de calor.

Dessa forma, não é possível utilizar a água a 50ºC destinada à lavanderia para operar o chiller diretamente. Então ao invés de se trabalhar com o volume de água excedente da água para lavanderia, será calculado o quanto da vazão de gás da exaustão é necessário para suprir a demanda de água quente do hospital, e o restante do gás será redirecionado para aquecer o sistema de retroalimentação do *chiller*.

Assim, é refeito o cálculo da equação 12 para um valor de vazão mássica de água quente conhecido e estipulado para atender a demanda nominal do hospital. Portanto, a vazão de gás quente é mostrado na equação 13

$$0,13\frac{kg}{s} = Q_{massa,\,gases}\; x\; \frac{644,74 - 415,64}{209,34 - 104,83} \rightarrow Q_{massa,\,gases} = 0,059\; kg/s \qquad (14)$$

Sabe-se, a partir de dados da simulação em Matlab da operação do motor, que a vazão mássica de gases quentes da combustão total é 0,285 kg/s, considerando o conjunto de três motogeradores. Portanto, tem-se uma vazão disponível de 0,226 kg/s, isto é, cerca de 80% da vazão total dos gases para aquecer o sistema de água quente do *chiller* por absorção.

Sabendo que no trocador de calor do sistema de retroalimentação do *chiller* as temperaturas de entrada e saída são, respectivamente, 83°C e 88°C. Precisa-se então calcular as entalpias da água novamente e aplicar a equação 12 junto a nova vazão mássica de gases quentes calculada na equação 13. A tabela 12 indica as novas entalpias encontradas.

Tabela 12 - Entalpias da água saturada fornecida ao *chiller*.

Água na entrada (83ºC)	347,6 kJ/kg
Água na saída (88ºC)	368,64 kJ/kg

Fonte: Adaptado de Moran et al. (2014).

Com esses novos valores, e usando a equação 12, temos que a vazão de água quente capaz de ser fornecida é igual a 8,87 m^3/h, que é o suficiente para operar dois *chillers* daquele modelo, somente com a vazão remanescente do que é entregue diretamente ao hospital.

3.5 PLANTA DE ENERGIA SOLAR

Outro aspecto da planta de poligeração proposta é a planta de painéis solares fotovoltaicos instalados no terreno do hospital para auxiliar a planta de cogeração a biogás a suprir as demandas energéticas do Hospital das Clínicas. Primeiramente, será apresentado o *software* utilizado para esse projeto e posteriormente o arranjo proposto para o estudo de caso do presente trabalho.

3.5.1 HelioScope

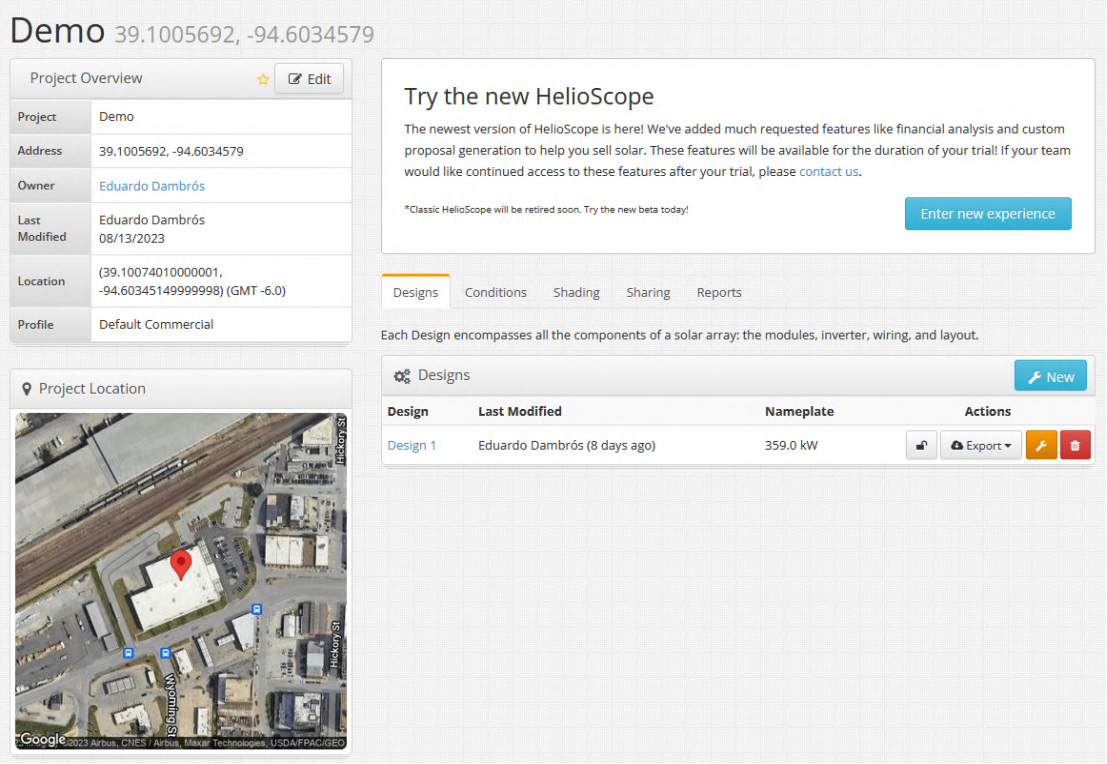
Devido a complexidade de um modelo matemático para descrever com precisão e acurácia adequada a capacidade instalada de uma planta de energia solar fotovoltaica, optou-se pelo uso de algum *software* já especializado para facilitar a realização desta análise.

Nesse caso, escolheu-se o *software* HelioScope, que apesar de não ser gratuito, oferece uma versão de testes por duas semanas com limitação de algumas funcionalidades, ao contrário de outros *softwares* do mesmo nicho. Assim, o HelioScope tem o melhor custo-benefício para a realização de um estudo de simulação computacional de nível acadêmico.

Primeiramente, ao contrário de muitos dos *softwares* de simulação computacional utilizados em engenharia, o HelioScope não exige download nem instalação, somente o cadastro no site oficial, onde todo o uso de suas funcionalidades ocorre. Uma vez realizado o cadastro gratuito e criado o projeto, é apresentado uma tela de gerenciamento geral do projeto, como ilustrado na figura 10.

A tela inicial tem três grandes áreas que se deve atentar, o *Project Overview* no canto superior esquerdo mostra algumas informações a respeito do projeto, como a localização geográfica da instalação em termos de latitude e longitude, além do endereço, tipo de perfil da instalação e dono do projeto. A parte inferior esquerda sob nome de *Project Location* é a imagem de satélite da localização da planta, em que tal imagem pode ser alterada por uma foto colocada pelo próprio usuário ou escolhida entre alguns sistemas de imagem de satélite disponíveis, como Google ou Bing.

Figura 10 - Visão geral de um projeto do HelioScope.



Fonte: Adaptado do HelioScope.

Por fim, ainda na figura 10, tem-se ao lado direito as abas onde as definições do projeto são dispostas. Na primeira aba, design, está localizado os diferentes projetos usados para instalação, ou seja, no HelioScope pode-se criar múltiplos arranjos de painéis com

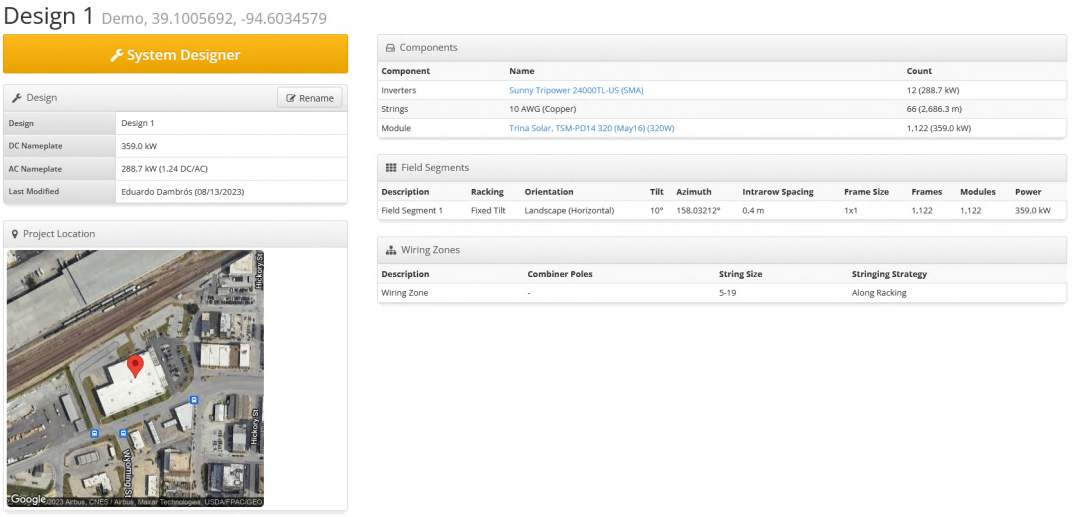
diferentes modelos de painéis, inclinação, distribuição, etc. Dessa forma, é possível criar e simular múltiplas plantas de geração dentro do mesmo projeto e compará-las, o que será relevante para o estudo de caso realizado.

As outras duas abas, *Conditions* e *Shading*, dizem respeito às condições climáticas e de iluminação solar da região geográfica escolhida para a instalação, o que influencia drasticamente a maneira como a instalação será disposta e sua capacidade de geração anual. Essas duas abas são preenchidas automaticamente pelo HelioScope com base em dados meteorológicos disponíveis da região geográfica inserida na criação do projeto.

A penúltima aba, *Sharing*, é para facilitar o compartilhamento do projeto com outras pessoas que o usuário queira. Por fim a última aba, *Report*, é onde os resultados da simulação estão depositados, como a capacidade de geração anual, a perda por sombreamento, a geração mês a mês e a variação do mesmo, etc.

Ao entrar em algum dos designs de um projeto do HelioScope, uma janela, como ilustrada na figura 11, é aberta para descrever brevemente algumas informações gerais a respeito daquele design específico. Caso já tenha sido realizada alguma simulação previamente, essa aba mostrará a potência instalada do arranjo de painéis solares.

Figura 11 - Detalhamento individual de design do projeto geral do HelioScope.



Fonte: Adaptado do HelioScope.

Além disso, essa janela também permite realizar um download da planta de geração com os painéis individualmente representados de vista superior do satélite, como a figura 12 ilustra. Finalmente, para que se possa editar o desenho da planta, clica-se na opção destacada

em amarelo na figura 11, *System Designer*. Essa é a área de maior importância do HelioScope, pois é nela em que a área designada para planta é desenhada, o arranjo e inclinação dos painéis é escolhido, os componentes elétricos são selecionados e dispostos na planta, etc.

Dentro do *System Designer*, é apresentada uma vista superior de satélite da planta em que se pode modificar basicamente todos os parâmetros relevantes do projeto, como ilustra a figura 13.

Figura 12 - Desenho esquemático da planta de geração solar.

Fonte: Adaptado do HelioScope.

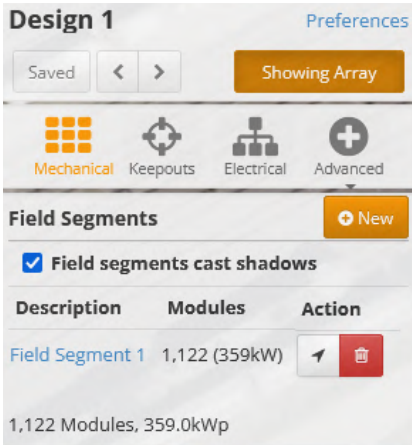
Figura 13 - Visão geral do *System Designer* do HelioScope.

Fonte: Adaptado do HelioScope.

Nessa tela, tem-se basicamente quatro funcionalidades dispostas no quadro no canto superior esquerdo (*Mechanical, Keepouts, Electrical* e *Advanced*). Contudo, como não é foco deste projeto explorar nos mínimos detalhes instalações elétricas e componentes de transmissão de eletricidade, a aba Electrical será pouco utilizada, deixando que o HelioScope complete os circuitos elétricos de maneira automática com as instalações padrões.

A figura 14 ilustra melhor a aba Mechanical do projeto do HelioScope, onde se localiza todos os segmentos de painéis solares da instalação. Nota-se a partir da figura 12 e 13 que esse projeto de demonstração possui apenas um segmento de painéis, contudo, o programa permite vários segmentos dentro da mesma planta, o que será relevante para a instalação do Hospital das Clínicas. Nessa aba também é possível verificar o nome do segmento, o que é importante para organização em projetos com muitos segmentos, e a potência instalada do conjunto de painéis do segmento.

Figura 14 - Aba *Mechanical* do HelioScope.



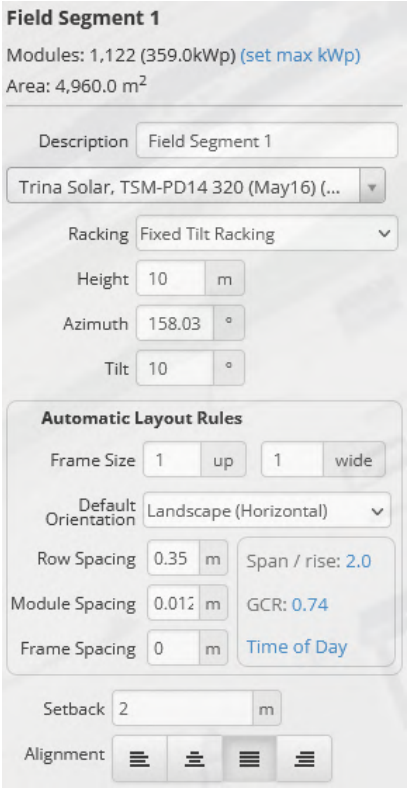
Fonte: Adaptado do HelioScope

Verificando a descrição de um segmento individual a aba se expande mostrando mais opções dos painéis solares, como ilustrado na figura 15. Em ordem, de cima para baixo, tem-se as opções de modelo de painel solar, o tipo de painel, a altura onde o arranjo de painéis será colocado, a orientação dos painéis, a inclinação dos painéis, etc.

Por recomendação do próprio webseminário disponibilizado pelo HelioScope, os painéis devem estar alinhados em direção a alguma das paredes do prédio em que está sendo feita a instalação. Já a inclinação das células fotovoltaicas, recomenda-se a inclinação ser igual a latitude da posição geográfica da instalação para melhor eficiência na geração de energia.

Uma vez desenhada a área onde o segmento de painéis será colocado, a segunda aba, *Keepouts*, é utilizada para posicionar objetos que estejam no telhado, obstruindo o posicionamento de painéis solares, como é possível ver na figura 13 em que há cinco *chillers* bloqueando posicionamento de painéis. Essa aba também permite a inserção de altura em cada um desses obstáculos.

Figura 15 - Descrição detalhada do segmento de painéis solares no HelioScope.



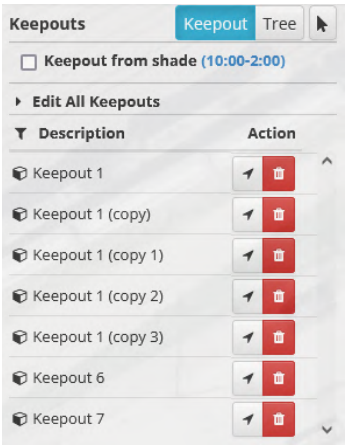
Fonte: Adaptado do HelioScope

Além disso, é nessa aba em que se pode posicionar corredores e áreas de restrição para não posicionar painéis solares, geralmente com o propósito de estabelecer áreas de acesso a manutenção. Por fim, essa aba também possui a opção de posicionar árvores com diferentes alturas e tamanhos para analisar possíveis sombreamentos, assim como outros prédios poderiam causar. A figura 16 ilustra algumas dessas funções da aba *Keepouts*.

Finalmente, a última aba relevante para a realização deste projeto, a aba Advanced é onde a simulação tanto do sombreamento quanto da capacidade de geração é realizada, como mostra a figura 17. Nota-se também que há uma indicação de cor individual de cada painel do segmento, indo de azul escuro até vermelho, o que indica o quanto de percentual de energia

elétrica é perdida naquele painel por conta de sombreamento. Havendo a opção de remover painéis com perda maior que um certo percentual estabelecido pelo próprio projetista, geralmente por volta de 10%.

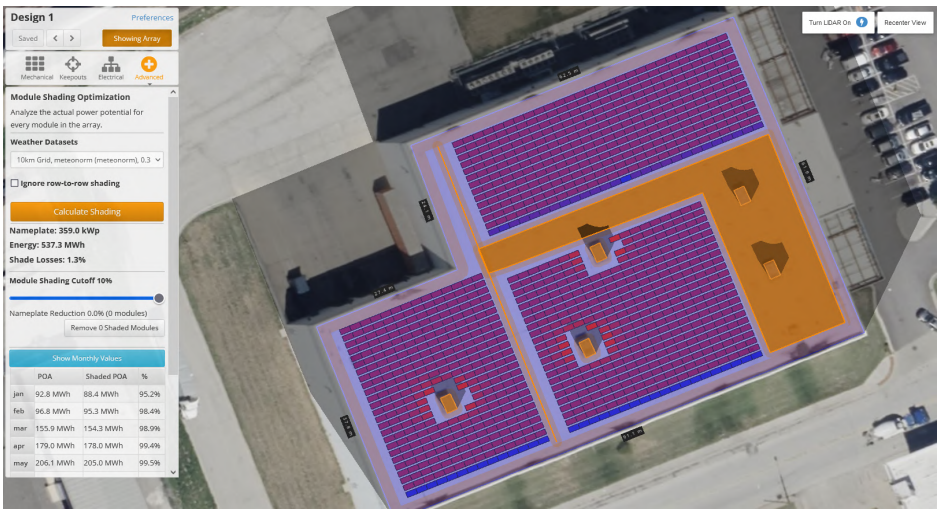
Figura 16 - Aba *Keepout* da seção de projeto do HelioScope.



Fonte: Adaptado do HelioScope

Por fim, após realizada a simulação, o programa gera uma tabela e gráficos com o relatório de geração de energia anual, o pico de potência e a média percentual de energia perdida devido o sombreamento da área. Tudo isso levando em conta a região geográfica e os dados meteorológicos da mesma, como pode ser observado em *Weather Datasets* dentro da aba *Advanced*, na figura 17.

Figura 17 - Design de demonstração após a simulação do sombreamento.



Fonte: Adaptado do HelioScope

Com isso, é possível compreender o funcionamento básico do HelioScope e a utilidade do mesmo para os propósitos de verificar a viabilidade de uma instalação de painéis solares fotovoltaicos no Hospital das Clínicas.

3.5.2 Planta de energia solar no Hospital das Clínicas da UFPE

O primeiro passo para esta análise é obter os dados de localização geográfica e a altura dos diversos prédios e árvores dispostos no Hospital das Clínicas da UFPE. Para isso, serão utilizados dados de satélites do Google Earth, que apresenta uma acurácia suficiente para os fins deste estudo de caso. As figuras 18 e 19 mostram diferentes ângulos do Hospital das Clínicas a partir de imagens de satélite do Google Earth.

Figura 18 - Hospital das Clínicas da UFPE vista por imagens de satélite do Google Earth.

Fonte: Google Earth.

A figura 18 mostra a parte principal do Hospital das Clínicas, apesar de haver alguns departamentos da UFPE que interagem com o hospital, como departamento de cursos de saúde que prestam serviço ao hospital, será focado neste estudo somente os prédios referentes ao hospital em si.

A figura 19 mostra a vista superior do Hospital das Clínicas também a partir das mesmas imagens de satélite do Google Earth. Para iniciar os estudos, foi utilizado a imagem da figura 19 para determinar quais telhados apresentam uma aparente viabilidade de instalação de uma planta de geração de energia solar fotovoltaica. A figura 20 mostra as áreas selecionadas para a instalação destacadas em vermelho.

Figura 19 - Vista superior do Hospital das Clínicas da UFPE.

Fonte: Google Earth.

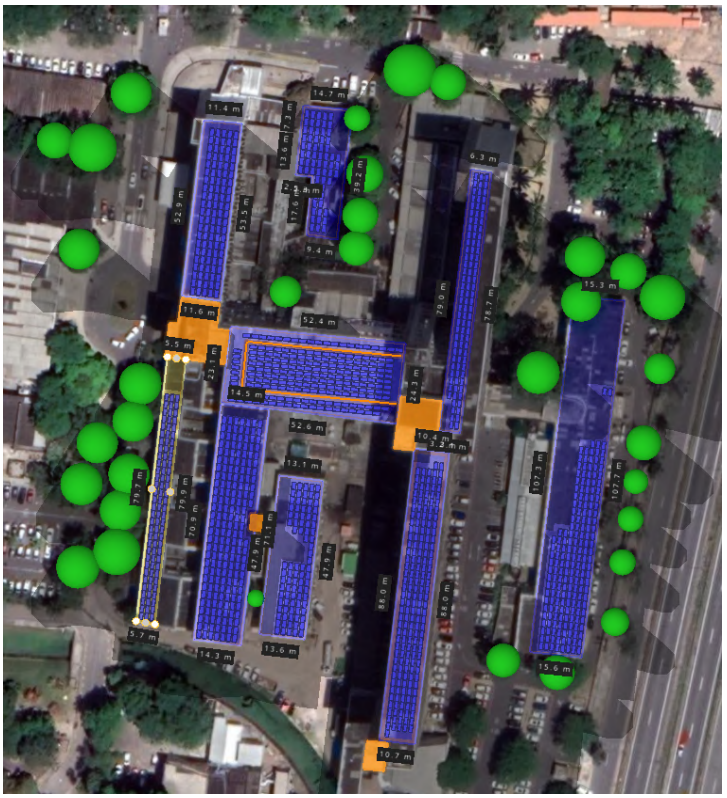
Figura 20 - Planejamento dos segmentos de painéis solares sobre o Hospital das Clínicas.

Fonte: O próprio autor.

Como se constata a partir da figura 20, inicialmente foi proposto nove áreas de telhado para a instalação de segmentos de painéis solares. Contudo, o percentual dessas áreas propostas de instalação que de fato receberá painéis solares irá diminuir consideravelmente por conta de sombreamentos dos diversos prédios do próprio Hospital das Clínicas, assim como as árvores mais altas nos telhados mais baixos do terreno.

Pensando na praticidade e viabilidade de manutenção de um segmento de painéis solares, será proposto a remoção de um segmento por completo da planta solar caso um número muito significativo de painéis solares do mesmo sejam considerados pouco produtivos. Por exemplo, se mais 70% dos painéis solares do segmento 1, esquematizado na figura 20, estiver com eficiência de produção abaixo de 80%, ou seja, perdendo muita potência por sombreamento, é proposto a desqualificação do segmento 1 por completo, de forma a reduzir a quantidade de plantas solares para se manter. Dessa forma, o foco inicial é a entrega da energia elétrica necessária pelo menor número de segmentos de painéis solares possível, buscando trabalhar com menos segmentos, mas com melhor eficiência individualmente.

Figura 21 - Visão superior do projeto da planta solar no Hospital das Clínicas.



Fonte: O próprio autor.

Fazendo o desenho das áreas dos segmentos planejados dentro do HelioScope obtém-se a configuração exposta na figura 21. As regiões em laranja são áreas de obstrução com dimensões e impactos nos painéis solares significativos pela produção de sombreamento. Os círculos verdes são árvores consideravelmente altas ou mais altas do que os segmentos próximos, assim possuindo um sombreamento relevante para a simulação.

Com relação ao projeto dos painéis em cada segmento individualmente, todos os painéis estão alinhados com a lateral leste dos respectivos prédios, com exceção do segmento 5 em que os painéis foram alinhados em direção à face norte da edificação. Além disso, foi dado um distanciamento de 50 cm entre as fileiras de painéis, assim como no perímetro da instalação como um todo. Por fim, com relação a configurações gerais, todos os painéis têm uma inclinação de 8º por recomendação do próprio webseminário do HelioScope, por se tratar da latitude aproximada da posição geográfica do hospital.

Com relação aos modelos de painel solar utilizados, priorizou-se o uso dos painéis da Trina Solar por serem comumente comercializados para esse tipo de instalação no Brasil. Além disso, os painéis da Trina Solar já estão inseridos nos bancos de dados do HelioScope, o que evidentemente facilita a realização das simulações.

Uma vez que cada painel solar possui não somente uma potência média de geração, mas também dimensões variáveis, em que o mais potente geralmente é o maior em termos de dimensões e espaço requerido para instalação. Dessa forma, um painel solar maior irá fornecer mais potência por unidade instalada, mas limita o número total de painéis na planta por conta do espaço maior que o mesmo ocupa. Assim, para cada segmento haverá um ponto equilibrado entre potência e número de painéis possíveis de se construir que dará a maior potência média instalada. Por iteração, os modelos de painéis solares escolhidos para cada segmento estão dispostos na tabela 13.

Tabela 13: Modelo de painel solar escolhido para cada segmento da planta.

Segmento	Modelo de painel solar	Potência do segmento (kWp)
1	Trina Solar TSM-540DE18 (540W)	101,0
2	Trina Solar TSM-540DE18M(II) (540W)	50,5
3	Trina Solar TSM-540DE18M(II) (540W)	91,5
4	Trina Solar TSM-660-DE21 (660W)	43,6
5	Trina Solar TSM-DE 19R 560W (560W)	118,2

Continuação

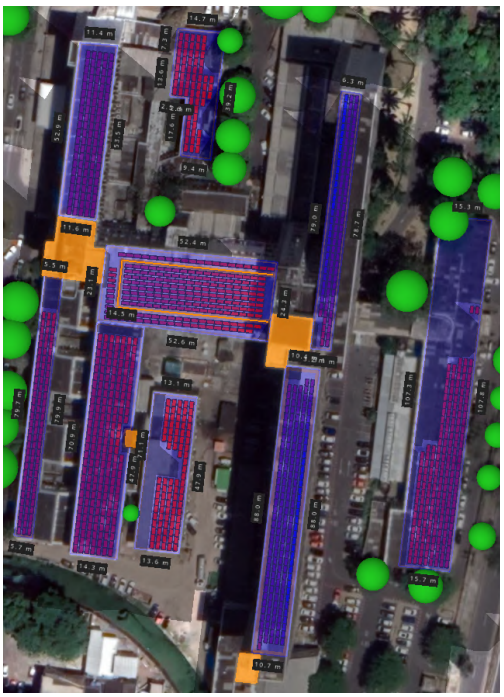
6	Trina Solar TSM-600DE20 (600W)	52,2
7	Trina Solar TSM-660-DE21 (660W)	126,7
8	Trina Solar TSM-660-DE21 (660W)	69,3
9	Trina Solar TSM-500DE18M(II) (500W)	46,5

Fonte: o próprio autor.

Como visto na tabela 13, de maneira a maximizar a potência da planta, todos os painéis solares escolhidos têm entre 500W e 660W, geralmente os segmentos em que os modelos menos potentes foram melhores são aqueles em a redução da dimensão dos painéis possibilitou adicionar uma fileira a mais, assim compensando a redução de potência individual dos painéis solares.

Todos esses cálculos foram feitos com base nos valores tabelados de geração de energia de cada modelo de painel solar junto ao pré-cálculo da energia solar feita pelo HelioScope sem considerar as perdas por sombreamento. Dessa forma, os valores de potência e energia total produzida devem reduzir significativamente em algum desses segmentos após a simulação.

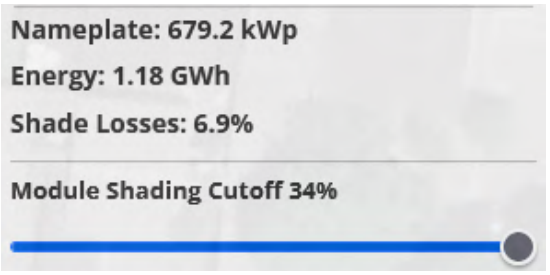
Figura 22 - Simulação da geração anual de eletricidade da planta.



Fonte: O próprio autor.

A figura 22 mostra a vista superior da planta após a simulação, em que os painéis mais vermelhos são aqueles com maior perda de potência devido ao sombreamento. Dessa maneira, à primeira vista, os segmentos 2 e 3 estão com as menores perdas, enquanto os segmentos 4 e 6 apresentam grave percentual de perda de potência ao longo do ano. Além disso, a simulação também fornece a potência de pico da planta e produção de energia anual em GWh. A figura 23 mostra o painel em que tais informações são fornecidas.

Figura 23 - Resultado geral da simulação de desempenho da planta.



Fonte: Adaptado do HelioScope

Além da potência e energia total, é também apresentado pelo HelioScope a perda total da planta por conta de sombreamento, nesse caso é de 6,9%. Não somente isso, mas também é dada a opção de remover qualquer painel solar que tenha perda acima de um determinado percentual, como se pode ver na barra indicada na figura 23, o maior percentual de perda de um painel individual é de 34%.

A partir desse momento, existem duas possibilidades de escolha de projeto. A primeira possibilidade é remover painéis solares com perdas elevadas, até o percentual de eficiência média da planta solar atingir um valor desejado. Por exemplo, remover os painéis mais ineficientes até a perda por sombreamento ser igual ou menor a 5%, ou 4%, assim por diante. Alternativamente, é possível optar por um aprimoramento da eficiência na perspectiva de cada painel individualmente, ou seja, se preocupar primariamente que nenhum painel ultrapasse uma perda percentual, por exemplo, de 15% ou 10%.

Essa escolha de projeto deverá ser tomada levando em consideração a planta de cogeração a biogás e o que a mesma será capaz de entregar ao hospital. Quanto menos energia a planta solar precisar entregar, mais criteriosa será a escolha dos painéis solares a se manter na planta, de maneira a reduzir custos de instalação e manutenção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizado os cálculos preliminares a respeito da capacidade de geração de energia de cada tipo de planta, cogeração a biogás e painéis fotovoltaicos, compila-se agora os principais resultados obtidos.

4.1 BIOGÁS E A PLANTA DE COGERAÇÃO

A tabela 14 mostra a capacidade de geração de energia elétrica através da planta de cogeração a biogás. Esses resultados foram obtidos pela simulação computacional em MATLAB do desempenho do motogerador selecionado.

Tabela 14 - Resultados da simulação de desempenho do motor.

Três motores a diesel do modelo D4BB-AG31			
Potência	Tempo diário	Total mensal	Demanda entregue
141,48 kW	16 hrs	67.910 kWh	65,8%

Fonte: O próprio autor.

Como é possível notar, considerando que toda biomassa recolhida no campus da UFPE seja devidamente processada para se obter biogás, a planta de cogeração é capaz de operar três motogeradores de 47,16 kW de potência cada, por 16 horas diárias por 30 dias. Esse resultado representa 65,8% da demanda estipulada do hospital.

Contudo, como visto anteriormente, o Hospital das Clínicas tem uma demanda energética total de 102.920 kWh, dos quais 15.850 kWh são devido a refrigeração. Dessa forma, é importante checar a viabilidade de operar um *chiller* por absorção a partir da água aquecida pelos gases quentes da exaustão. Primeiramente foi calculada a possibilidade de suprir a demanda de água quente a 50 ºC para a lavanderia do hospital. A tabela 15 mostra o resultado.

Tabela 15 - Produção de água quente (50ºC) para a lavanderia do hospital.

Vazão de água quente	Volume mensal	Demanda atendida
$6,24x10^{-4}\ m^3/s$	$1.080\ m^3$	470%

Fonte: O próprio autor.

Esses valores foram obtidos a partir da vazão mássica de gases quentes a 319ºC de 0,285 kg/s, obtidos através da simulação em Matlab, levando em consideração a operação dos três motogeradores por 16 horas diárias.

A partir desses resultados, foi calculado a vazão de gás necessária para suprir a demanda de água quente de $230\,m^3$. Para, posteriormente, calcular qual a vazão de gases quentes excedentes disponível para o aquecimento da água para o *chiller*. A tabela 16 mostra os resultados obtidos.

Tabela 16 - Vazão de gases da exaustão alocados para cada aplicação.

Vazão mássica para aquecer a água da lavanderia [kg/s]	0,059
Vazão excedente para aquecer a água do chiller por absorção [kg/s]	0,226
Vazão mássica total [kg/s]	0,285

Fonte: O próprio autor.

Assim, tem-se 0,229 kg/s de gases quentes (319ºC) para aquecer o sistema de retroalimentação de água quente necessária para o chiller, que de acordo com o catálogo do fabricante, vai de 83ºC a 88°C. O resultado está disposto na tabela 17 a seguir.

Tabela 17 - Vazão de água quente destinada ao chiller por absorção.

Vazão recomendada $[m^3/h]$	4,3
Vazão mínima $[m^3/h]$	1,29
Vazão fornecida $[m^3/h]$	8,87

Fonte: O próprio autor.

De acordo com o catálogo da Yazaki, o modelo WFC-SC5 necessita de pelo menos 30% da demanda nominal de água suprida para funcionar. Com a vazão nominal requerida plenamente atendida, é capaz de fornecer 17,6 kW durante 16 horas diariamente, enquanto o motogerador funciona.

Dessa forma, o excedente de gases quentes, após entregarem toda a demanda de água quente para lavanderia, é capaz ainda de suprir a demanda de até dois chillers desse mesmo

modelo para a refrigeração do hospital. Por fim, o desempenho máximo da planta de cogeração a biogás pode ser resumido da seguinte forma na tabela 18.

Tabela 18 - Desempenho geral da planta de cogeração.

	Energia entregue mensal [Kwh]	Demanda suprida [%]
Motogerador D4BB-AG3	67.910	66%
Chiller Yazaki WFC-SC5	16.896	16,4%
Total da planta	84.806	82,4%

Fonte: O próprio autor.

Dessa forma, os dois chillers conseguem entregar toda capacidade de refrigeração que o hospital necessita. Além disso, a planta de painéis fotovoltaicos precisará entregar em média cerca de 17.000 kWh ao Hospital das Clínicas.

4.2 A PLANTA DE ENERGIA SOLAR

Sabendo que a planta de poligeração ainda precisa de aproximadamente 18% da sua demanda por energia elétrica suprida, a tabela 19 mostra o resumo de produção energética das diferentes configurações com base no percentual de perdas por sombreamento.

Tabela 19 - Resumo de desempenho das diferentes configurações de painéis solares.

Configuração proposta	Energia entregue média [kWh]	Demanda entregue [%]
Design 1 - 34% de perda	90.750	88,2
Design 2 - 20% de perda	80.516	78,2
Design 3 - 15% de perda	78.792	76,6
Design 4 - 10% de perda	75.008	72,9
Design 5 - 5% de perda	30.208	29,9

Fonte: O próprio autor.

Os valores descritos na tabela 19 correspondem ao total de energia que a planta produz durante o seu horário de funcionamento, entre as 10:00 e 15:00 horas, aproximadamente.

Visto que o Design 5, mesmo sendo o menor em número de painéis e potência instalada, ainda consegue suprir quase o dobro da demanda por eletricidade restante. O que mostra que as propostas iniciais para a planta de energia solar estavam superdimensionadas.

Dessa forma, a configuração de planta de painéis solares escolhida é o Design 5 da tabela 19. A distribuição dos painéis deste design é ilustrada na figura 25.

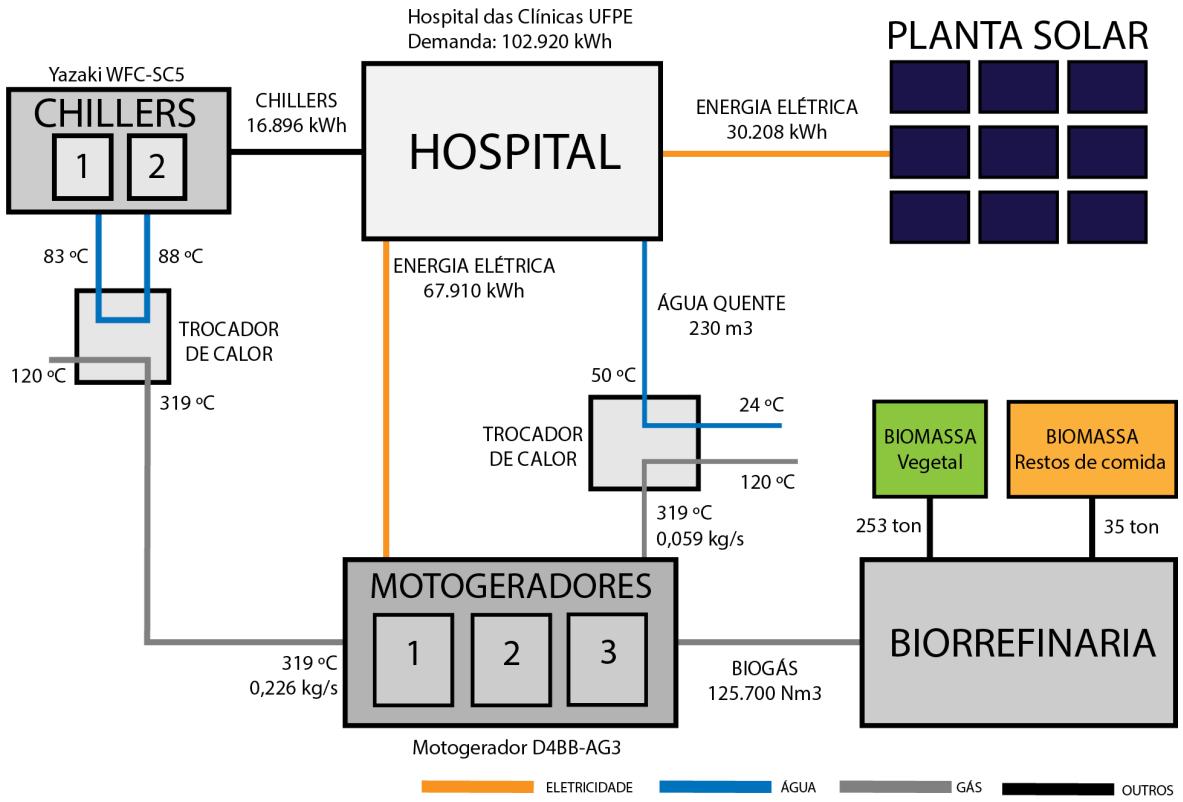
Figura 24: Configuração dos painéis solares do Design 5

Fonte: O próprio autor.

4.3 CONFIGURAÇÃO DA POLIGERAÇÃO

Com os resultados obtidos nas seções anteriores, pode-se agora construir um diagrama resumindo as principais estruturas e capacidades energéticas da instalação de poligeração. A configuração mais eficiente para os fins técnicos da planta está ilustrada na figura 29.

Figura 25 - Arranjo final escolhido para a planta de poligeração.



Fonte: O próprio autor.

Como é possível observar, o conjunto de motogeradores a biogás, painéis solares e os chillers por absorção conseguem atender as demandas do Hospital das Clínicas. Contudo, como foi avaliado na seção de metodologia, a capacidade instalada de produção de biogás a partir da biomassa do campus é muito menor do que o necessário para produzir o volume de biogás capaz de garantir a operação da planta de cogeração proposta.

4.3.1 Outras configurações possíveis

Além da planta descrita na figura 25, é possível ainda estipular outras alternativas que podem ser viáveis, ou até mais eficientes. Como é possível perceber pela a hierarquia de

decisões expostas ao longo da metodologia, a prioridade é atender a maior parcela da demanda hospital possível somente com os motogeradores. Contudo, pode ser mais interessante priorizar a geração de eletricidade através dos painéis solares, ou seja, seria escolhido a maior configuração de planta solar pareada com uma planta de motogeradores menores.

Por outro lado, essa discussão torna-se mais complexa quando é analisada as condições de geração e armazenamento dessa energia. A planta solar é mais limpa e eficiente em gerar eletricidade do que os motogeradores a biogás, porém possuem um tempo de geração diária limitada ao tempo de luz solar. Assim, uma planta de energia solar maior exigiria também um sistema de armazenamento de eletricidade através de baterias bem mais robustas.

Além disso, no momento de escolher um sistema de poligeração, se pode também levar em consideração as redundâncias para assegurar o funcionamento pleno da planta. A configuração final escolhida não possui muitas redundância para além de um excedente de eletricidade oriunda dos painéis solares e o excesso de água quente produzida. Mas seria possível realizar outra avaliação da planta de poligeração já pensando em deixar redundâncias para a segurança do sistema, ao invés de focar somente em suprir a demanda com o menor grupo de geradores possível.

5. CONCLUSÃO

Ao término deste presente trabalho, é possível afirmar que existe na UFPE uma quantidade significativa de biomassa capaz de abastecer uma planta de poligeração para suprir a demanda de um hospital de tamanho considerável, como o Hospital das Clínicas. Contudo, também foi averiguado a necessidade de se ampliar a capacidade de processamento da biomassa a partir da biomassa recolhida no campus, uma vez que a estrutura instalada atual, pelo menos com base no estudo de Sousa (2020), é capaz de produzir mensalmente menos de 5% do volume total necessário para suprir a demanda da planta de cogeração.

Para além disso, a planta de cogeração apresentou resultados bastante satisfatórios, uma vez que sozinha, funcionando diretamente por 16 horas, foi capaz de suprir totalmente a demanda de água quente que o hospital necessitava diretamente, além da refrigeração através dos dois *chillers* instalados. Além disso, ainda foi possível entregar cerca 66% da eletricidade requerida pelo Hospital das Clínicas.

Em relação à planta dos painéis solares, como esperado, foi possível mantê-los como apenas um suplemento para a planta de cogeração, fornecendo cerca de 18% da necessidade por eletricidade restante. Isso condiz com as estimativas iniciais em que a maior parte da energia da planta de poligeração viria do conjunto de motogeradores a biogás. Além disso, ainda foi possível atender todas as necessidades do hospital utilizando uma planta de painéis solares com perdas por sombreamento de 5%.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Primeiramente, há a necessidade de realizar uma avaliação econômica desse tipo de instalação em comparação à instalação convencional de receber a eletricidade em sua totalidade da rede elétrica geral. Isso teria que levar em consideração, não somente os custos dos equipamentos, mas também da instalação, adaptação da infraestrutura do hospital, manutenção e depreciação de tudo envolvido para que se possa chegar a uma resposta mais definitiva sobre o fator econômico da planta, o que foge do escopo deste projeto.

Além disso, é necessário fazer uma análise mais aprofundada sobre a possibilidade de instalação dos painéis solares no Hospital das Clínicas. Deve ser levado em consideração a disposição real da superfície dos tetos e adaptação da malha elétrica dos mesmos para abarcar tal planta de geração.

De maneira semelhante, um projeto mais aprofundado sobre a produção de biogás a partir da biomassa presente do campus UFPE seria de suma importância. Uma vez que o maior obstáculo atual na realização da planta de poligeração proposta é a capacidade de produção de biogás instalada muito baixa.

Por fim, a realização de um novo estudo análogo ao que foi feito neste projeto, mas utilizando os dados reais coletados diretamente do hospital, de maneira a realizar um estudo mais acurado com a demanda real do Hospital das Clínicas.

REFERÊNCIAS

Autonomy System - On-grid Solar Energy System. **Off-grid Energy Australia**, 2021. Disponível em <https://www.offgridenergy.com.au/on-grid-autonomy-power-system/>. Acesso em 27 de julho de 2023.

Balanço Energético Nacional 2022. **EPE**, 2022.

BERNARDES, E. R.. **Viabilidade econômica da geração distribuída com biogás aplicada ao meio rural**. 2020. Tese (Mestrado) - Curso de engenharia elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. C.. Viabilidad Económica de la Utilización de Biogás para la Conversión en Energía Eléctrica. **Información tecnológica**. São Paulo. Vol 22. 2011.

CUDDIHY, J.; BEYERLEIN, S. Development of a multi-zone engine model simulated using MATLAB software. **TranLIVE**. 2014.

DALPAZ, R. **Avaliação do biogás com diferentes percentuais de metano na produção de energia térmica e elétrica**. 2019. Tese (Mestrado) - Curso de sistemas ambientais sustentáveis, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2019.

Diagnóstico anual de resíduos sólidos, 2021. **SNIS**, 2021.

HAKAWATI, R.; SMYTH, B. M.; MCCULLOUGH, G.; ROSA, F.; ROONEY, D. What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?. **Applied Energy**. Belfast. Vol 206. 2017.

HIJAZI, O.; MUNRO, S.; ZERHUSEN, B.; EFFENBERGER, M. Review of life cycle assessment for biogas production in europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Freising. Vol 54. 2015.

KOUHESTANI, F. M.; BYRNE, J.; JOHNSON, D.; SPENCER, L.; HAZENDONK, P.; BROWN, B. Evaluating solar energy technical and economic potential on rooftops in an urban setting: the city of Lethbridge, Canada. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**. Lethbridge. Vol 10. 2019.

MAREFATI, M.; MEHRPOOYA, M.; POURFAYAZ, F.. Performance analysis of an integrated pumped-hydro and compressed-air energy storage system and solar organic Rankine cycle. **Journal of Energy Storage**. Tehran. Vol 44. 2021.

MENG, Q. The impacts of fracking on the environment: A total environmental study paradigm. **Science of the Total Environment**. Starkville. Vol 580. 2017.

MORAN, J. M.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. Principles of engineering thermodynamics. 8. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015

NOAA'S Annual Geenhouse Gas Index. **NOAA**, 2023.

O que é biometano e qual sua utilização na engenharia?. Engenharia 360, 2022.

Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022. **Abrelpe**, 2022.

SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. Q.; TUNA, C. E.; VILLELA, I. A. C.; MIRO, L. S. Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Guaratinguetá. Vol 12. 2012.

Solar Cell Structure. **PV Education**, 2019. Disponível em <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-structure>. Acesso em 27 de julho de 2023.

SOUSA, M. H.; SILVA, A. S. F.; CORREIA, R. C.; LEITE, N. P.; BUENO, C. E. G.; PINHEIRO, R. L. S.; SANTANA, J. S.; SILVA, J. L.; SALES, A. T.; SOUZA, C. C.; AQUINO, K. A. S.; SOUZA, R. B.; PINHEIRO, I. O.; HENRÍQUEZ, J. R.; SCHULER. A.

R. P.; SAMPAIO, E. V. S. B.; DUTRA, E. D.; MENEZES, R. S. C. Valorizing municipal organic waste to produce biodiesel, biogas, organic fertilizer, and value-added chemicals: an integrated biorefinery approach. **Biomass Conversion and Biorefinery**. Recife. 2020.

SURENDRA, K. C.; TAKARA, D.; HASHIMOTO, A. G.; KHANAL, S. K. Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Manoa. Vol. 31. Janeiro, 2014.

SZKLO, A. S.; SOARES, J. B.; TOLMASQUIM, M. T. Energy consumption indicators and CHP technical potential in the Brazilian hospital sector. **Energy Conversion and Management**. Vol 45. 2044.

VILLA, A. A. O.; CAMPOS, R. J. A. C.; DUTRA, J. C. C.; GUERRERO, J. R. H. Numerical study of energetic, exergetic and ecological efficiency in the use of biogas in cogeneration systems. **21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering**. 2011, Natal. Proceedings of COBEM 2011.

Water Fired Single-Effect Chillers and Chiller-Heaters. Yazaki Energy System, Inc. 2023. Disponível em <https://www.yazakienergy.com/waterfired.htm>. Acesso em 10 de agosto de 2023.

What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. **World Bank Group**, 2018.

XIANG, L.; THEOTOKATOS, G.; DING, Y.. Investigation on gaseous fuels interchangeability with an extended zero-dimensional engine model. **Energy Conversion and Management**. Harbin. Vol 183. 2019.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. 2012. Tese (Mestrado). Curso de energia na agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.