

+

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

PAMELA LEIRIA BAGGIO

**ESTUDO DAS TECNOLOGIAS EXISTENTES PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

PAMELA LEIRIA BAGGIO

ESTUDO DAS TECNOLOGIAS EXISTENTES PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Me. César Augusto Portolann

Coorientador: Prof. Me. Dionatan Augusto Guimarães Cieslak

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**Estudo das tecnologias existentes para geração de energia elétrica a partir do biogás**”, do aluno “**Pamela Leiria Baggio**” foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° 147 de 2017.

Fizeram parte da banca os professores:

César Augusto Portolann

Dionatan Augusto Guimarães Cieslak

Andrei Bordignon

Fernando José Avancini Schenatto

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio incondicional.

EPÍGRAFE

Whenever you are asked if you can do a job, tell them, 'Certainly I can!' Then get busy and find out how to do it. (ROOSEVELT, Therodore).

Sempre que lhe for perguntado se você pode realizar um trabalho, diga a eles 'Certamente eu posso!' Então, ocupe-se e descubra como fazê-lo. (ROOSEVELT, Therodore).

RESUMO

BAGGIO, Pamela Leiria. Estudo das tecnologias existentes para geração de energia elétrica a partir do biogás. 2017. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Considerando a variedade de matérias-primas e de topologias disponíveis para a geração de energia elétrica a partir do biogás, verifica-se uma carência na literatura de uma análise das possíveis topologias de sua implementação. Nesse contexto, o estudo proposto tem por principal objetivo a caracterização das tecnologias existentes. Para isso, será realizada uma análise de aspectos relacionados a potência típica e do rendimento do biogás considerando o uso de motores de combustão interna, turbinas a gás, microturbinas a gás e células combustíveis. Com estes aspectos, objetiva-se avaliar as opções com base nos recursos disponíveis em cada propriedade. Cada topologia apresenta rendimento esperado em intervalo dependente da capacidade de geração do equipamento. A combinação das tecnologias otimiza o rendimento do sistema e o uso do combustível cuja concentração conforme a matéria-prima. Ainda, todo o sistema deve ser analisado para que o biogás seja utilizado de forma a gerar energia elétrica de maneira eficiente.

Palavras-chave: Geração de energia. Energia renovável. Biogás.

ABSTRACT

BAGGIO, Pamela L. Review of existing technologies for electricity from biogas. 2017. X f. Electrical Engineering course final project, Technological University of Parana. Pato Branco, 2017.

Considering the variability of feedstock and topologies currently available for electricity generation using biogas, there is a lack in the literature of an analysis paper presents a comparative analysis among the possible topologies of its implementation. In this context, the main purpose study is characterizing the existing technologies. For this, an analysis of aspects related to a typical power and efficiency of generating biogas considering combustion engines, gas turbines, micro turbines and fuel cells. With those aspects, it aims to evaluate the available options based on the resources available in each property. Each topology presents a performance on an expected interval independent of the generating capacity of the equipment. The arrangement of more than one technology optimizes the performance of the system and the fuel use, fuel which concentration is variable according to the raw material. So, the entire system should be analyzed in order to use biogas as an efficient way to generate electric energy.

Keywords: Energy generation. Renewable energy. Biogas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de revisão sistemática	20
Figura 2 - Diagrama Esquemático dos processo de conversão energética da biomassa	23
Figura 3 - Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo indiano.....	31
Figura 4 - Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo chinês.....	31
Figura 5 – Vista em corte do biodigestor desenvolvido pela marinha do Brasil	32
Figura 6 - Principais métodos de utilização do biogás	33
Figura 7 - Comparativo entre tipos de motores de combustão.....	35
Figura 8 - Esquema simplificado de um sistema de turbina a gás	38
Figura 9 - Representação de uma região de célula combustível do tipo SOFC	43
Figura 10 - Diagrama de funcionamento de uma célula combustível do tipo SOFC	46
Figura 11 - Diagrama esquemático de um gerador síncrono de ímã permanente	50
Figura 13 – Diagrama esquemático de gerador de indução.....	51
Figura 14 – Categorização de acordo com o tema das revistas técnicas	61
Figura 15 - Data de publicação dos artigos	62
Figura 15 - Percentual da quantidade de artigos por topologia analisada.....	62
Figura 16 - Variação da eficiência em relação a potência resultantes da revisão sistemática	70
Figura 17 - Relação entre potência e eficiência elétrica para unidades inferiores a 100 kW	70
Figura 18 - Relação entre potência e eficiência elétrica para 100 a 500 kW	72
Figura 19 - Relação entre potência e eficiência elétrica superior a 500 kW	72
Figura 20 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência da microturbina a gás	73
Figura 21 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência de motor combustão interna.....	75
Figura 22 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência de MCI de ciclo Otto	76
Figura 23 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência de turbina a gás..	77
Figura 24 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência de células combustíveis	78
Figura 25 - Diagrama do sistema híbrido - MCFC e microturbina a gás	84
Figura 26 - Configuração para sistemas híbridos isolados com barramento único ...	88
Figura 27 - Esquema de controle centralizado de microrrede	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Palavras-chave e resultados, por base acadêmica	18
Tabela 2 - Percentual de metano de acordo com a matéria-prima geradora	25
Tabela 3 - Expectativa de produção de biogás	26
Tabela 4 - Equivalente energético a 1 m ³ de biogás	29
Tabela 5 - Padrões para o uso de biogás combustível em diferentes países	59
Tabela 6 - Quantidade de artigos de acordo com a faixa de potência	60
Tabela 7 - Eletricidade e calor gerado a partir de 11340 MJ de biogás	69
Tabela 8 - Custo da produção de energia para diferentes combustíveis	86

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CV	Certificado verde
FC	Fuel cells
GD	Geração distribuída
GI	Gerador de indução
GIAE	Geradores de indução auto-excitado
GS	Geradores síncronos
GSIP	Geradores síncronos de imã permanente
HCCI	Homogeneous charge compression ignition
IEC	International electrotechnical commission
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
MCFC	Molten carbonate fuel cells
MCI	Motor de combustão interna
MR	Microrrede
MTG	Microturbinas a gás
NPBD)	National project on biogas development
PC	Poder calorífico
Prisma	Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses
RGE	Recirculação do gás por meio de um exaustor
SC	Super capacitor
SOFC	Solid oxid fuel cells
TG	Turbinas a gás
TRH	Tempo de retenção hidráulica
UTC	United technologies company

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4 ESTRUTURA	15
2 METODOLOGIA	16
2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA	17
3 CONVERSÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS	22
3.1 FORMAÇÃO DO GÁS	23
3.2 PURIFICAÇÃO DO GÁS	26
3.3 GERAÇÃO DE ENERGIA	29
3.4 TOPOLOGIAS	33
3.4.1 Motores à Combustão	33
3.4.2 Turbina a Gás	37
3.4.3 Microturbinas a gás	40
3.4.4 Células Combustíveis	42
3.5 GERADOR	47
3.5.1 Geradores Síncronos	48
3.5.2 Geradores De Indução	50
4 BIOGAS NO MUNDO	54
5 ANÁLISE DA GERAÇÃO	63

5.1	QUALIDADE DO BIOGÁS	64
5.2	PERFORMANCE DE GERAÇÃO	66
5.3	COMPRESSÃO	79
6	MODO DE OPERAÇÃO	81
6.1	COGERAÇÃO.....	81
6.2	SISTEMAS ISOLADOS	85
6.3	MICRORREDE	86
6.4	CONTROLE DO SISTEMA.....	89
7	CONCLUSÕES.....	93
	REFERÊNCIAS.....	95
	APÊNDICE A.....	105

1 INTRODUÇÃO

A partir do processo de industrialização o consumo de energia aumentou, em especial, de energia elétrica, a qual se consolidou como essencial para a sociedade e o seu desenvolvimento. Deste modo, fez-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para a geração de energia elétrica, objetivando atender à crescente demanda de forma técnica, econômica e ambientalmente sustentável. A energia elétrica pode ser gerada por meio de diversas tecnologias de conversão, das quais se destacam as usinas termoelétricas e usinas hidroelétricas. Nas termoelétricas, a energia provém da queima de combustíveis fósseis, geralmente derivados do petróleo, convertendo a energia química, presente nas moléculas das substâncias incineradas, em energia elétrica por meio de alguma tecnologia. Este tipo de geração gera resíduos como óxido de enxofre e óxido de nitrogênio, fazendo com que esta seja considerada a mais poluente das formas de geração. Por outro lado, na geração hidroelétrica, a energia elétrica não provém da energia química, mas da energia potencial hidráulica proveniente de um desnível, ou ainda do fluxo de água de um rio. Para isso, a água represada deve possuir um desnível capaz de proporcionar o movimento das pás de uma turbina. Este movimento é capaz de gerar energia elétrica deste que acoplado as turbinas à um gerador (PRATI, 2010).

Atualmente, os aspectos sociais e ambientais são de grande importância para o planejamento energético de um país. Os efeitos de décadas da utilização dos combustíveis provenientes do petróleo como fonte de energia são apresentados em relatórios técnicos, e estes relatórios indicam uma situação emergencial com relação principalmente à temática ambiental. De acordo com Lindemeyer (2008), o comportamento dos países em relação às questões ambientais mudou a partir de conferências mundiais, como por exemplo as conferências de Estocolmo, realizada em 1972, a do Brasil, em 1992 e a de Quioto, em 1997 (LINDEMEYER, 2008).

Nesse contexto, em prol da redução de impactos ambientais, a geração de energia elétrica a partir da biomassa afigura-se como uma fonte de energia moderna e promissora. A geração a partir da biomassa apresenta possibilidades ao uso de materiais não provenientes de petróleo englobando os resíduos sólidos urbanos, resíduos animais, agroindustriais, biocombustíveis líquidos e material de floresta como licor negro, lenha e carvão vegetal. No Brasil, a geração de energia elétrica a partir de

biomassa tem uma potência outorgada de 14.321 MW, o que corresponde a cerca de 8% da capacidade instalada no país (BIG, 2016).

Dentre as fontes disponíveis para a geração de energia elétrica a partir da biomassa, a utilização do biogás permite a utilização de materiais que outrora eram descartados tornando-os combustíveis por meio da sua decomposição. Assim, proporcionando inclusive uma alternativa para a redução da emissão de gases poluentes. Quanto ao desenvolvimento de tecnologias empregadas, o processo de conversão do biogás em combustível engloba a geração através de motores a combustão interna, turbinas a gás, microturbinas e ainda por meio da utilização de células combustíveis (VELÁSQUEZ, *et al.*, 2005).

1.1 JUSTIFICATIVA

Verifica-se a existência de tecnologias diversas para a geração de energia elétrica a partir do biogás. Todavia, de maneira geral, os estudos apresentados pela literatura a respeito deste tipo de conversão de energia elétrica não apresentam um método de escolha entre as opções disponíveis para projeto. Em geral, os estudos limitam-se a uma análise de viabilidade técnica e/ou econômica de uma planta geradora que utiliza determinada topologia associada a determinada matéria-prima. Desse modo, considerando que há uma variedade de matérias primas e de topologias disponíveis, verifica-se uma carência na literatura de análises comparativas entre as possíveis topologias de implementação de uma planta geradora de energia elétrica a partir do biogás.

Nesse contexto, o estudo proposto tem por principal objetivo analisar as topologias existentes para a geração de energia elétrica a partir do biogás, por meio da caracterização de cada modo de geração. Para isso, será realizada uma análise da capacidade de geração de cada tecnologia, dos aspectos relacionados a potência típica e energia gerada, do rendimento do biogás considerando diferentes matérias-primas, dentre outros quesitos que sejam julgados relevantes. Assim, este trabalho contribuirá para o aumento da confiabilidade na implementação de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás. Com isso, objetiva-se contribuir para com grandes e pequenos produtores a avaliarem as opções disponíveis de

tecnologias existentes para a geração de energia elétrica com base nos recursos disponíveis em suas propriedades.

A região Sudoeste do Paraná tem sua economia dependente da agricultura, assim como de indústrias relacionadas ao agronegócio. A região destaca-se na produção de feijão e milho, e como maior produtora em volume de leite do estado do Paraná. Ainda, a região é grande produtora de carne suína e de aves. Com este perfil econômico, a realidade da região apresenta alta concentração de agricultores e produtores rurais cujas propriedades dispõem de matéria prima suficiente para aplicar a geração de energia a partir do biogás. Além da geração de energia elétrica, é possível aproveitar o biogás como combustível à geração de energia térmica e em sistemas de resfriamento por absorção. Possibilitando, assim, um aproveitamento de materiais orgânicos como estrume de animais, resíduos de silagem e palha, que normalmente são descartados, para a geração de energia (FAEP, 2014).

1.2 OBJETIVO GERAL

Caracterizar as principais tecnologias existentes para geração de energia elétrica a partir do biogás.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para uma eficiente execução deste trabalho, pretende-se atingir os seguintes objetivos:

1. Compreender o processo de conversão de energia a partir do biogás;
2. Apresentar um panorama da atual utilização de biogás como fonte de energia no Brasil e no mundo.
3. Analisar a capacidade de geração de energia elétrica de acordo com a composição química das matérias-primas geradoras do biogás.
4. Pesquisar o rendimento e geração de energia elétrica média considerando os diferentes tipos de combustíveis e as diversas tecnologias de geração.

5. Obter informações sobre as tecnologias para cogeração através do uso do biogás.
6. Descrever o modo de operação de produtores com geração isolada ou com o sistema conectado à rede de distribuição de energia elétrica.

1.4 ESTRUTURA

A metodologia utilizada na realização deste trabalho é apresentada no capítulo 2, visando a compreensão do leitor do procedimento de revisão sistemática realizado neste trabalho. O capítulo 3 visa a descrição do processo de formação do biogás, e a estrutura necessária para que este possa ser utilizado como fonte de energia. Assim, o processo de conversão de energia é compreendido entre a matéria-prima e o biogás gerado. Além disso, este capítulo inclui a apresentação das topologias existente para converter o biogás em combustível para a geração de energia elétrica. O capítulo 4 ilustra a situação atual, a partir da revisão sistemática, da utilização da geração de energia a partir do biogás no mundo. O capítulo 5 demonstra a capacidade que esta fonte tem de transformar o biogás em eletricidade apresentando o desempenho de cada topologia quando aplicada a geração com o biogás. O capítulo 6 apresenta os modos de operação possíveis e utilizados em cada caso incluindo os sistemas isolados, microrredes e sistemas híbridos.

2 METODOLOGIA

A topologia, ou a tecnologia de geração a ser implementada em uma planta geradora como motor primário, deve ser escolhida de modo que atenda aos parâmetros necessários de seu funcionamento. Entre estes parâmetros destaca-se a demanda e o menor custo para instalação e operação possível à esta planta geradora. De modo similar a demanda da escolha de configuração, para Mardani et al. (2016) em uma escolha entre múltiplos critérios deve se considerar que o objetivo da pesquisa não condiz com a individualidade destes critérios, logo, o resultado é dependente das preferências do pesquisador durante a realização de sua pesquisa. Não importa o quão grande é o entendimento prévio do assunto, ou o modo para encontrar uma solução, decisões devem ser tomadas com embasamento em um processo de tomada de decisão. Uma das abordagens é o método decisório multicritérios, cuja metodologia combina as informações de custo-benefício e as perspectivas para cada alternativa de projeto. De modo mais específico, a proposta deste autor baseia-se na metodologia *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (Prisma)*, em sua tradução literal Itens de Relatórios Preferidos para Análises Sistemáticas e Meta-Análises, de Liberati Moher. Esta metodologia proporciona que a revisão sistemática, para áreas que possuem um vasto acervo, seja realizada com a priorização das publicações (MARDANI, et al., 2016).

Além das preferências estabelecidas pelo método Prisma, outras ideias podem ser aplicadas às revisões sistemáticas de pesquisa. Garcez (2016) defende o propósito de que para um resultado genuíno deve-se tomar uma decisão baseada em mais de um critério. O uso do conceito de multicritério justifica-se pela possibilidade de resultados inconsistentes quando apenas um critério é considerado em uma pesquisa literária. Garcez (2016) apresenta o método de revisão sistemática que utiliza a formulação de questões e métodos de localização e análise quantitativa. O autor defende que não é apenas uma vasta revisão bibliográfica, mas uma seleção e inclusão de trabalhos que estimem pela qualidade do trabalho proposto. O segredo é encontrar um método que possa ser mensurado, afim de comprovar sua validade. Em décadas passadas, muitos estudos focaram em desenvolver opções na teoria/prática para o desenvolvimento destes métodos. Atualmente, o desafio mudou para que o estímulo de projetos e processos de atividade humanas sejam implementados em prol

do desenvolvimento sustentável global. Os fatores considerados para a revisão sistemática devem ser técnicos, institucionais e incluírem a resolução dos problemas encontrados durante a implementação de alguma topologia. As incertezas e complexidades levariam a dinâmica de revisão a amplitude indesejadas. A revisão sistemática apresenta resultados a partir da descrição das topologias utilizadas para a geração de energia elétrica a partir do biogás. Além de uma visão geral das pesquisas encontradas até a data de realização deste trabalho, a revisão sistemática que utiliza a meta análise integra abordagens estatísticas sobre as pesquisas encontradas de modo que os resultados, ainda que falhos ou incertos, contribuam para uma revisão clara da literatura (GARCEZ, 2016).

2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

A pesquisa de trabalhos deve ser feita em bases renomadas para que a aplicação da revisão sistemática apresente resultados concretos para a escolha da topologia aplicada. A coleta de dados realizou-se em busca de literatura nas bases *ScienceDirect*, *Web of Science*, *Scopus* e *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, grande acervo literário para engenharia e tecnologia. Para amplificar a gama de resultados, foi utilizado a língua inglesa para as palavras-chave a serem pesquisadas devido à padronização da língua inglesa em publicações internacionais. Desta forma, espera-se maior abrangência em conhecimentos na área do que se a pesquisa fosse realizada em português. Os trabalhos que apresentassem os aspectos técnicos como a tecnologia implementada, conexão à rede e localização da planta, foram analisados. Existem quatro etapas segundo proposto por Mardani (2016): Identificação, Triagem, Elegibilidade e Inclusão. Estas etapas foram tomadas como base, e estarão descritas no decorrer desta seção (MARDANI, *et al.*, 2016).

2.1.1. Identificação

Num primeiro momento, os trabalhos precisavam ser buscados em alguma base científica. As bases para a metodologia foram *Scopus* e *Web of Science*. Ambas foram selecionadas pelo reconhecimento como acervo de literatura interdisciplinar e muitos trabalhos na área de pesquisa acadêmica. As palavras-chaves escolhidas

foram combinações do tema biogás em subáreas microturbinas, turbinas e gás e motores a combustão e foco em energia e engenharia. Logo, os termos de pesquisa foram: *biogas + microturbines*, *biogas + gas turbines* com *subject area: Energy and Engineering*, *biogas + combustion motor* ou *biogas + combustion engine*.

A linha do tempo selecionada para os arquivos foi entre o ano de 2001 e 2017. Este intervalo foi escolhido porque o interesse por tecnologias para a geração de energia a partir de fontes renováveis aumentou a partir desta data, assim como o interesse pela geração distribuída e microrrede em todo o mundo, de modo geral. A partir desta data, o aquecimento global e consequências do efeito estufa se tornaram evidentes, o que levou às pesquisas a buscar soluções as suas causas (GARCEZ, 2016).

A Tabela 1 apresenta um sumário dos resultados obtidos para as diferentes combinações permitindo a identificação dos resultados da revisão sistemática. A coleta de dados e a análise, como um processo inter-relacionado, levou à organização dos artigos por meio de codificação. Esta codificação é flexível e foi adaptada no decorrer das análises. A princípio, procurou-se identificar artigos que indicassem o estudo ou desenvolvimento de alguma topologia relacionado ao biogás. Esta identificação leva à segunda fase da revisão sistemática, a triagem.

Tabela 1 - Palavras-chave e resultados, por base acadêmica

Base	Idioma	Palavra(s)-chave(s) utilizada(s)	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Scopus	English	Tópico: (biogas) AND TITLE-ABS-KEY (microturbine)) AND PUBYEAR > 2000	36	24	6
		Tópico: (biogas) AND (gas turbine)) AND DOCTYPE(ar OR cp) AND PUBYEAR > 2000 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI"))	232	64	38
		(TITLE-ABS-KEY (biogas) AND TITLE-ABS-KEY (combustion AND motor) OR TITLE-ABS-KEY (motor AND engines)) AND DOCTYPE (ar OR cp) AND PUBYEAR > 2000	40	13	7
Web of Science	English	(biogas) AND Tópico: ((microturbine) OR (gas turbine) OR ((motor) AND (combustion)) OR ((combustion) AND (engines))) Tempo estipulado: 2001-2017. ENGINEERING	259	47	26
		(biogas) AND (electricity OR (energy AND generation)) AND Tópico: (((off-grid) OR (grid-connected))) Tempo estipulado: 2001-2017.	37	11	8
Total			604	159	85

Fonte: Autoria própria.

2.1.2 Triagem

Todas as referências foram organizadas no *software Mendeley*, programa de organização de referências com diversos recursos, como a conferência de duplicatas entre os arquivos. Nas duas bases foram encontradas 17 duplicatas, ou seja, possuíam mais de uma vez o artigo como resultado de duas combinações de palavras chaves ou com informação referente ao artigo de formatação dessemelhante, estas ficaram excluídas das referências. Após a eliminação das duplicatas, os documentos passaram pelo processo de triagem que consistiu na análise do título e do resumo do trabalho. A partir esta leitura, pode-se observar quais trabalhos estavam relacionados a proposta e quais não possuíam foco que contribuiria para a pesquisa. Portanto, nesta etapa foram eliminados artigos não relacionados ao tema proposto, como a geração de energia a partir de biomassa diferente de biogás ou estudos com relação às características termodinâmicas do material e não ao seu aproveitamento como fonte de energia. Aqueles considerados relevantes, durante a etapa de triagem foram mantidos trabalhos como artigos de periódicos, publicações em conferências ou publicações em revistas técnicas relacionadas ao tema. Logo, foram excluídos trabalhos referentes a revisões de livros, capítulos de livros e teses. Após a triagem, o número de artigos foi reduzido para 159. Após este processo, os artigos seriam analisados na íntegra na etapa de elegibilidade.

2.1.3 Elegibilidade

Os documentos de acordo com as palavras-chave utilizadas foram revisados pelo título do trabalho e pelo resumo apresentado. Após a etapa de triagem, os artigos foram lidos na íntegra para compreensão do trabalho como um todo. Os artigos com enfoque em desenvolvimento de aspectos termodinâmicos ou apenas estudo econômicos sobre o uso de alguma topologia para geração de energia a partir do biogás não foram considerados. Os artigos foram tabelados considerando a proposta e solução apresentada pelo trabalho, assim como a topologia utilizada e suas respectivas informações de publicação. Após a elegibilidade, os artigos foram

repassados para a etapa de inclusão, em que 85 apresentaram informações relevantes para o trabalho e foram excluídos 74 trabalhos.

2.1.4 Inclusão

Os artigos que passaram pela etapa de elegibilidade foram incluídos na revisão sistemática. Nesta etapa, artigos que desenvolviam alguma simulação ou aplicação de geração de energia a partir do biogás foram selecionados para a fase de análise de artigos. Foram escolhidos trabalhos de revistas e publicações em periódicos entre energia renováveis, aplicações de energia e energia limpa. O número de trabalhos ao final desta etapa foi de 85. A Figura 1 apresenta um diagrama com as fases da revisão sistemática realizada e o número de artigos em cada fase.

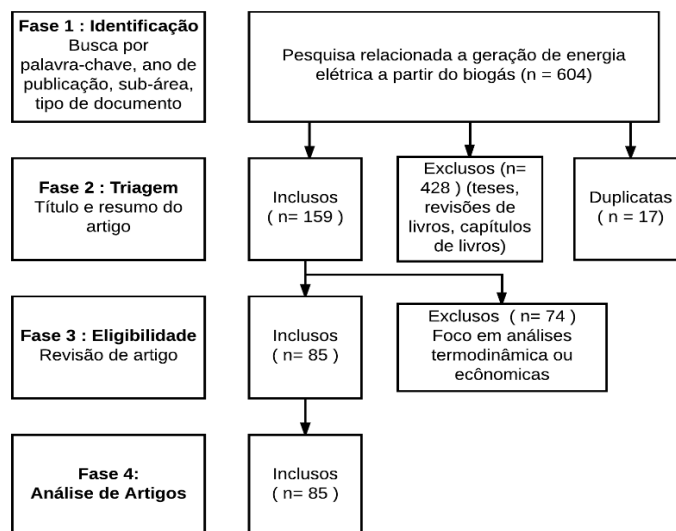


Figura 1 - Diagrama de revisão sistemática
Fonte: Autoria própria.

2.2 Categorização

A relação entre a coleta de dados e as análises são processos relacionados entre si, logo, deve existir alguma codificação, ou organização destes dados obtidos. Em prol da organização deste trabalho, a categorização baseou-se em critérios de identificação do trabalho como topologia analisada pelo trabalho, data e local de publicação do trabalho, ano de publicação e proposta de trabalho. Além disso, a

categorização inclui o modo de operação e parâmetros de rendimento e capacidade de geração obtida em casa trabalho.

3 CONVERSÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS

O processo de conversão de energia refere-se ao processo em que alguma forma de energia é convertida para outra. Devido ao desenvolvimento da sociedade, tanto demográfico como econômico, a demanda por energia elétrica é crescente. Assim, faz-se necessário que haja o incentivo de busca de novas tecnologias para a conversão de energia possibilitando o fornecimento de energia de acordo com a crescente demanda. Para a geração de energia elétrica, por exemplo, a conversão pode prover de recursos renováveis ou não renováveis, como os combustíveis fósseis. De um modo geral, embora seja um processo poluente, que gera resíduos como metano e óxidos de carbono, o uso de materiais fósseis para a geração de energia é considerado convencional, uma vez que representa grande parte da geração de energia elétrica no mundo. Deve-se destacar que, por se tratar de reservas limitadas, os combustíveis fósseis não estarão disponíveis para atender à crescente demanda energética mundial. Com isso, o atual panorama indica o desenvolvimento de estudos e pesquisas para que as energias renováveis contribuam de forma integral de acordo com a capacidade de cada local (PRATI, 2010).

Verifica-se que a busca constante por fontes alternativas de energia, têm se intensificado no mundo todo, tanto em países desenvolvidos quanto em emergentes. O uso destas fontes contribui para a redução da poluição do ar, do solo e dos recursos hídricos, comparados com o uso de combustíveis fósseis. Dentre estas fontes, o Brasil explora a geração hidroelétrica em seu vasto território, mas também deve considerar como alternativa o elevado potencial de aproveitamento de outras fontes como a energia eólica, a energia solar e a energia proveniente da biomassa. O aproveitamento indireto da luz solar para a geração de energia elétrica é observado na energia eólica, assim como a hidráulica ou a biomassa. A energia eólica é proveniente da energia cinética dos ventos convertida através de turbinas eólicas em energia cinética de rotação. Enquanto que a radiação solar utiliza materiais fotovoltaicos ou termoelétricos para a geração de energia, ou ainda, pode-se aproveitar a radiação para o aquecimento de fluidos e ambientes. A geração a partir da biomassa caracteriza-se pela utilização de qualquer material que tenha componentes que se decompõem por efeito biológico. Dada as dimensões do Brasil,

entende-se que o aproveitamento das fontes alternativas contribui para a geração renovável no país (ANEEL, 2005).

A biomassa permite o aproveitamento direto de acordo com a matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. O uso da biomassa se dá pela combustão direta, processos termoquímicos ou processos biológicos como mostrado na Figura 2. Materiais considerados biomassa velha, como madeiras e palhas, geralmente é utilizada para gerar energia térmica, ou seja, calor, a partir da combustão destes materiais. Uma das formas de aproveitamento é a digestão anaeróbica e fermentação, exemplos de artifícios biológicos, utilizados em biomassa nova, como o estrume, resto de alimentos e dejetos orgânicos (ANEEL, 2005).

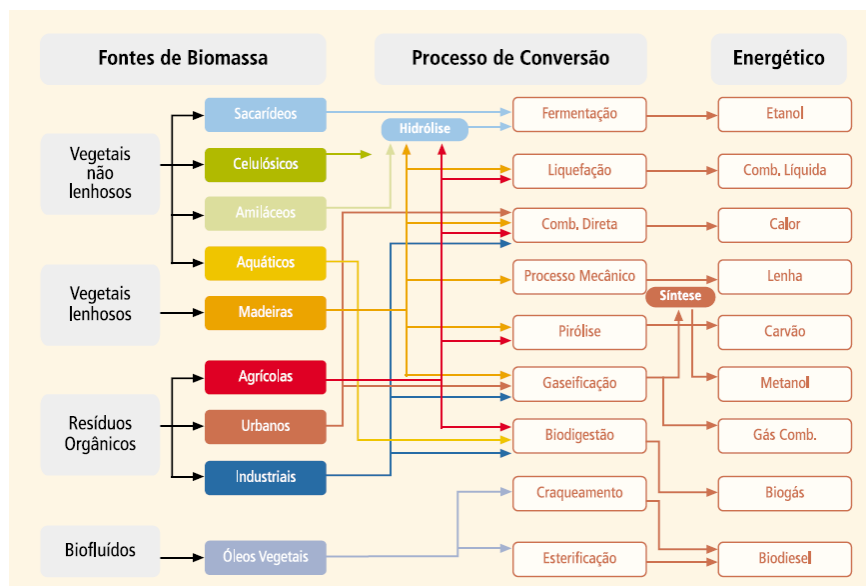


Figura 2 - Diagrama Esquemático dos processos de conversão energética da biomassa

Fonte: ANEEL (2005, P. 11)

3.1 FORMAÇÃO DO GÁS

Quando a deterioração da matéria orgânica acontece em um ambiente livre de oxigênio, ocorre a chamada fermentação anaeróbica, resultando em um gás composto basicamente por gás carbônico (CO_2), metano (CH_4), e vapor de água (H_2O). Além de outras substâncias em pequenas quantidades, variantes de acordo com a matéria-prima geradora, que incluem gases como hidrogênio (H_2), e componentes do ar como nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e sulfureto de hidrogênio

(H₂S). O volume do biogás é representado pelo peso específico, a relação entre densidade do material e a densidade do ar. Esta relação é inversamente proporcional, apresentando níveis de concentração mais alta de CH₄ para menores valores de peso específico. O metano tem capacidade de reter o calor irradiado para fora da Terra cerca de 21 vezes maior do que a capacidade do CO₂, ambos gases liberados pelo material orgânico quando a decomposição ocorre em local aberto (FERRAREZ, 2009).

Segundo estudos de Nishimura (2009), a decomposição da matéria orgânica acontece em quatro etapas principais. A primeira destas etapas é a hidrólise, responsável pela redução do material em moléculas menores. Esta redução faz-se necessária para que as moléculas menores consigam agir junto das bactérias fermentativas hidrolíticas essenciais ao processo. Esta etapa pode ser chamada de liquefação em outros estudos, como em Lindemeyer (2008). Na segunda etapa, chamada de acidogênese, ocorre a transformação dos compostos resultantes da hidrólise por ação de bactérias fermentativas acidogênicas. Estas bactérias transformam moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos em ácidos orgânicos liberando ácido propanoico, butanoico e láctico, assim como gás carbônico e hidrogênio. Ao fim da segunda etapa, ocorrerá a terceira etapa chamada acetogênese. Tal etapa é responsável pela oxidação do material resultante da segunda etapa produzindo elementos como hidrogênio, dióxido de carbono e acetato. Esta é uma das fases mais delicadas pois é necessário manter o equilíbrio para o hidrogênio ser consumido pelas bactérias da próxima etapa. A quarta etapa deste processo é denominada metanogênese, ou seja, a última etapa de degradação da matéria orgânica por ação de bactérias metanogênicas (LINDEMEYER, 2008) (NISHIMURA, 2009).

De acordo com o resíduo a ser processado pela digestão anaeróbica, existem fatores que devem ser considerados para calcular a quantidade de biogás que será gerada. A composição química, ou seja, a composição da matéria orgânica contida no resíduo contribui de forma considerável para o rendimento e vazão do biogás. Para que a geração de biogás seja bem-sucedida, é preciso que exista uma combinação entre materiais fonte de nitrogênio, como dejetos animais e folhas verdes, e materiais com fontes de carbono, como cascas de árvores e palha. De modo que esta combinação forneça relação de carbono para nitrogênio mantida em 20:1. Além disso, o ambiente em que a decomposição irá ocorrer possui fatores a serem considerados. O teor de água e a temperatura do material orgânico devem manter-se

em determinados níveis. Dentro do biodigestor, a quantidade de água deve ser de 60 a 90% do peso total da matéria orgânica. Quanto a temperatura, existem intervalos ideais para cada tipo de bactérias. Assim, um intervalo de temperatura ideal para a reprodução das bactérias, entre 40 e 60 °C, é a faixa ideal para a produção do biogás. A impermeabilidade do ar garante que a decomposição não gere apenas dióxido de carbono, como aconteceria se esta ocorresse na presença de oxigênio (PRATI, 2010).

A produção diária de dejetos, ou seja, da biomassa animal que será transformada em gás, varia de acordo com o tipo de matéria-prima geradora do biogás. As matérias-primas utilizadas para gerar biogás são estrume de animais, como gado, aves, suínos, além dos resíduos vegetais e orgânicos como esgoto e aterros sanitários. A Tabela 2 apresenta o resultado obtido em análises de vários autores em matérias-primas distintas. Observa-se que uma mesma categoria de matéria prima pode apresentar um percentual diferente, como os resíduos de aterro sanitário cujo percentual de CH₄ resultou níveis de 45 a 62,6%. O mais alto percentual de CH₄ foi encontrado na mistura de 75% de resíduos orgânicos e 25% de estrume de gado, igual a 75% do biogás composto por este gás. Embora a silagem de milho tenha um nível de metano mais baixo do que os outros materiais, esta fonte foi estudada por diversos autores pois é um material de grande volume de resíduos em propriedades rurais. Nestas propriedades, constitui-se uma oportunidade de aproveitamento para a geração de energia elétrica e economia aos produtores (BARUA et al., 2013).

Tabela 2 - Percentual de metano de acordo com a matéria-prima geradora

Autores	Mathah et al. (2012)	Barua et al. (2013)	Fung, Zabihian (2013)	Santos, Nardi (2013)	Curry, Pillay (2014)	Goulos, Kontokostas, Stamatis (2014)	Assadi et al. (2014)
Matéria-prima							
Estrume de gado	55			55	60	57	
Estrume de aves	70			Variável	60	60	
Estrume de suínos	65		63	50	60 - 65		
Silagem de milho	51				52	54	
Resíduos vegetais	52				54	60	60 - 70
Esgoto			61,5		60		55 - 65
Aterro sanitário	60		62,6		50		45 - 55
Resíduos vegetais (75%) misturados a esgoto (25%)		58					
Estrume de aves (75%) e de gado(25%)		66					

**Resíduos orgânicos
(67%) e estrume de
gado(33%)**

75

Fonte: Autoria própria.

Da produção de dejetos, a expectativa de produção de biogás quanto ao rendimento por espécie animal são apresentados na

Tabela 3. A média de produção de dejetos para bovinos e equinos é de 10 kg por dia, suínos tem produção média de 2,25 kg, enquanto as aves produzem cerca de 180g por animal. Verifica-se que a percentual de CH₄ presente no biogás varia de acordo com a alimentação do animal. Além disso, observa-se que animais confinados tendem a produzir quantidades maiores de metano comparando suínos, que ficam confinados, à equinos que não ficam. De modo geral, além das fezes de bovinos, suínos e aves, outras matérias orgânicas podem ser matérias-primas para a produção de biogás como: resíduos de abatedouros, cervejarias, vinícolas, esgoto e soro de queijo. Estes tipos de dejetos são alvos de estudos para análise de viabilidade de implantação de sistemas de geração a partir do biogás. O resultado desta análise é dependente de fatores como quantidade de dejetos a ser processado, características físico-químicas que influenciem no potencial de geração de biogás, e também do tipo de biodigestor e tecnologia utilizada para geração (SANTOS; NARDI, 2013).

Tabela 3 - Expectativa de produção de biogás

	Aves	Suínos	Bovinos	Equinos
Dejetos (kg/dia)	0,18	2,25	10,00	10,00
Produção de biogás (m³/t)	285	560	270	260

Fonte: Adaptado de Santos e Nardi (2013, p. 83 – 84).

3.2 PURIFICAÇÃO DO GÁS

O biogás em sua forma natural possui componentes que não são desejáveis, cujas características não combustíveis impactam na eficiência energética ao utilizar o biogás ao seu utilizado. O nível de purificação do biogás é diretamente proporcional ao valor agregado a ele, e aumenta à medida que se reduz as impurezas presentes no gás. Quando o nível de impurezas é mínimo, a concentração de metano do biogás ultrapassa 95% e o biogás passa a ser chamado de biometano. Fatores como volume, poder calorífico e umidade do biogás gerado devem ser melhorados

para que a geração energia seja otimizada de acordo com as particularidades do biogás. Este melhoramento, na literatura internacional chamado de *upgrading of biogas*, é considerado o estado da arte para esta fonte de energia permitindo a melhor manipulação do biogás e alta flexibilidade para seu uso. O processo de *upgrading* inclui a remoção do CO₂, considerado a etapa principal, e componentes como H₂S, retirada da umidade e compressão do biogás (HARASEK; MAKARUK; MILTNER, 2016).

Dentre as impurezas, a presença de água torna o processo que use o biogás menos eficiente, visto que se houver a presença na combustão, incidirá na absorção de parte da energia gerada. Os gases sulfídricos são considerados impurezas presentes no biogás, cujas características corrosivas limitam o poder calorífico do gás e seu rendimento térmico. Mesmo com baixa concentração no biogás, o H₂S é extremamente tóxico quando a concentração ultrapassa 50 mg/l, e causa sufocamento interno e irritação nas mucosas quando inalado, podendo ocasionar um edema pulmonar imediato ou tardio. A combinação de H₂S ao vapor de água forma o ácido sulfúrico prejudicial aos componentes e motores instalados, assim, reduzindo a eficiência dos estágios (NISHIMURA, 2009).

Para a remoção das impurezas, existem diversos processos que viabilizam o uso do biogás para a geração de energia. A combinação de gases presentes no biogás, como o H₂S ao vapor de água compromete a utilização do biogás por causar oxidação em componentes de motores e tubulações. Por isso, as usinas de biogás realizam processos de purificação, como depuração e dessulfurização do biogás gerado. A depuração incide na remoção dos componentes indesejáveis, como a água, que gera umidade no interior dos equipamentos. A dessulfurização, por sua vez, consiste em procedimentos à remoção do H₂S contido no biogás gerado. Objetiva-se nestes processos que o biogás atinja níveis de metano elevados e umidade mínima, conforme a destinação subsequente do biogás. De acordo com as necessidades de projeto, deve-se analisar o consumo energético de cada processo de purificação, assim como os níveis de pureza e as desvantagens de cada procedimento (ROHSTOFFE, 2010).

Um dos processos para a retirada de H₂S do biogás é a lavagem bioquímica. Este processo utiliza a soda cáustica diluída para a absorção do H₂S, sendo um dos métodos mais antigos para a dessulfurização de um gás, em um biodigestor e separador de enxofre. A reação bioquímica do H₂S com bactérias, faz

com que o sulfeto oxide e proceda em enxofre puro. Em casos de usinas de menor porte, cujo fluxo de biogás seja inferior à $500\text{Nm}^3/\text{h}$, recomenda-se a retirada do H_2S por meio químico com adição de componentes de ferro. O biogás passa pelo interior de um material ferroso, como palha de aço e uma reação natural transforma em enxofre o H_2S . Ainda, existem processos de dessulfurização com a utilização de carvão ativado, em que a dessulfurização se dá pela oxidação do sulfeto na superfície do carvão. A importância da dessulfurização se dá, pois, a contaminação de H_2S , ainda que ínfima, impacta negativamente no desempenho do sistema. Além desta, ainda é importante que hajam processos de secagem, processo de retirada do vapor de água, e remoção do dióxido de carbono, para o qual o processo mais conhecido é a lavagem com água sob pressão (KUNZ; OLIVEIRA, 2006)

O processo para remoção de CO_2 resulta em alta eficiência da planta geradora pois contribui para o aumento do poder calorífico do biogás. Contudo, os custos de manutenção do processo serão viáveis para percentuais inferiores a 20% de CO_2 , como no estudo apresentado por Garcia-Gutierrez et al. (2016) em que o uso de um material resultava num custo reduzido e ainda considerado altamente eficiente. Porém, o custo de aquisição é considerado elevado por exigir que haja compressão do biogás. Ainda neste estudo, os autores sugerem que a remoção do CO_2 se torna vantajosa economicamente quando ocorre com pressão de 20 bar. Quando a pressão é maior do que este valor, embora a capacidade de absorção aumente, o processo de remoção não é compensatório pelo aumento do custo de sua implantação e também do consumo de energia elétrica pelo compressor. Por outro lado, reduzindo-se a pressão para 10 bar compromete-se a capacidade de absorção do sistema. O valor estimado do consumo de eletricidade pode ser estimado com simulação computacional da demanda de energia do *driver* correspondente à demanda de consumo do compressor do biogás (GARCIA-GUTIERREZ et al., 2016).

Artigos como a pesquisa de Ga e Nam (2015), apresentam contribuições para a definição de parâmetros para uma estrutura específica de geração de energia. Os autores apresentam os efeitos que a percentagem de CO_2 tem na eficiência de uma planta geradora. Quanto maior a percentagem, menor a eficiência do sistema. Embora as condições de operação possam favorecer a eficiência do processo, é necessário que seja dosada a quantidade de cada gás para que o processo de combustão ocorra de acordo com a o desempenho estabelecido para a tecnologia utilizada (GA; NAM, 2015).

3.3 GERAÇÃO DE ENERGIA

A geração de energia elétrica a partir do biogás é independente de condições climáticas, ao contrário da energia solar ou eólica. Quando comparada a outras fontes de energia, o biogás se destaca pelas vantagens ambientais incluindo aproveitamento dos resíduos outrora descartados para a geração de energia elétrica. Para que o biogás, gerado pelo processo de decomposição da matéria orgânica, seja utilizado como fonte de alternativa de energia elétrica, este processo deve ocorrer dentro de um biodigestor acoplado a algum tipo de gerador. Biodigestor é basicamente um sistema de mecanismos que fornecem as condições necessárias para que determinadas bactérias realizem a degradação anaeróbica da matéria orgânica. Ainda, o biodigestor deve permitir a estabilização esta matéria orgânica (SILVEIRA; VILLELA, 2005).

O processo de conversão deste tipo de matéria prima compara-se a geração com outros tipos de combustível como a gasolina, o álcool, o óleo cru, o gás natural ou ainda o carvão. Verifica-se, conforme apresentado na Tabela 4, a energia contida em 1m³ de biogás puro é equivalente a 0,098 m³ de gasolina, 0,134 m³ de álcool, e 1,50 m³ de gás natural. Em média, Lindemeyer indica, em seus estudos, que 1 m³ de biogás seja capaz de gerar 2,21 kW/h de energia elétrica (LINDEMEYER, 2008).

Tabela 4 - Equivalente energético a 1 m³ de biogás

Combustível	Quantidade equivalente
Gasolina	0,098 m ³
Álcool	0,134 m ³
Óleo cru	0,072 m ³
Gás Natural	1,50 m ³
Carvão	1,51 m ³

Fonte: Adaptado de Lindemeyer (2008, p. 35).

A aplicação da geração a partir de biogás em áreas urbanas e rurais desafiam cientistas e engenheiros a desenvolver biodigestores eficientes para a produção e armazenamento do biogás. A produção de biogás é relativamente simples e opera em qualquer condição climática. Desde que manipulada adequadamente, não oferece riscos à saúde humana ou ao meio ambiente. O design do biodigestor varia de acordo com a localização geográfica, disponibilidade da matéria-prima e condições climáticas a que estará exposto. Os modelos de biodigestores mais conhecidos são o

modelo chinês e o modelo indiano provenientes de países que demonstraram interesse por esta fonte de energia. O interesse da Índia em desenvolver esta fonte alternativa de energia deu-se pela insuficiência de combustíveis fósseis atreladas a um país baseado em sistemas de castas que provoca muitas divergências entre a sociedade. O governo chinês interessou-se em biogás pela alternativa à geração de energia em caso de ataques aos geradores nucleares, na época em que ocorria a Guerra Fria. Além disso, a China incentiva a produção rural e como consequência a utilização de biodigestores em todo o país. Em meados de 2012, existiam mais de 30 milhões de unidades na China e 3,9 milhões na Índia; outros países com números consideráveis são o Nepal, com 200 mil unidades e Bangladesh com 60 mil unidades geradoras de biogás (ASLANZADEH; RAJENDRAN; TAHERZADEH, 2012).

O modelo indiano para biodigestor caracteriza-se pela parede divisória entre o tanque de fermentação, dividindo-o em duas câmaras. O biodigestor de modelo indiano é considerado de fácil construção e deve ser abastecido com concentração de sólidos inferior a 8% para facilitar a circulação dos resíduos, considerado material semilíquido. O fluxo da matéria orgânica inicia na caixa de entrada que é conectada à parte inferior da primeira câmara, indicada na Figura 3 por *mixing pil*. O material circula por todo interior da câmara de fermentação, devido a existência da parede divisória impedindo que ele passe ao outro lado. Dessa forma, todo o material circulará até a outra câmara aonde está conectada a caixa de saída para o lodo conforme indica *outlet for digested slurry* na parte superior direita da Figura 3. Na parte superior do biodigestor, existe um gasômetro que armazena o volume de gás produzido até que este seja utilizado, indicado por *gas delivery* na parte superior central da Figura 3. Este gasômetro desloca-se de acordo com o volume de material para que a pressão no interior da câmara seja constante. Este movimento reduz as perdas durante o processo de produção do gás. Caso o biogás seja usado diariamente, este modelo de biodigestor deve ser contínuo, assim, sugere-se que seja alimentado por dejetos que apresentem certa regularidade (PRATI, 2010).

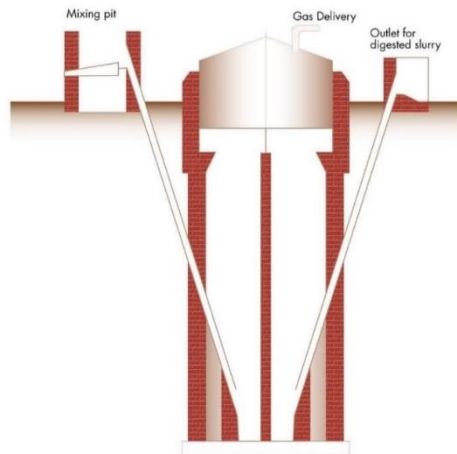


Figura 3 - Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo indiano

Fonte: Lanka Biogas (2017, P. 2)

O modelo chinês, constituído quase que totalmente em alvenaria, é formado por uma câmara cilíndrica para a fermentação da matéria orgânica, indicada por *Fermentation unit* na Figura 4. O biodigestor de modelo chinês difere do indiano pois este, baseado em uma prensa hidráulica indicada por *Floating drum*. A câmara de fermentação não possui uma parede divisória, e terá a pressão interna aumentada conforme houver acúmulo de biogás no seu interior, ou seja, não funciona com pressão constante no seu interior. Este aumento de pressão fará com que o material seja deslocado para a caixa de saída. Como não possui gasômetro, embora tenha custos reduzidos quando comparado ao modelo indiano, este modelo apresenta limitações. Na caixa de saída, há uma parcela de gás a ser liberada para a atmosfera limitando o uso para instalações de grande porte. Podem ocorrer vazamentos de biogás caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada (ASLANZADEH; RAJENDRAN; TAHERZADEH, 2012).

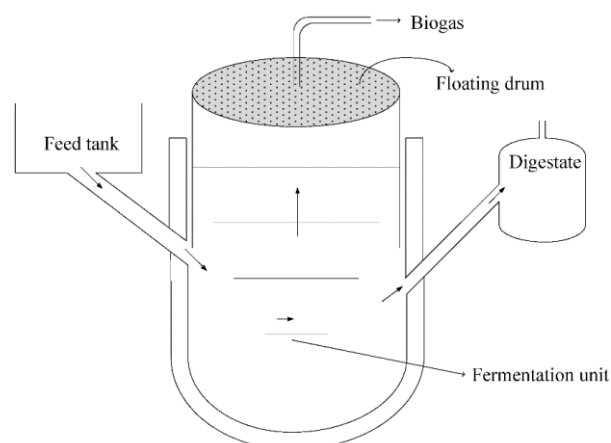


Figura 4 - Vista frontal, em corte, do biodigestor modelo chinês

Fonte: Aslanzadeh, Rajendran, Taherzadeh (2012, P. 2917)

Existem modelos diferentes de biodigestores, principalmente no Brasil, onde um modelo desenvolvido pela Marinha do Brasil é bastante difundido. Este modelo apresenta uma base retangular, com paredes revestidas por lona impermeável conforme mostrado na Figura 5. É um modelo raso e longo, que permite maior produtividade por massa fermentada, porém, limita-se pelo espaço físico requerido à sua instalação. Devido a profundidade pequena, precisa de grande área superficial para que consiga armazenar uma grande quantidade de resíduos. A difusão no país deu-se pela confecção da manta impermeável com policloreto de vinila, apresentando custo reduzido e maior facilidade de instalação comparando o modelo aos modelos de 50 metros, necessitando um compressor caso seja. Apresenta maiores riscos no início da operação, devido ao risco de misturar-se ao oxigênio das cargas de dejetos. Assim, não se utiliza a primeira liberação de produção do biogás, e deve se seguir corretamente os procedimentos iniciais de manter os registros fechados por questões de segurança (PRATI, 2010).

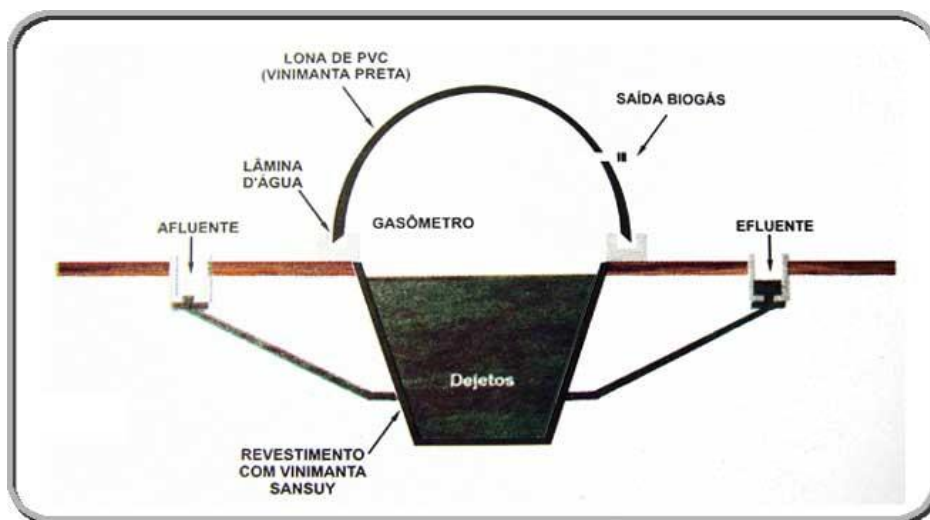


Figura 5 – Vista em corte do biodigestor desenvolvido pela marinha do Brasil
Fonte: Prati (2010, P. 31)

O biogás após passar pelo processo de purificação pode ser aproveitado diretamente em redes de gás, como motor ou por meio da combustão direta. Caso seja utilizado diretamente, pode ser introduzido na rede pública ou mantido em rede privada para cozinhar em vilas afastadas, por exemplo. Em combustão direta, considera-se o seu uso para aquecimento de ambientes ou de água, assim como a produção de vapor, produção de frio por meio de sistema de refrigeração por absorção, secagem de grãos como o milho e em turbinas a gás ou células combustíveis conforme indica o fluxograma da Figura 6 (COLDEBELLA, 2006).

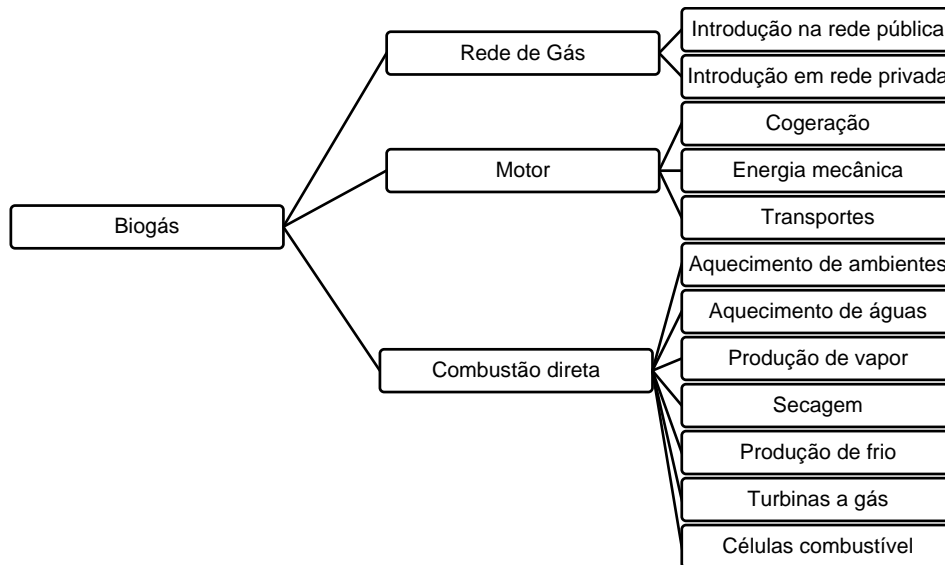


Figura 6 - Principais métodos de utilização do biogás
 Fonte: Coldebella (2006, P. 30).

3.4 TOPOLOGIAS

A produção de biogás pode ser aproveitada em diferentes métodos de geração ou uso de energia como em redes de gás, motores ou em combustão direta. O uso de combustão direta, por meio de MCI como por exemplo o de ciclo Otto, é uma das topologias mais utilizadas. Porém, esta não é a única tecnologia que existe para que o biogás seja utilizado como combustível para a geração de energia elétrica. Além dos MCI, existem equipamentos com topologia para o uso de dois tipos de combustíveis, microturbinas a gás e motores Stirling (COLDEBELLA, 2006).

As topologias analisadas neste trabalho incluem os motores de combustão interna, células combustíveis, turbinas e microturbinas a gás. Cada topologia apresenta características específicas que de funcionamento e estrutura, descritas nesta seção.

3.4.1 Motores à combustão

Uma das formas de conversão da energia química presente o biogás, para fornecer energia elétrica, incluindo a geração de pequena capacidade, é o uso

motores à combustão interna como motores primários. Esta tecnologia emprega a expansão de gases para exercer trabalho mecânico empurrando um pistão dentro de um cilindro. O movimento linear do pistão converte-se em movimento rotativo de um virabrequim, transformando a energia em energia mecânica. MCI podem operar com ignição à compressão, ignição por centelha, ou um modelo híbrido entre o primeiro e o segundo modelo. As maiores indústrias desta topologia estão localizadas nos Estados Unidos, cujas marcas principais são CAT, fabricada pela Caterpillar Incorporadora, Jenbacher e a Waukesha, ambas marcas produzidas pela corporação General Electric (GE). Estas incorporadoras fornecem MCI entre 1100 e 4400 kW com eficiência elétrica de 30 a 42% e com disponibilidade de 90 a 96%. Os fornecedores garantem vida útil entre vinte e oito, e noventa mil horas para os MCI (BRAUN; TRENDEWICZ, 2013).

O primeiro modelo de MCI, caracterizado pela ignição por compressão, é também conhecido como MCI de ciclo diesel. Este tipo de motor apresenta uma eficiência térmica considerável e relativamente baixos níveis de emissão de hidrocarbonetos. Uma das vantagens deste tipo de motor é a sua capacidade de operação com altos níveis de compressão, assim, permitindo que combustíveis alternativos como o biogás sejam usados em sua operação. O segundo modelo são os MCI de ciclo Otto, que utilizam a ignição por centelha, ou uma faísca, que inicia a queima no interior da câmara de combustão do motor. O modelo híbrido de motores, do inglês *Homogeneous charge compression ignition* (HCCI), é reconhecido por modelos que comprimem a mistura de ar-combustível, com autoignição para o início da queima. Os três modelos são apresentados na Figura 7 indicando o ponto de inserção do combustível e o local de início da queima no processo de combustão (VISAKHAMOORTHY et al., 2012).

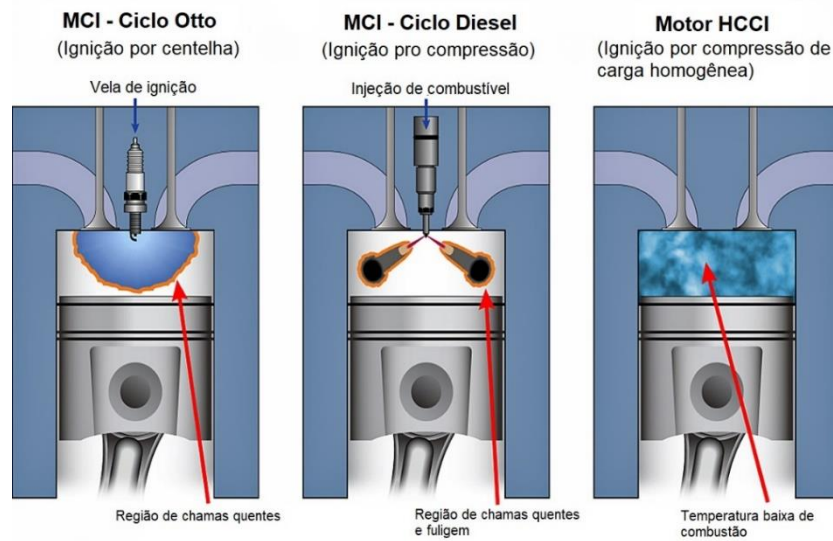


Figura 7 - Comparativo entre tipos de motores de combustão
Fonte: Kitchen, Kyle (2016, P.1)

Modelos HC-CI destacam-se como modo alternativo para a geração do biogás. Conforme supracitado, este modelo opera com ignição por compressão do volume completo da mistura ar-combustível, conforme características de MCI de ciclo diesel, simultaneamente com um alto volume de combustível no interior da câmara de combustão, conforme características de MCI de ciclo Otto. Deste modo, a taxa de compressão será alta e atinge-se o ponto de autoignição da mistura. Neste modelo, a carga é diluída em quantidade grande de ar, resultando em queima de baixa temperatura em vários pontos do cilindro, inferiores a 1600 °C comparadas a máxima de 2200 °C. Além deste modelo, pode-se utilizar o modelo de combustão do inglês *flameless* que reduz a emissão de componentes indesejados e enriquece a eficiência de conversão. A combustão *flameless* aplica pré-aquecimento ao combustível oxidante e ao gás de retorno. Assim sendo, é esperado dos motores HC-CI apresentem alta eficiência térmica permitindo o uso de variedade de combustíveis ainda que com baixo poder calorífico (BUDZIANOWSKI, 2016).

O uso do biogás em MCI pode ser observado em unidades geradores de pequeno porte entre 50 e 2000 kW de potência. Para usinas de pequena escala, este tipo de motor pode ter problemas se o biogás variar demais sua composição. Nestas aplicações em pequena escala, existem motores que apresentam eficiência, confiabilidade e flexibilidade que possibilitem a geração de energia, os motores *stirling*. Motores *stirling* diferem dos MCI tradicionais, considerando que a fonte de calor necessária para a operação é provida por outro sistema. Com uma fonte externa,

melhora-se a eficiência do processo facilitando o controle do sistema, e gerando emissão de substância poluentes a níveis mínimos (BRANDONI, CRENZI, 2014).

Devido ao fato que emitem gases classificados como poluentes, o uso de MCI de ciclo diesel é regulado de maneira mais restrigente. Como alternativa, a indústria de motores preocupou-se em melhorar o sistema de exaustão permitindo o uso de outros combustíveis. Para que os combustíveis gasosos, como o biogás, operem motores a diesel faz-se necessário que estes funcionem em modo de duplo combustível. Isso quer dizer que, o biogás necessita uma pequena quantidade de algum combustível líquido que funcione como a ignição. De modo geral, o combustível é induzido a combustão pela mistura de O_2 e combustível no interior da câmara de combustão. Todavia, o biogás apresenta alta octanagem e não entrará em combustão. Assim, uma das alternativas é que o uso de pequena quantidade de diesel, injetado a mistura como um combustível piloto, permitindo que a combustão da mistura ocorra. Além do diesel, outros materiais que necessitem temperatura similar para iniciar combustão podem ser utilizados como combustível piloto. A eficiência do motor depende do fluxo de biogás e o combustível piloto utilizado (MUSTAFI; RAINE; VERHELST, 2013) (MOHANTY; MOHANTY; RAY, 2013).

Os motores do tipo *Stirling* são compostos por um ciclo fechado em que o gás de trabalho é comprimido alternadamente entre um cilindro frio e expandido em um cilindro quente. Este sistema tem um número de componentes móveis menor do que um MCI tradicional, sendo assim mais silencioso e requerendo manutenção reduzida. A eficiência elétrica de unidades de cogeração com esta topologia está entre 20% e a eficiência total do sistema pode atingir níveis como 45%, para níveis de pressão entre 2 e 2,2 bar. Os gases combustíveis que saírem do motor *Stirling* tem temperatura alta o suficiente e contêm energia suficiente para serem utilizados para cogeração. Além disso, esta topologia fornece alternativa para otimização do uso do combustível, neste caso o biogás, independente da conexão ou não a rede. Os limites impostos pela estrutura do motor, de acordo com a potência de saída não divergem em grande escala em se tratando de resoluções por minuto, temperatura de inserção de calor, combustível e eficiência elétrica, quando compara-se motores de 3 W e 30 W (PETRECCA; PRETO, 2010) (BEDOYA et al., 2012a).

Em motores HCCL, a qualidade da mistura ar-combustível, anterior ao processo de combustão, é determinante das características de combustão. Isto difere dos MCI de ciclo Otto ou diesel, nos quais a propagação da chama e o processo de

vaporização são dominantes. A autoignição dos HCCI ocorre em algumas reações padrões que podem ser caracterizadas pela faixa de temperatura. Uma das recentes inovações em controle de motores HCCI é a ignição controlada por reatividade, como se fosse um MCI de apenas um combustível. A estratégia é combinar a injeção em múltiplas direções e criar regiões de diferentes reatividades do combustível (BEDOYA; SAXENA, 2013).

3.4.2 Turbina a gás

Outra topologia existente são as turbinas a gás (TG) para a exploração de fontes renováveis como motores primários para a conversão de energia do combustível à ser transferido para um gerador. Esta topologia inclui desde um sistema de combustão direta, de baixa eficiência e altos níveis de emissão de carbono, até sistemas sofisticados, em combinações com menores índices de emissão de gases poluentes e mais eficientes. Pode ser integrada a sistemas com geração a partir da biomassa, radiação solar e hidroelétricas. Têm a abrangência mais vasta entre as topologias estudadas cuja capacidade de geração varia entre 600 kW e 22 MW. As indústrias *Solar* e *Kawasaki* dominam o mercado das TG (BRAUN; TRENDEWICZ, 2013).

A operação básica de TG inicia com a entrada do ar por um compressor apresentada no ponto (1) da Figura 8. Existe uma configuração padrão para o ar da saída deste compressor, segundo a Organização Internacional de Normalização (ISO), cujas características são 101,3 MPa de pressão, 288 K (aproximadamente 15°C), e 60% de umidade relativa, temperatura e pressão elevadas em relação ao ambiente. Este fluxo de saída, indicada pelo ponto (2), entra na câmara de combustão, onde o combustível é injetado e a combustão ocorre em pressão constante. A mistura de ar-combustível se expande e gera energia térmica e energia cinética, que movimentam as pás das turbinas. A turbina, assim como o compressor, está acoplada a um eixo longitudinal que conecta o sistema ao gerador. A energia parcial convertida em trabalho pelas pás é usada no compressor, e a energia cinética restante é transferida para o gerador. Os pontos 1, 2, 3 e 5 constituem o ciclo termodinâmico *Brayton* (OKOROIGWE; MADHLOPA, 2015).

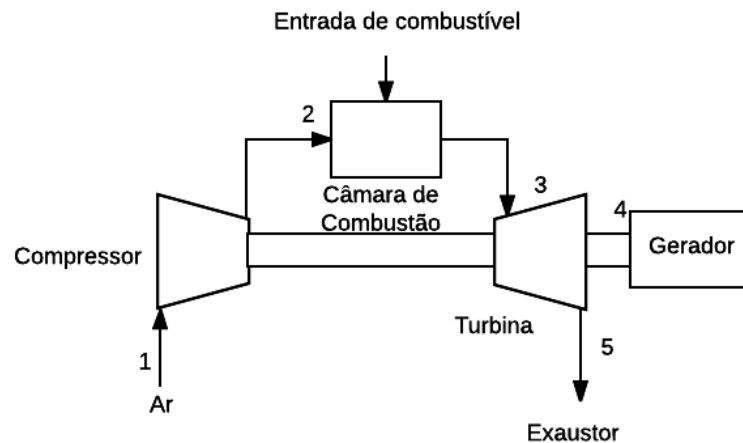


Figura 8 - Esquema simplificado de um sistema de turbina a gás

Fonte: Adaptado de Okoroigew, Madhlopa (2015, P. 1)

Em ciclos combinados de TG, utiliza-se também turbinas a vapor para um aproveitamento favorável do combustível. Uma vez que o biogás passou pelas etapas do ciclo *Brayton*, a alta temperatura do fluxo de exaustão resultante na saída da turbina pode ser aplicada de duas maneiras. O calor pode ser utilizado quando este é introduzido em um ciclo *Rankine* para gerar vapor de alta pressão, ou ainda, reaquecer este vapor. Este ciclo usa combustíveis orgânicos, não apenas o biogás, e apresenta nível de conversão de calor-eletricidade. O gás de exaustão em alta pressão pode ser utilizado por uma turbina a vapor de média pressão. Do mesmo modo, o vapor extraído do reaquecimento da turbina de média pressão pode ser utilizado em sequência por uma de baixa. Ainda, o vapor extraído de uma turbina de baixa pressão pode ser vacuolizado, condensado e reciclado para ser utilizado novamente. A classificação das turbinas em três grupos de acordo com o nível de tecnologia de componentes em baixo, médio e alto nível de tecnologia. Em trabalho de León e Martín (2016) que utilizou estas turbinas nos três diferentes níveis, o nível de eficiência das turbinas é igual a 84, 86 e 88% para os níveis baixos, médio e alto, respectivamente. Este sistema só é compensatório, considerando o investimento inicial de mais de uma turbina, em situações em que o seu uso é constante. Assim, o sistema é aplicado em unidades geradoras de larga escala em que a fonte de calor é superior a 300 kW. Em unidades menores, a eficiência do sistema não é considerada compensatória diante do investimento inicial, que se aproxima de 60% do custo de investimento de um motor *stirling*, por exemplo (LEÓN; MARTÍN, 2016).

Quanto às instabilidades, a combustão do biogás fora, num primeiro momento, limitada a aplicações específicas ou experimentos de sistemas aerodinâmicos. Atualmente, o tamanho de uma turbina a gás depende da matéria-prima utilizada e a demanda de potência requerida na saída da turbina. A instabilidade deste sistema, é relativa à proporção da mistura ar-combustível e a estrutura que a câmara de combustão oferece para a chama. Quanto ao formato da câmara de combustão, existem duas possibilidades de formato denominadas ômega e plana. Embora a câmara ômega tenha um consumo maior de combustível, o calor gerado é mantido pois neste modelo não há troca de calor com as paredes como em uma câmara plana. Por outro lado, a combustão gera uma turbulência no interior do modelo ômega, o que faz com que, a temperatura tenha um valor superior ao plana. Consequentemente, a pressão interna de uma câmara ômega é superior a pressão em uma câmara do tipo plana. O tempo de ignição deve ser programado para que a pressão do cilindro esteja dentro do ciclo de trabalho e não influencie negativamente no desempenho do motor (GA; NAM, 2015).

As TG podem ter um sistema de operação simplificado, admitindo que o gás de exaustão é descarregado na atmosfera e ar fresco e gelado é inserido no compressor. Neste ciclo, o calor do gás de exaustão é aproveitado em aplicações térmicas, cerca de 1 a 2% da capacidade de conversão do combustível é desperdiçada em calor, e 30 a 40% convertido em energia cinética ao eixo. Mas também, considerando a possibilidade de maior aproveitamento do combustível, existem turbinas que funcionam com ciclo combinado, isto é: geração de energia térmica e elétrica. Neste modo, o fluido é recuperado após passar pelo ponto (5), indicado na Figura 8, passando por um trocador de calor e retornando ao ponto (1). Além deste ciclo fechado, duas ou mais turbinas podem ser acopladas ao sistema definindo uma recuperação do calor com turbinas a gás. O princípio é utilizar o gás de exaustão da primeira turbina, o fluido passa por um trocador de calor transformando seu calor em energia para uma segunda turbina. Isto é possível pois nenhum motor de combustão utiliza mais do que 50% da energia do combustível, permitindo o uso combinado para que a eficiência atinja um valor superior à 50% (OKOROIGWE; MADHLOPA, 2015).

3.4.3 Microturbinas a gás

Uma das topologias que podem ser alimentadas com o biogás são as microturbinas. Conforme a demanda necessária, unidades geradoras podem ser adaptadas com MTG modulares, comercializadas em módulos separados com capacidade entre 30 e 250 kW. Os maiores fabricantes de MTG são Capstone, que fornece modelos 30 a 60 kW, Nissan, modelos de 2,6 kW, Eliote, com modelos de 100 kW para cogeração, e a Ingersol-Rand, oferecendo modelos com variedade de potência de 70 a 250 kW. A combustão que ocorre para esta topologia tem temperatura baixa comparada a outras topologias, não só, as MTG abrangem vários níveis de capacidade de geração com baixos índices de emissão de gases poluentes (AULT; RASUL; SAJJAD, 2015).

A grande maioria das MTG produzidas e comercializadas são projetadas para o uso de gás natural. Para que uma MTG utilize o biogás como combustível, é necessário que alguns aspectos da estrutura sejam ajustados de acordo com o tipo de biogás a ser utilizado. Quando a troca de combustível ocorre, se faz necessário o uso de um volume maior de combustível quando se utiliza biogás, do que quando usado o gás natural. Assim, há um impacto no comportamento da MTG do mesmo modo que em seu desempenho de operação. O compressor precisa operar em condições diferentes do funcionamento original, com um fluxo maior de combustível. Todavia, esta diferença de fluxo não é muito significativa quando utilizado compressores centrífugos e fluxo de combustível menor do que o fluxo de ar que circula no interior da turbina. Ademais, MTG tem capacidade de operação em diferentes velocidades, para compensar estas adversidades (ASSADI, *et al.*, 2014).

Em geral, os sistemas de geração com MTG incluem um compressor, uma câmara de combustão e uma roda de microturbina, de modo similar à um sistema para TG apresentado na Figura 8. Diferem-se, portanto, em relação à demanda para a qual são projetadas, e assim sua capacidade de geração, a capacidade de MTG é reduzida comparada a TG. O compressor tem como função comprimir o ar ambiente, que está em pressão atmosférica, para alta-pressão. No interior da câmara de combustão, o combustível é queimado para a produção dos gases de alta pressão em alta velocidade. A microturbina afluente a energia contida no fluxo de gás de alta-pressão proveniente da câmara de combustão. Geralmente, o eixo da microturbina é único

para o compressor e a microturbina ambos conectados a um gerador. Em um experimento de Chen et al. (2009), por exemplo, o eixo conectava o gerador à caixa de engrenagens da MTG. Este eixo é responsável pela transmissão do trabalho radial gerado pela microturbina ao gerador de forma axial. O sistema de compressor-microturbina-gerador apresenta baixa inércia, e facilmente atinge alta velocidade de rotação como 100.000 rotações por minuto. Assim, para que a frequência de geração de energia seja condizente com a frequência da rede, geralmente utiliza-se redutores de velocidade, como a caixa de engrenagens, para atenuar a velocidade do gerador (CHEN et al., 2009).

A combinação de MTG com outras topologias, como com uma célula combustível, por exemplo, em seções interconectadas, pode prevalecer-se do fluxo de ar de saída da célula, possibilitando a otimização do uso do combustível em cada uma das topologias. Além disso, o sistema pode operar com o ar ambiente que passa pelo compressor, divide-se entre o fluxo direcionado para a MTG e o direcionado para a célula. Antes de chegar a MTG, o fluxo de ar é pré-aquecido e misturado ao biogás. O vapor gerado desta mistura é direcionado para a câmara de combustão. Após entrar em combustão, o gás gerado entra na MTG e se expande, produzindo energia mecânica suficiente para mover o pistão que aciona o gerador. Por outro lado, o vapor direcionado para a célula é misturado ao vapor produzido pelo evaporador de água, que está acoplado ao sistema. O sistema de pré-aquecimento deste vapor, considerando a entalpia do vapor elevam a temperatura de operação da célula e consequentemente elevam a eficiência de geração deste sistema (VERDA; SCIACOVELLI, 2012).

Devido a limitações do ciclo de Carnot, MTG tem eficiência limitada, assim como MCI, entre aproximadamente 25 a 35%. Logo, a recuperação do calor é uma importante característica para a eficiência elétrica do sistema. Como alternativa, as células combustíveis independem da recuperação do calor, pois são equipamentos eletroquímicos que convertem diretamente a energia química em energia elétrica, sem etapas de geração de energia térmica ou mecânica. (BOUCHY et al., 2015).

3.4.4 Células Combustíveis

Células combustíveis, do inglês *Fuel Cells* (FC), correspondem a células desenvolvidas para converter a energia química de um combustível em energia elétrica. Basicamente, a conversão acontece em temperatura constante em que as células, compostas por um ânodo e um cátodo em lados opostos e um eletrólito ao centro, permitem a movimentação dos elétrons entre os dois lados. As maiores indústrias desta topologia, localizadas nos Estados Unidos, são a *Bloom Fuel Cell Energy* e a *United Technologies Company (UTC)* que fornecem FC entre 25 e 2800 kW com eficiência elétrica de 36 a 50% e com disponibilidade de 90 a 95%. Os fornecedores garantem vida útil entre dez e oitenta mil horas para estas células (BRAUN; TRENDEWICZ, 2013).

Teoricamente, FC geram energia enquanto os eletrodos forem alimentados com combustível e oxidante, ânodo e cátodo respectivamente. No cátodo, o oxigênio combinado aos elétrons provenientes do ânodo gera íons bivalentes negativos. Estes íons, por sua vez, são transportados pelo eletrólito para o ânodo onde reagem com o combustível resultando em água e elétrons livres. Os elétrons livres, são removidos por uma interconexão, gerando corrente elétrica (BUONOMANO, *et al.*, 2014).

De acordo com a composição do eletrólito, as FC são classificadas como por exemplo: *Solid Oxid Fuel Cells* (SOFC) e *Molten Carbonate Fuel Cells* (MCFC). SOFC é uma célula combustível com eletrólito de óxido sólido que faz a oxidação do combustível com alta eficiência, estável e adaptável ao combustível com custo relativamente baixos para gerar energia. Por outro lado, as MCFC são compostas com eletrólito de uma mistura de saia suspensa em uma cerâmica porosa e quimicamente inerte. Ambos tipos de FC operam em altas temperaturas, variando entre 600 e 1000°C, assim, capazes de utilizar combustíveis baratos e não convencionais pois não exigem hidrogênio puro. Quando a temperatura interna atinge 650°C, para MCFC por exemplo, as reações eletroquímicas que ocorrem no interior da célula produzem potência elétrica. Ainda, quanto ao formato das MCFC, geralmente é retangular ou quadrado, embora autores tenham também utilizado em formato cilíndrico para fins de pesquisa (GENG; LÜ; WENG, 2015).

As FC são colocadas em série, e o número de células depende da demanda de operação. O esquema de célula que representa a FC como um todo é a representação de uma região de única célula, apresentada na Figura 9, cujas dimensões estão em milímetros (mm). Conforme apresentado, a SOFC é composta com um par de canais, um canal para o fluxo de ar com 1,4 mm de altura, e o outro para o fluxo de combustível com 0,5mm de altura de mesma largura, ânodo e catodo com 0,5 mm de altura cada, eletrólito com 0,01 mm de altura; e a interconexão entre estes. Nesta configuração, o ar pode entrar na célula por ambos lados: quando no mesmo sentido que o combustível se denomina co-fluxo, outrora quando o ar entra em sentido contrário ao combustível denomina-se contra fluxo. Para o fluxo de ar e combustível da esquerda para a direita, obtém-se 0.69 V e 380 W/m², enquanto que para o ar da direita para a esquerda resultou em 0,73V e 5747 W/m² para uma FC de 100 mm de comprimento 3,5mm (IWAI et al., 2012).

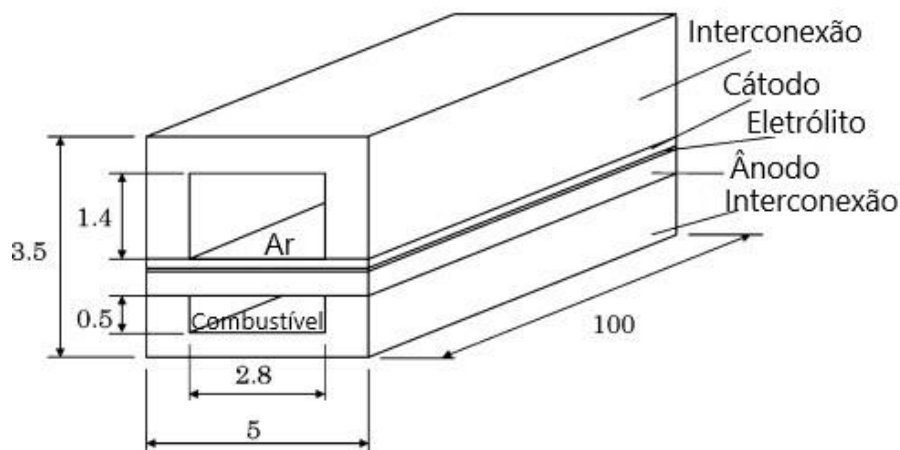


Figura 9 - Representação de uma região de célula combustível do tipo SOFC
Fonte: Adaptado de Iwai et.al. (2012, P.16)

Esta tecnologia é adaptável ao uso de vários combustíveis em unidades geradoras conectadas à rede ou em sistemas isolados. Todavia, a implantação desta tecnologia carece ainda de um alto investimento inicial, custando entre \$3800 e \$5280 por kW de capacidade da FC. Assim, ainda carece de desenvolvimento para que haja redução dos custos e expansão de seu uso comercial. Apesar disso, quando o biogás é usado para alimentar uma FC, a eficiência de conversão é alta apresentando níveis entre 36 e 50%, e com níveis baixos de emissão de gases poluentes entre 1,29 a 2,58 g/GJ. Portanto, ainda que em desenvolvimento, as características fazem com que as FC sejam consideradas uma tecnologia promissora (BUONOMANO, *et al.*, 2014)

O uso das FC transforma a energia química, contida no biogás, diretamente em energia elétrica por meio de reações eletroquímicas. O biogás, presente no ânodo e o cátodo preenchido com ar, gera energia elétrica com desempenho superior quando comparado com MCI. Contudo, o biogás não pode ser diretamente utilizado pela FC e deve passar por um tratamento de remoção de impurezas. Neste tratamento, o biogás pode ser empregado na produção de hidrogênio a partir de purificação realizada internamente ou externamente à FC (ADOUANE et al., 2015).

A concentração de H₂S presente no biogás é um dos componentes de maior influência em atuação de FC. A presença de H₂S ainda que ínfima, medida em parte por milhão, impacta de maneira irreversível o desempenho de geração desta topologia. O efeito da presença de H₂S, limitada em 1ppm, depende da pressão que os outros elementos do biogás exercem. Geralmente, baixas concentrações deste gás são reversíveis pela mistura do biogás com vapor de água e hidrogênio sem H₂S. Caso a contaminação persista, esta pode contaminar a superfície da célula, formando uma superfície porosa. Isto ocorre devido à reação do sulfeto de níquel, bloqueando pontos ativos e alterando a condutividade do ânodo. A queda na tensão de saída da FC é proporcional a concentração de H₂S, porém, também é relacionada a evaporação de carbonatos e a corrosão do cátodo. A densidade de corrente com a qual a FC está operando, a temperatura e o fator de utilização também influenciam nos efeitos das impurezas presentes no biogás (CIGOLOTTI et al., 2011).

A modelagem do fenômeno químico que acontece no interior de uma FC fora apresentada por Sciacovelli, Verda (2012) e Iwai et. al. (2013) baseia-se na diferença entre o potencial de circuito aberto E definido pela equação de Nernst, e os quatro tipos de perdas de tensão de uma FC: perdas devido a concentração V_{conc} ; perdas ôhmicas V_{ohm} , igual ao produto da densidade de corrente J e da R_t a soma da resistência do ânodo, cátodo e do eletrodo; e perdas de ativação V_{act} . A combinação destas forma uma curva polar de acordo com a equação (1) (VERDA; SCIACOVELLI, 2012)(IWAI et al., 2013):

$$V_{FC} = E - V_{conc} - V_{ohm} - V_{act} \quad (1)$$

As perdas de ativação são inclusas além da queda de potencial entre E e a tensão resultante. Estas perdas definem-se pela queda de potencial devido a reação da barreira de energia que considera temperatura T , número de mols de elétrons gerados

na reação n , e a constante de Faraday F . Além destes valores, utiliza-se uma simplificação que emprega a constante de barreira de ativação α e a densidade de corrente relativa ao ânodo J_{oa} e ao cátodo J_{oc} . A queda de tensão devido à perda no ânodo $V_{ati,a}$ é calculada por (2), e a respectiva perda no cátodo $V_{ati,c}$ calculada de acordo com (3). A soma de (2) e (3) resulta na queda de tensão devido as perdas de ativação utilizada na equação (1), calculada em (4): (SCIACOVELLI; VERDA, 2012) (IWAI et al., 2013).

$$V_{ati,a} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{\alpha \cdot J}{J_{oa}} + \sqrt{\left(\frac{\alpha \cdot J}{J_{oa}} \right)^2 + 1} \right) \quad (2)$$

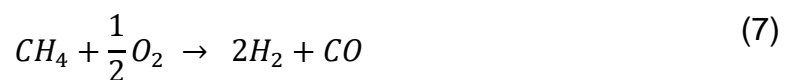
$$V_{ati,c} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{\alpha \cdot J}{J_{oc}} + \sqrt{\left(\frac{\alpha \cdot J}{J_{oc}} \right)^2 + 1} \right) \quad (3)$$

$$V_{act} = V_{act,a} + V_{act,c} \quad (4)$$

Além destas, existem as perdas devido a concentração V_{conc} pois o transporte de massa é limitado por uma relação logarítmica entre a densidade de corrente limite J_l , igual a 1,6 A cm⁻², e a densidade de corrente J . A equação (5) apresenta esta relação:

$$V_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{J_l}{J_l - J} \right) \quad (5)$$

A tecnologia utilizada para a conversão da energia química contida no biogás para uma FC é similar a utilizada para o gás natural. Esta conversão segue a razão de o dobro de vapor para carbono conforme a equação (6). Existe uma opção alternativa para a oxidação parcial com balanceamento simplificado, na qual o metano reage com o oxigênio formando hidrogênio e gás carbônico, conforme (7): (SCIACOVELLI; VERDA, 2012).



O biogás, assim como o “ar”, pode ser comprimido em um compressor ou em sopradores em pequenos sistemas, de acordo com a necessidade do sistema de

geração. A quantidade de ar que circula no cátodo é determinada pela razão de compressão, considerando o fluxo de “ar” (3) da Figura 10 para a mistura de “ar” e combustível no interior do misturador. A definição de “ar” é a mistura de 79% de N_2 e 21% de O_2 com umidade relativa de 60%. O ar precisa estar na mesma temperatura que a FC, logo, o fluxo (9) da Figura 10 precisa passar por um processo de pré-aquecimento, para garantir que (10) chegue a FC com a temperatura necessária. Além disso, o fluxo pré-aquecido é separado entre o vapor de oxigênio a ser direcionado para o eletrolítico na zona do ânodo (11) e a saída do cátodo (12) da Figura 10 (VAN HERLE et al., 2003).

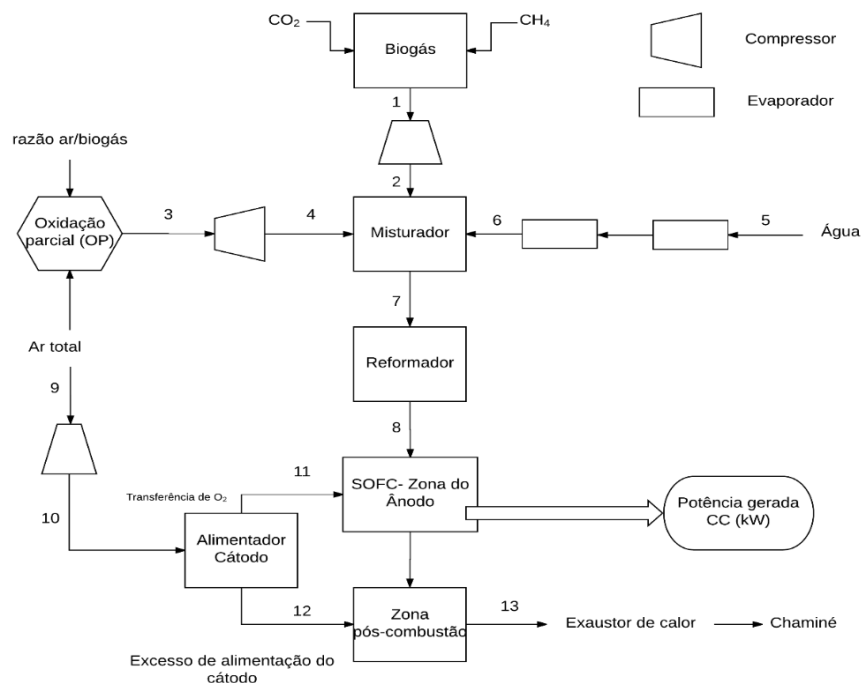
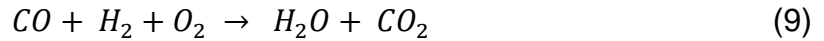


Figura 10 - Diagrama de funcionamento de uma célula combustível do tipo SOFC

Fonte: Adaptado de Van Herle et al. (2003, P. 376)

A SOFC é representada pela combinação do reformador (8) e do fluxo de oxigênio proveniente do cátodo indicado no número (11), produzindo a saída do ânodo para a zona de combustão. As reações químicas que ocorrem no interior da célula são a reforma do vapor, apresentada na equação (6), a reação do monóxido de carbono e o vapor de água conforme equação (8) e oxidação do combustível com eliminação de todo oxigênio apresentadas em (9):





Acoplada à zona do ânodo, tem-se uma pilha isotérmica responsável pela produção na potência CC. A saída do ânodo e do cátodo encontra-se na zona de pós combustão, em que uma fração do combustível pode ser transferido para o exaustor ou a outro sistema de aproveitamento de calor, indicado por (13) (VAN HERLE et al., 2003).

Em qualquer sistema, a eficiência energética é definida pela razão entre a potência de saída e de potência de entrada. A potência de entrada é igual a energia imposta pelo combustível utilizado. Em uma FC que utilize o biogás como combustível, esta energia P_{elec} é resultante do produto da massa de combustível, representada por $m_{combustível}$, e o poder calorífico de cada componente do biogás como CH_4, CO, H_2 representado por P . A razão necessária para encontrar a eficiência elétrica, η , resultante do uso de alguma topologia é apresentada na equação (10):

$$\eta = \frac{P_{elec}}{\sum_{CH_4, CO, H_2} (m_{combustível} \times PC)} \quad (10)$$

Quando se multiplica a massa do combustível e o seu respectivo PC, obtêm-se o determinante desta razão. Verifica-se que a potência elétrica na saída é variante conforme a topologia utilizada e a carga acoplada ao sistema (IWAI et al., 2012).

3.5 GERADOR

Enquanto uma topologia converte a energia química, que estava contida no biogás, em energia mecânica pela sua expansão, faz-se necessário a conexão à um gerador para conversão da energia mecânica para a energia elétrica. Desse modo, a eficiência de um sistema de geração não depende apenas da eficiência da topologia utilizada, mas também da eficiência da produção de energia pelo gerador. Geradores podem gerar energia em corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), em unidades de geração com biogás geralmente usam-se geradores CA. A modelagem de um gerador segue o cálculo de parâmetros eletromagnéticos seguido do cálculo de parâmetros mecânicos. Porém, deve haver uma integração entre estes processos para evitar que ocorram dimensionamentos errôneos. As perdas de um sistema são

influenciadas pelas condições térmicas as quais estão submetidas e devem ser consideradas para os cálculos. (METHODISMAGILOV et al., 2016).

Dentre os tipos de geradores, são utilizados para a geração de energia a partir do biogás geradores de indução e geradores síncronos. A descrição do modo de funcionamento e aplicação para o uso do biogás são apresentadas neste capítulo.

3.5.1 Geradores síncronos

Geradores síncronos (GS) são alimentado por anéis, com CC, em um enrolamento de excitação ou de enrolamento de campo acoplado ao rotor da máquina, alimentando cargas de potência ativa ou potência reativa. O sistema de excitação é responsável pela tensão de saída, fator de potência e magnitude da corrente gerada pelo GS. Em um esquema genérico, o sistema de excitação conta com uma excitatriz (conectada a uma fonte de energia) conectada com gerador, e um regulador de tensão conectada na saída do gerador. O regulador de tensão controla a saída da excitatriz, tal que a tensão gerada varie de acordo com a demanda de carga. (GORDEYKO; ROTHBAUER, 2006).

A frequência do rotor é proporcional a velocidade do rotor, cujo valor é igual a frequência do circuito exterior. Com esta relação, é possível calcular a velocidade n necessária para gerar energia em frequência f e cuja máquina possui número de pólos p apresentado em equação (11) (JASH; SINGH, 2015):

$$n = \frac{60 f}{p} \quad (11)$$

A alimentação do enrolamento de campo de um GS é por CC, que induz tensão nos enrolamentos de armadura do estator, cuja distribuição determina o número de pólos. Atualmente, além da alimentação CC, podem ser utilizados também ímãs permanente em configuração similar a um GS convencional, mas com sistema de excitação elétrica substituída por ímãs permanentes caracterizando os geradores síncronos de ímã-permanente (GSIP). Os GSIP são amplamente usados em turbinas eólicas, operando em velocidade variável, em que a frequência de geração varia entre 9 a 15 Hz, que é diferente da frequência do conversor ao gerador acoplado. Neste caso, deve existir em uma unidade com geração com GS um conversor para o rotor,

e uma conexão CC deste a um conversor da rede. Este último conversor é responsável pela elevação frequência ao mesmo nível de frequência da rede. Em um sistema híbrido, pode-se utilizar um conversor único acoplado à ambos inversores de cada topologia pertencente ao sistema, ou ainda utilizar dois conversores e compartilhar o mesmo inversor para as duas tecnologias para otimizar o processo de conversão em eletricidade. O compartilhamento do inversor contribui para a redução das perdas porém limita o sistema ao inviabilizar o funcionamento independente dos motores primários (BAUDOIN et al., 2016a).

O GSIP também podem ser utilizados em sistemas convencionais que operam em velocidade constante, substituindo os geradores síncronos com enrolamento de campo. Com o uso deste tipo de gerador, há uma redução de volume do gerador e a eliminação das escovas e sistemas de anéis coletores. Este imãs serão colocados na parte interior do gerador como *permanent magnets*, indicados em cor cinza-claro na Figura 11. O enrolamento do estator, indicado por *stator coils*, indica o sentido da corrente de acordo com o posicionamento dos imãs ao redor do gerador. A seção pontilhada da Figura 11 indica o enrolamento do estator com corrente em sentidos opostos junto do imã posicionado ao centro. A substituição por imãs permanentes encarecia o equipamento, o que não caracterizava uma vantagem, mas com o avanço da tecnologia este custo reduziu e permitiu a utilização de maneira mais ampla. Aplicações de GSIP foram observadas tanto em sistemas conectados à rede como em sistemas isolados. Seu uso foi observado em sistemas com FC, como única topologia ou associadas a TG e um único sistema, e também em sistemas que usavam MTG. Em estudos de um sistema conectado à rede apresentado por Baudoin et al. (2016b), aplicou-se em sistema híbrido de FC do tipo SOFC e TG cujo gerador era de imãs permanentes cujo sistema atingiu eficiência elétrica igual a 70% (BAUDOIN et al., 2016b).

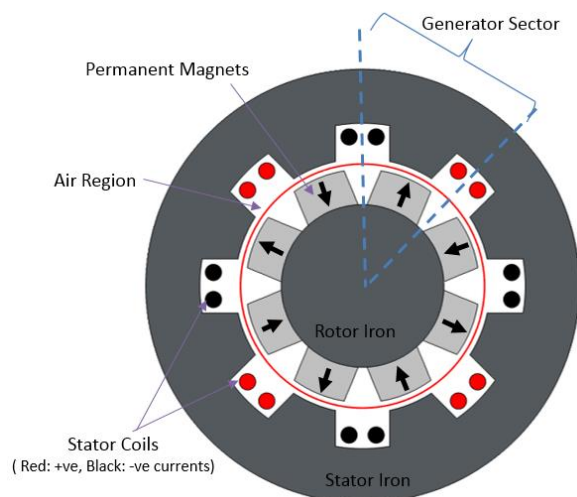


Figura 11 - Diagrama esquemático de um gerador síncrono de ímã permanente
Fonte: Paudel (2016, P.1)

3.5.2 Geradores de indução

Gerador de indução (GI), na literatura internacional chamado de *Induction Generator*, não possui de um sistema de excitação tão vantajoso quanto os GS. O GI possui um estator com enrolamento trifásico e um rotor construído em forma de gaiola de esquilo ou bobinado. O funcionamento se baseia em dois campos girantes, um produzido pelo gerador e outro pelo estator. No gerador de indução, o campo do rotor gira à frente do campo do estator, havendo um conjugado eletromagnético que tende a alinhar os dois campos, o que possibilita a transferência de energia entre o rotor e o estator. A velocidade do rotor é superior a velocidade do campo girante, e a diferença percentual das velocidades é chamada de escorregamento. Esta velocidade não é igual a velocidade síncrona, por isso este gerador é chamado de assíncrono. As bobinas são posicionadas de modo a formar 120° de defasagem entre as fases. Ainda, o eixo para acoplamento fica na parte dianteira e na parte traseira há uma ventoinha para refrigeração (FREITAS et al., 2005).

Os sistemas de geração adaptáveis a aplicações comerciais e domésticas geralmente são acoplados a máquinas assíncronas. A utilização de GIs em parques eólicos compõe a maioria das unidades geradoras. Estas máquinas apresentam conexão à rede simplificada, com baixo custo e alta durabilidade. Isto se deve ao fato que, como GI não exige coletor, a quantidade de componentes no gerador é reduzida

simplificando sua manutenção. Embora seja um gerador de potência ativa, demanda potência reativa para a partida, até que o torque gerado pelo movimento do eixo ultrapasse a velocidade do campo girante no entreferro e a máquina passe a funcionar como gerador. A corrente de excitação pode ser proveniente da rede de distribuição, tendo níveis de frequência e tensão determinados pela rede (CAPALDI, PIETRO; DALIENTO; RIZZO, 2014).

Para o procedimento de partida do gerador, o enrolamento do estator do GI deve ser conectado à rede com um interruptor eletromagnético controlado manualmente para que possa ser acionado quando necessário. Quando o interruptor é ligado, o GI funcionará como motor, e a máquina absorverá a corrente de partida obtendo torque de partida suficiente para mover-se e manter a rotação no eixo. O eixo do rotor, longitudinal a ser conectado ao motor primário, é posicionado ao centro do motor conforme indicado na Figura 12. Os pólos estão indicados pelas flechas em vermelho, mostrando o sentido da corrente entre os pólos pela flecha em cinza. A medida que a velocidade rotacional aumenta, o escorregamento torna-se negativo e o GI passa a entregar potência elétrica ao sistema de distribuição. Quando a velocidade rotacional ultrapassar a velocidade síncrona, este começa a entregar potência elétrica para o sistema. Esta potência é entregue pela conexão à rede (LIN; WANG, 2009).

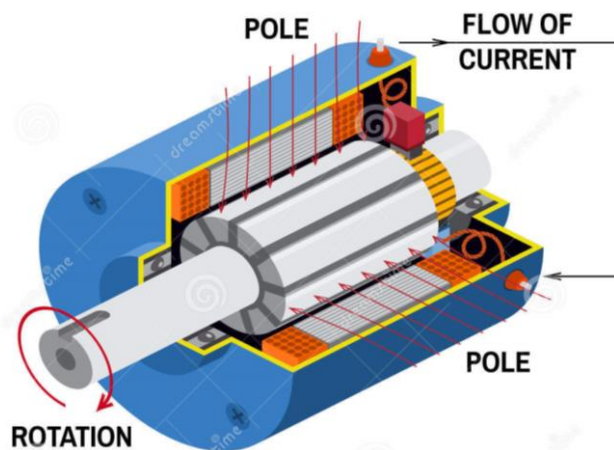


Figura 12 – Diagrama esquemático de gerador de indução

Fonte: Woodford (2015, P1.)

A modelagem de um GI deve incluir a análise da interação entre desempenho mecânico, térmico e eletromagnético. A combinação destes cálculos resulta na modelagem de um gerador com parâmetros como velocidade de rotação, potência de geração, tensão nominal, tipo e tamanho da conexão das cargas, e

propriedades como indução residual e força coercitiva (METHODISMAGILOV et al., 2016).

Tipicamente GIs são usados em instalações com potência inferior a 500 kW. Para instalações de até 100 kW utiliza-se um gerador monofásico, conectado à rede de acordo com a limitação kVA e o ponto de conexão disponível. Para potências entre 100 e 500 kW, o GI passa a exigir conexão trifásica com a rede. Para este intervalo de potência, o investimento inicial é mais alto e deve ser estudado conforme o ponto de interconexão com a rede. Se a potência gerada pelo GI for superior à necessária, o GI não poderá operar em velocidade rotacional adequada à operação. Por outro lado, se a potência gerada é menor do que demanda necessária, não se atinge operação otimizada. A eficiência do sistema de geração para um GI é calculada pela equação (12):

$$\eta_{elét} = \frac{W}{\sum \Delta h_i m_i} \left[\frac{kW}{\frac{kJ}{kg} \cdot kg} \right] \quad (12)$$

que apresenta a razão entre o trabalho realizado pelo sistema W , e a somatória do produto entre entalpia h_i dos e a razão do fluxo de massa m_i (CHEN et al., 2009).

O custo alto de manutenção, o armazenamento adicional de energia e cargas não balanceadas dificultam o uso de alternadores, convencionalmente utilizados em geração de energia de capacidade reduzida. Como alternativa para o uso de alternadores, os geradores de indução auto excitados (GIAE), usados em sistemas isolados, apresentam boa resposta dinâmica, custos reduzidos de operação e manutenção, estrutura robusta e eficiência de conversão para geração de energia elétrica. GIAE operam do mesmo modo que GI, com a inclusão de capacitores para a excitação conectados aos terminais do estator. Estes capacitores são conectados a motores primários externos, como MCI ou MGTs. O circuito de excitação, é composto por um capacitor C , e uma resistência R_D requerida para a descarga da energia armazenada em C quando o sistema é desligado (VERMA; PANT; SINGH, 2010).

Observa-se que a alimentação monofásica aos terminais de um GI causa o não balanceamento das tensões. Um inversor trifásico é conectado para balancear a tensão do GI e conseqüentemente suas correntes. Quando as cargas não são balanceadas, a operação de um GIAE apresenta calor excessivo, estresse nos enrolamentos e vibrações no eixo devido a diferença entre as correntes de fase.

Assim, a regulação da tensão e da frequência se fazem necessárias para permitir a operação deste tipo de gerador (CAPALDI, PIETRO; DALIENTO; RIZZO, 2014).

4 BIOGAS NO MUNDO

A possibilidade de geração de energia elétrica, essencial para a sociedade, aliada a vantagens econômicas e ambientais atraem investimentos em países desenvolvidos e em desenvolvimento. Seguindo este ideal, Índia e China foram os primeiros países a focarem no processo de biodigestão em meados dos anos 50 e 60. Estes países desenvolveram modelos de biodigestores adaptados a suas necessidades. A crise do petróleo impulsionou a procura por formas alternativas de energia, entre elas o biogás. Porém, o impulso não foi suficiente para que ocorresse a substituição de fontes renováveis por outras devido a dificuldades encontradas como a cultura ou a limitação de capacidades e recursos disponíveis (LINDEMEYER, 2008).

A redução do uso de combustíveis fósseis como o carvão, assim como o custo com a sua importação, proporciona benefícios que servem como incentivo à implantação da geração de energia a partir do biogás. Dentre estas opções, a biomassa é considerada uma importante solução devido ao grande volume de biomassa no país, custo de instalação de conversores de potência relativamente baixos, e a disponibilidade relativamente barata durante todo o ano. A destruição das florestas no país e a escassez de recursos é crescente incentivando a procura de fontes alternativas de matéria-prima. O governo indiano incentivou o uso do biogás com o *National Project on Biogas Development* (NPBD) em 1982, com enfoque em geração de energia térmica de pequena escala, para o uso doméstico. Em 2006, o governo indiano introduziu outro programa similar ao NPBD para pequenas unidades geradoras, em que 98 unidades de geração de energia elétrica foram instaladas. O resultado deste programa fora observado durante a realização da revisão sistemática com 5 trabalhos encontrados na Índia. Dos trabalhos encontrados, a maioria apresenta análises para pequenas unidades geradoras de até 57 kW e apenas uma unidade com capacidade de 470 kW. A maioria dessas unidades empregou MCI de ciclo Otto, ou ainda motores *dual-fuel*, e apenas uma das unidades tinha sistema com MTG como motor primário (JASH; SINGH, 2015).

Atualmente, na Índia, cerca de 69% da população vive em vilas afastadas. A extensão da rede a estes lugares gera grandes perdas de transmissão devido à baixa demanda da pequena população em cada local. Isso acontece porque, estender a é inviável economicamente, assim, proporcionando oportunidade as alternativas de

geração distribuída. A capacidade de geração de resíduos do país foi estimada e resultou em 55,494 Mm³/dia proveniente de resíduos rurais e industriais que resultam em 331.166 kW. De acordo com as características específicas, a energia contida no biogás encontrado na Índia varia entre 6 a 6,5 kW por m³. Embora o país tenha vasta população, estimada em 1,2 bilhão de pessoas, a capacidade de geração resulta do percentual de esgoto que é coletado e considerando apenas os resíduos urbanos é de 55.380kW. Na Índia, a produção é resultado da combinação entre escassez de energia e saneamento. As vantagens da instalação podem variar conforme o território em que o sistema de geração será instalado, assim como as razões que levaram ao investimento nesta fonte de energia (BARAL et al., 2010).

Apesar das diversas vantagens oferecidas por esses reatores, seu emprego apresenta motivações específicas: no caso da China, destaca-se o biofertilizante como a razão principal; Filipinas, o tratamento das águas residuais de origem doméstica em projetos de colonização; na Tailândia, para promover o saneamento; e na Índia, vantagens devem ser aproveitadas e consideradas na viabilização de programas de implantação de biodigestores rurais (Lindemeyer, 2008, p.37).

Assim como na Índia, o biogás tornou-se popular em outros países em desenvolvimento, visto que apresenta vantagens, as razões para o investimento variam conforme as condições dos países. Dentre os trabalhos encontrados neste estudo, o percentual de 37% corresponde à trabalhos desenvolvidos em países que estão em desenvolvimento como África do Sul, Bangladesh, Brasil, Colômbia, China, Malásia, Tailândia, Turquia e Vietnã. Ainda, foi observado um trabalho de simulação desenvolvido em Camarões, que é considerado um país subdesenvolvido. Neste trabalho, os autores Nfah e Ngundam (2009) apresentam a instalação de um sistema híbrido com painel fotovoltaico e TG. O gerador tinha capacidade de 10 kW e resultou em eficiência de 55% (NFAH; NGUNDAM, 2009).

O Nepal, considerado um país em desenvolvimento, cujo interesse em biogás se tornou popular resultante de esforços governamentais e também de organizações não-governamentais. Em 1955 introduziu-se a ideia desta tecnologia, porém esta ideia disseminou-se em 2006 com um programa de suporte à construção de plantas de biogás. Como resultado deste programa, instalaram-se 150 mil unidades de pequeno porte no país. A matéria-prima para a geração do biogás era o resíduo orgânico proveniente da criação de gado. O país possui potencial para produzir cerca de 673 Mm³ anualmente de acordo com a população de gado no país, o que corresponde a 4038 GWh anuais (KARKI, 2009).

Para a implantação da geração de energia elétrica a partir do biogás na África do Sul, Greben e Oelofse (2009) buscaram informações em outros países com os quais as áreas rurais pudessem ser comparadas como China, Índia, Nepal e Vietnã. Os países estudados utilizam o biogás como fonte de energia para iluminação e cozer os alimentos em áreas rurais. A China, por exemplo, por incentivos governamentais, é um dos principais fornecedores de matéria prima para os biodigestores permitindo que cerca de quinze milhões de unidades usem biogás para gerar energia elétrica. Em média, estas unidades possuem produção de 1 a 1,2 m³ de biogás por dia, quantidade de biogás suficiente para gerar energia elétrica para uma hora de iluminação. Assim, usando resíduos de banheiros públicos de algumas cidades, a geração de energia é solução para ambos problemas independentemente da eficiência do processo. A partir de 2012, foram analisadas desde plantas pequenas com MCI de 25 kW a sistemas isolados com uso de MTG com capacidade de 1000 kW. Ainda, o país conta com estudos mais complexos para que os sistemas possam funcionar como microrrede ou de forma isolada (BURKE; GREBEN; SZEWCZUK, 2009) (GREBEN; OELOFSE, 2009).

Em se tratando de outro continente, na América, existem pesquisas visando a instalação de projetos com biogás em países em desenvolvimento como o Brasil e a Colômbia, porém em menor escala que nos países em desenvolvimento. No Brasil, no estado do Paraná, Coldebella (2006) estudou a geração de biogás em uma propriedade a partir de dejetos coletados de bovinocultura e suinocultura com biodigestor de capacidade de 840 m³. A geração se dava por MCI projetados para funcionar à gasolina, adaptado para o biogás de potência nominal 104,44 kW e 44,76 kW, acoplado a um gerador de capacidade de potência nominal 44 kW e 36 kW, respectivamente. Ambos geradores eram GS com rotor de pólos salientes. A produção de energia para resíduos da bovinocultura apresentou taxa de 0,270 kWh/m³, já a suinocultura apresentou resultados mais favoráveis com 0,670 kWh/m³. Com esta pesquisa, o autor não conseguiu atingir níveis de eficiência apresentado por outros autores, com apenas 4,14% para bovinos e 10,3% para suinocultura. A baixa eficiência foi relacionada ao alto consumo de combustível pela adaptação do motor ao uso do biogás (COLDEBELLA, 2006).

Por outro lado, na Colômbia os MCI foram analisados e apresentaram um percentual mais elevado de eficiência. Bedoya et al, (2012) analisou a operação de um MCI de ciclo Diesel, conectado à rede, encontrando níveis de eficiência de 42%.

Esta eficiência se deve ao fato que se empregou a injeção de pequena quantidade de gasolina, para a partida do processo de combustão. Em outro trabalho, Bedoya e Saxena (2013) analisaram um motor do tipo HCCI aplicado em um sistema isolado da rede e apresentou eficiência elétrica de 35%. Este tipo de motor é indicado para baixa ou média carga, proporcionando um nível de aproveitamento de combustível de 17% comparado a um MCI funcionando com ciclo Otto (BEDOYA et al., 2012b)(BEDOYA; SAXENA, 2013).

Assim como na Colômbia, também fora encontrada aplicações nos Estados Unidos e Canadá de geração a partir do biogás. Nos Estados Unidos, um trabalho com o uso de motor do tipo HCCI foi estudado com o uso de gasolina na injeção da partida. Observou-se neste trabalho que a variação ínfima de pressão interna ou da temperatura da mistura ar-combustível impactara positivamente na potência elétrica de saída do sistema. Utilizando gasolina injetada no início da combustão, um sistema isolado com o uso de HCCI apresentou eficiência de 44%. Também há aplicações de MTG para aproveitamento de biogás em sistemas isolados que apresentaram eficiência de 28,5% e 25% para turbinas de 250 kW e 30 kW com carga de 216 kW e 20 kW respectivamente. Outra topologia utilizada em sistemas isolados são as FC. Segundo a análise de Braun e Trendewicz (2013) de uma planta com FC do tipo SOFC além da composição do gás, define-se a eficiência elétrica com parâmetros com temperatura e eficiência dos componentes utilizados. Mantendo estes parâmetros em níveis ideais, como o biogás contendo 56,6% de CH₄, a eficiência elétrica de 51,6% permite o seu uso em unidades de pequena, média e grande escala. Isto acontece porque independente da escala da planta, a densidade de corrente da célula é mantida constante, mesmo que a corrente tenha seu valor alterado enquanto a tensão varia, de acordo com o número de células do sistema. A capacidade instalada no país é de 85,8 MW em 54 unidades, incluindo plantas geradoras com 5,2 MW utilizando MTG, 7,9 MW com FC e 39,9 MW usando TG(BRAUN; TRENDWICZ, 2013).

Em Ontário, no Canadá, analisou-se a capacidade de geração de energia a partir do resíduo orgânico gerado pela pecuária incluindo o tamanho da propriedade, o potencial de produção de biogás, o custo de investimento e o retorno esperado para um programa implantado na província. Através do número de animais e a expectativa de geração de resíduo por animal, foi estipulada a quantidade de biogás produzido com 60% de metano como um valor médio, visto que esse percentual é variável de acordo com a alimentação do animal. Os resultados para gado de leite e de corte

foram analisados de acordo com a tarifa vigente de energia, cálculo de retorno financeiro e custos operacionais. De acordo com os resultados obtidos, a geração a partir do biogás é atrativa para quantidade de animais: 33 a 77 para gado leiteiro e 78 a 122 para gado de corte. Esse estudo é interessante pois visou estimular a implantação de usinas geradoras a partir do biogás indicando os dados para todas as propriedades, independentemente do número de animais (GRAYDON; KIRK; WHITE, 2010).

Os países considerados ditos desenvolvidos detêm a grande maioria das pesquisas desenvolvidas sobre a aplicação do biogás para gerar eletricidade. Dentre esta parcela dos países, destacam-se a Itália, Espanha e Estados Unidos pelo número de pesquisas publicadas. Na Itália, muitas pesquisas foram desenvolvidas sobre as quatro categorias de topologias, MCI, FC, MTG e TG, após os incentivos baseados em *Green Certificates*, em tradução literal Certificado Verde (CV). CV indica um valor ambiental da energia elétrica proveniente de fontes renováveis, cujo valor não pode ser comercializado no mercado de energia, então a concessionária distribuidora de energia é obrigada a adquirir esta energia por um valor pré-estabelecido anualmente. Os estudos abrangentes em todas as topologias resultam em capacidade instalada na Itália, em 2007, de aproximadamente 4,7 TWh. Cerca de 80% provém de estações de tratamento de água considerando que o país possui plantas com MCFC combinados com MTG que apresentam eficiência elétrica do sistema 41,1% para 463 kW e 59,2 para 965 kW. Porém quando analisadas somente as MCFC a eficiência varia entre 55,7% para 365 kW e 18,5% para 1 MW (CARESANA et al., 2011) (CIGOLOTTI et al., 2008).

Em outro país europeu, a Suécia, a geração de energia elétrica a partir do biogás é utilizada em 172 unidades espalhadas pelo país. A soma da energia produzida por estas unidades, em 2010 por exemplo, totalizou 1,4 TWh. Para facilitar a análise, autores de um estudo sobre estas unidades as dividiram de acordo com as matérias primas em quatro categorias: co-digestão, plantas agrícolas, estações de tratamento de esgoto e unidades geradoras industriais. Os resíduos urbanos são a matéria prima utilizada em 135 unidades que são responsáveis por 56% da geração a partir desta fonte. Observa-se que 18 unidades geradoras utilizam a co-digestão e correspondem a 32% da geração; unidades geradoras industriais são 5 unidades e geram 10% do total; enquanto que 14 unidades baseadas em plantas agrícolas correspondem a apenas 1% da geração. Os resíduos agrícolas apresentam um

volume bem menor em atividades de geração embora ainda tenham alto potencial a ser explorado. Ainda, novas unidades geradoras são implantadas e novas tecnologias surgem, e a expectativa é que o uso de biogás atinja o dobro do atual em uma década, enquanto que as unidades com combustíveis fósseis permaneceram com a mesma contribuição (LÖNNQVIST; SILVEIRA; SANCHES-PEREIRA, 2013).

Uma das maneiras de aproveitamento do biogás é como combustível para veículos de passeio, feita em alguns países do mundo. Estes veículos geralmente são equipados com MCI de ciclo Otto alimentados com biogás que contenha alta concentração de metano. A maioria dos países possui um padrão de qualidade do biogás estabelecido que apresenta a concentração de metano com pelo menos 96% e concentração máxima de CO₂ de 6%, conforme dados apresentados na Tabela 5. Esse valor deve ser considerado como ideal para especificações em outros países. Segundos estudos de Mathad et al. (2013) o uso do biogás no lugar do gás natural não proporciona economia de combustível significativa. Ainda, o autor salienta que em seu experimento observou que os gases emitidos (CO e NO_x) tem maior volume com velocidade reduzida (MATHAD et al., 2013).

Tabela 5 - Padrões para o uso de biogás combustível em diferentes países

Especificação	Países					
	França	Suécia	Holanda	Alemanha	Áustria	Suíça
Metano (CH ₄) (%vol)	96	>97	–	–	96	>96
Gás Carbônico (CO ₂) (%mol)	<2.5	<4	<6	<6	<3	<6
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S) (mgS/N m ³)	<5	<15	<5	<5	<5	<5
Hidrogênio (H ₂) (%vol)	<6	–	<12	<5	<4	<4
Oxigênio (%vol)	<1	<1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Poder calorífico (MJ/N m ³)	38.52– 46.08	–	31.6– 38.7	30.2–47.2	38.5– 46.0	38.5– 47.2

Fonte: Mathad et al. (2013, p.19).

A utilização de biogás para geração de energia concentra-se em unidades geradoras de pequena e média escala, com capacidade de geração inferior a 100 kW ou entre 100 e 500 kW respectivamente, conforme dados da Tabela 6. As unidades de pequena escala em sua maioria encontradas em vilas afastadas, propriedades rurais ou unidades de tratamento de resíduos, ou seja, em sistemas isolados que carecem de energia elétrica e não são conectadas à rede ou possuem grande quantidade de resíduo que poder ser utilizada para geração de energia. Quanto as topologias utilizadas destacam-se os MCI de ciclo Otto e as MTG com eficiência

elétrica destes sistemas variando entre 4,4 a 35% e 20 a 56,74% respectivamente. O uso de MGT não é dominante em sistemas isolados, como para os MCI, logo esta topologia é utilizada também em microrredes cuja potência nominal varia de 23,6 até 60 kW. Outras topologias como TG e MCI ciclo diesel são utilizadas também em propriedades isoladas.

Tabela 6 – Número de artigos de acordo encontrados na revisão sistemática com a faixa de potência

Faixa de potência	< 100 kW	100 a 500 kW	> 500 kW
Turbina a gás	2	1	8
Microturbina a gás	11	10	2
Motor combustão interna - ciclo Diesel	2	0	2
Motor combustão interna - ciclo Otto	11	6	2
Motor combustão interna - HCCI/ Stirling	1	0	1
Motor combustão interna (Diesel) + Turbina a Gás	0	0	1
Célula combustível - MCFC	0	3	1
Célula Combustível - MCFC + Microturbina a gás	0	1	1
Célula combustível - SOFC	1	5	0
Célula Combustível - SOFC + Microturbina a gás	0	1	0
Célula combustível SOFC + Turbina a gás	3	2	1
Total	31	29	19

Fonte: Autoria própria.

Quando a instalação é de média escala, entre 100 e 500 kW, destaca-se o uso de MTG. As MTG são aplicadas em instalações de 100 kW até 282 kW e têm eficiência elétrica de até 30%. Embora aparentemente a eficiência seja baixa, o uso de MTG é combinado a geração de energia térmica e permite o aproveitamento alto do combustível utilizado. Além das MTG, neste intervalo de potência aparecem as FC com a flexibilidade de combustível e adaptação a demanda necessária. O uso de sistema com FC ainda não é muito difundido como o uso de MTG ou de MCI de ciclo Otto, mas apresenta tendência ascendente a ser utilizado em ciclos de cogeração ou sistemas híbridos. A eficiência é superior à encontrada com o uso de MTG, atingindo níveis como 55,31% para o tipo SOFC e 55,7% para combinação de MCFC com MTG.

Para aplicações de grande escala, com capacidade de geração superior a 500 KW, destacam-se as TG com 8 aplicações enquanto que as demais topologias apenas foram apresentadas em até dois trabalhos. TG são utilizadas em unidades maiores pela otimização do uso de combustível proporcionada pelo ciclo combinado com turbinas de alta, média e baixa pressão em ciclo regenerativo. Embora destaca-

se em número de pesquisas realizadas, a eficiência de uma TG foi de 40,67%, para um sistema de potência nominal igual 950 kW, enquanto que a combinação de MCFC com MTG expôs a eficiência elétrica de 59,2% para potência nominal de 965 kW. O investimento alto para a instalação de um sistema com FC ainda limita a sua utilização em grande escala.

As revistas técnicas em que os trabalhos foram publicados em sua maioria, apresentavam enfoque para geração de energia elétrica, ou energia elétrica de um modo geral visto a correspondência com o tema. Porém, trabalhos relevantes para o contexto do trabalho foram encontrados em revistas técnicas com temas que englobassem energias renováveis, energia mecânica e energia térmica conforme gráfico da Figura 13. As revistas *Applied Energy*, *Energy Conversion and Management* e *Applied Thermal Engineering* tiveram o maior número de trabalhos encontrados 10, 7 e 5 respectivamente.

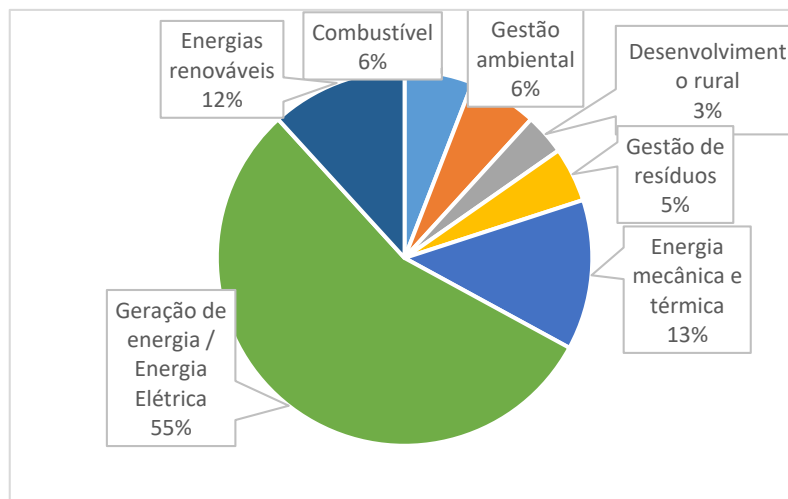


Figura 13 – Categorização de acordo com o tema das revistas técnicas

Fonte: Autoria Própria

De acordo com Garcez (2016), o interesse em geração de energia proveniente de fontes renováveis, assim como o interesse por microrrede aumentou rapidamente no período após os anos 2000. O número de artigos encontrados por este estudo (igual a 85), de acordo com a data de publicação estão apresentados na Figura 14. Observa-se que o interesse pela geração de energia a partir do biogás teve evolução considerável a partir do ano de 2007, com o auge entre os anos 2014 e 2015 (GARCEZ, 2016).

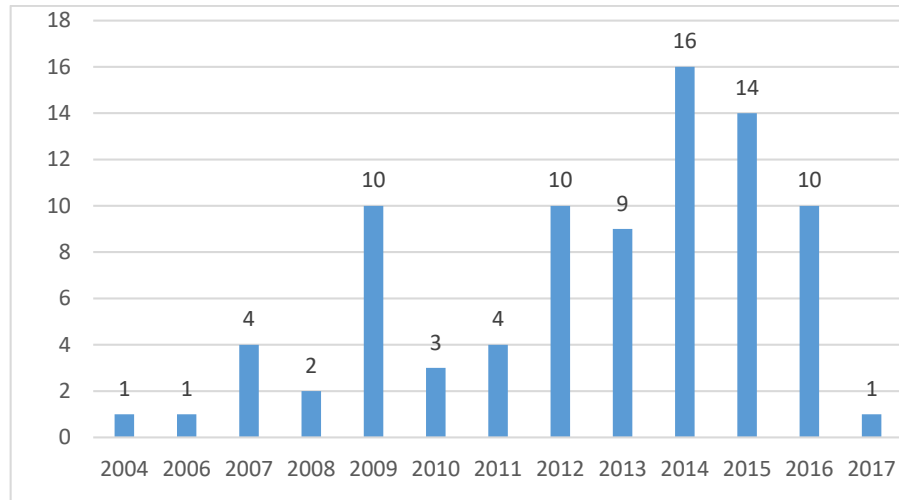


Figura 14 - Data de publicação dos artigos
Fonte: Autoria própria.

As duas topologias de sistemas de geração de energia elétrica a partir do biogás que se apresentaram maiores números de artigos selecionados pela revisão sistemática são a microturbina a gás (MTG) e o motor de combustão interna (MCI) de ciclo Otto conforme apresentado na Figura 15. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** As MTG apresentaram a maioria dos artigos encontrados até o ano de 2010, e mantiveram números consideráveis após este período. Por outro lado, para o uso dos MCI de ciclo Otto, o número de artigos foi relevante nos três períodos de tempo analisados: até 2010, até 2014 e até o momento em que este trabalho foi elaborado.

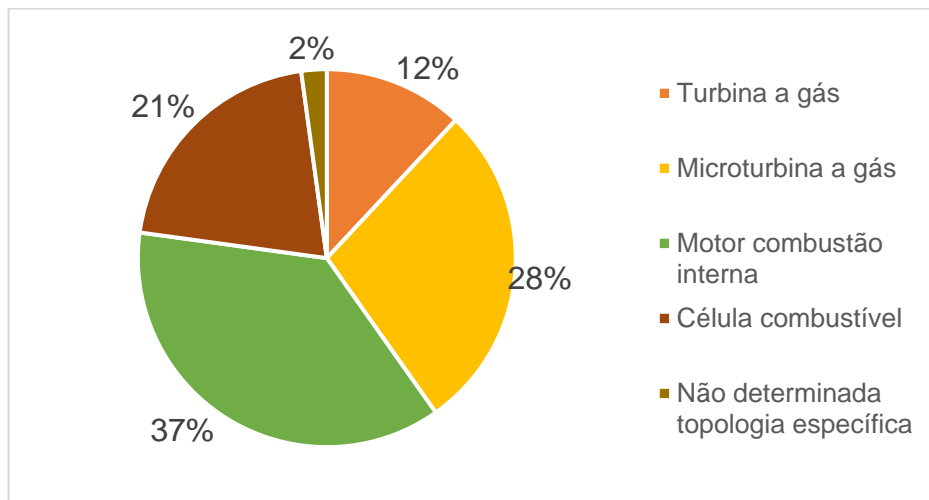


Figura 15 - Percentual da quantidade de artigos por topologia analisada
Fonte: Autoria própria.

5 ANÁLISE DA GERAÇÃO

De acordo com o Rohstoffe (2010), o interesse da geração de energia elétrica a partir do biogás provém da capacidade máxima de geração atingida com um custo aceitável. Para demonstrar a capacidade desta modalidade de geração, seu estudo demonstra que os parâmetros iniciais são a carga orgânica volumétrica (COV) e o tempo de retenção (TR) da matéria orgânica no interior do biodigestor. A COV relaciona a quantidade introduzida de acordo com a concentração da matéria orgânica, ou seja, a porcentagem de material seco contida, expressa como mostra na equação (13):

$$COV = \frac{\dot{m} \cdot c}{V_R \cdot 100} \left[\frac{kg}{m \cdot d} \right] \quad (13)$$

em que \dot{m} representa o valor da quantidade introduzida ao biodigestor em kg por unidade de tempo, c representa a concentração de matéria orgânica seca em valor percentual, e V_R o volume do reator em m^3 . A partir do cálculo de COV do sistema como um todo, considera-se o tempo médio que o material permanece no interior do biodigestor para o dimensionamento do reservatório de biogás. O valor do TR é inversamente proporcional à carga volumétrica orgânica, e eles devem ser bem estudados para que a quantidade de microrganismos seja suficiente para efetuar a decomposição do material de acordo com a taxa de decomposição do material. Para aumentar a eficiência, as bactérias devem estar em contato com todo o material, e isso é possível com soluções simples como a inclusão de um agitador no biodigestor. Considera-se que caso necessário seja utilizado à fragmentação anterior a entrada do substrato no biodigestor para redução do valor do TR (ROHSTOFFE, 2010).

A geração do biogás pode ser classificada de acordo com critérios de qualidade dos substratos, tipo de alimentação do biodigestor, o número de fases e a temperatura do processo de decomposição. Estes critérios impactam diretamente na capacidade de processamento do gás e determinam qual equipamento técnico será utilizado na planta geradora. Tendo os parâmetros iniciais estabelecidos, COV e TR, deve-se considerar quais técnicas serão utilizadas para a geração do biogás. Para a geração do biogás, os biodigestores são compostos por um reator de gás, sistema de aquecimento, equipamentos de agitação e sistema de retirada de sedimentos.

Quaisquer sejam os parâmetros, as etapas de processamento seguem o padrão: gerenciamento do substrato, geração do biogás, manejo do biofertilizante e armazenamento do biogás (MAKARUK, A; MILTNER, M; HARASEK, 2010).

Considerando a variabilidade de combinações possíveis para a implementação do biogás para a geração de energia, considerações sobre a qualidade do biogás e seus impactos serão apresentadas nesta seção. Do mesmo modo, informações sobre o desempenho de geração, quanto a eficiência e as particularidades encontradas na revisão sistemática, dentre outros fatores que influenciam no processo de geração de energia elétrica a partir do biogás.

5.1 QUALIDADE DO BIOGÁS

De todos os elementos do biogás, o elemento de grande importância é o CH_4 , que é sua parte combustível. O nível de metano influencia diretamente no poder calorífico inferior¹ (PCI) do biogás, determinante da capacidade calorífica do gás. Dada sua importância, o biodigestor deve possuir sensores, infravermelhos ou por condutividade térmica, que identifiquem as concentrações de CH_4 para avaliar a sua produtividade. Verifica-se que o tipo de matéria prima, e as condições do processo de digestão anaeróbica influenciam nas concentrações de componentes do biogás, variando o CH_4 entre 55 a 75% do gás gerado pela digestão anaeróbica. Este percentual não deve ser inferior a 40%, pois esse nível impossibilitaria sua utilização em motores ou turbinas. O PCI, representado por kcal m^{-3} , é aproximadamente igual a 2000 kcal m^{-3} para concentrações de CH_4 iguais a 20%, enquanto que é equivalente a 6000 kcal m^{-3} para aproximadamente 65% de volume do CH_4 , podendo atingir até $12000 \text{ kcal m}^{-3}$. Ainda, o CH_4 não é o único componente que influencia no processo de geração, existem outros componentes à serem considerados para o desempenho de geração e utilização do biogás (ROHSTOFFE, 2010).

Os componentes diluentes presentes no biogás, principalmente o CO_2 , H_2O e N_2 , afetam as propriedades de combustão do gás. Caso haja uma redução na relação de CO_2 com CH_4 , há impacto no equilíbrio dos fluxos de massa e perturbação

¹O poder calorífico inferior consiste na quantidade de energia liberada pelo processo de geração do biogás. Este valor é a multiplicação entre o valor do poder calorífico do metano ($9,95 \text{ KWh/m}^3$) e a porcentagem de metano presente no biogás. (DE SOUZA et al., 2016)

ao processo de digestão. Embora, tipicamente o CO_2 e a H_2O sejam considerados quimicamente inertes à combustão, em condições de baixa pressão, ambos comprometem o PCI e a temperatura de chama adiabática de modo mais evidente que o N_2 . Estas características influenciam na emissão de NO_x , cuja taxa de emissão pode ser amortizada com a utilização da recirculação de gases. A recirculação de gases ocorre por meio de um exaustor (RGE), como alternativa para a redução da temperatura interna. Esta recirculação ocorre com o retorno do gás para a câmara de combustão, como um diluente, contribuindo para a redução da concentração de O_2 , o que restringe a temperatura máxima da chama a ser gerada na combustão. Para que o RGE seja implementado, necessita-se a instalação de um resfriador para o exaustor anterior a inserção na câmara de combustão. Embora o uso de RGE contribua na restrição de temperatura, este processo causa também a redução dos limites de estabilidade como, por exemplo, a redução do percentual de O_2 é um fator limitante para a estabilidade da combustão em níveis de 16-18% da mistura ar-combustível (BOLIN, 2014).

A COV pode ser estimada com verificação da quantidade de animais ou dejetos em um intervalo de tempo. De Souza *et al.* (2016) em seu estudo analisou a produtividade de duas unidades geradoras provenientes de resíduos de abatedouro e a outra com dejetos suínos. Ambas unidades utilizaram um MCI de ciclo Otto acoplado à um GS de 4 pólos, potência nominal de 100kVA, velocidade de rotação nominal de 1800 rpm conectado a tensão da rede trifásica de 220 V. Para dejetos suínos, o PCI encontrado neste estudo equivale a 5,97 kWh/m³, enquanto que para resíduos de abatedouro igual a 6,97 kWh/m³. Considerando que para cada animal existe uma quantidade de dejetos diários, estima-se a quantidade de animais máxima de acordo com o tamanho do biodigestor disponível conforme o TR estimado (DE SOUZA *et al.*, 2016).

De acordo com a fração de CO_2 presente no biogás, a mistura de ar-combustível pode ser classificada em mistura rica ou mistura pobre. Caso a quantidade de ar seja inferior a quantidade de combustível, tem-se a razão menor do que 1 indicando uma mistura rica. Caso contrário, quando houver mais ar do que combustível, a razão maior do que 1 indica uma mistura pobre. Considerando pequenas variações da razão relativa entre ar e combustível: mistura rica a razão é igual a 0,98, e mistura pobre equivalente à razão de 1,05. Caso o biogás seja misturado em mistura pobre, a presença de CO_2 será proporcional a demanda de

combustível e de óxidos de nitrogênio (NO_x), sendo NO ou NO_2 . Uma alternativa apresentada para este caso é a diluição do biogás com CO_2 e N_2 . Com o biogás diluído, haverá redução de emissão de NO_x , e ainda elevação da estabilidade de chama no interior da câmara de combustão (BOLIN, 2014).

Ambos os tipos de misturas, rica ou pobre, indicam que presença de CO_2 é inversamente proporcional à potência de saída, ou seja, a potência de saída tende a diminuir conforme a concentração de CO_2 aumenta. Em geral, estudos que utilizam biogás simulado, apresentam variação entre 10 e 40% de CO_2 . A mistura pobre apresentou uma redução significativa de 3% de potência com elevação do percentual de CO_2 de 20 a 40%. Quando este percentual é superior a 40%, o desempenho do motor é comprometido e falhas na ignição podem ocorrer comprometendo o seu funcionamento. Isto se deve ao fato que, a pressão do compressor atinge o valor mínimo para concentração de 40% de CO_2 . Dessa maneira, o autor sugere que o biogás tenha um limite superior de concentração de CO_2 , que caso ultrapassado, exija um processo de purificação. Além disso, a razão da mistura ar-combustível deve manter-se entre 1,05 e 0,95 pois estes são valores que mantêm a eficiência elétrica em seu valor máximo, e com relativamente baixo nível de emissão de gases como hidrocarbonetos e monóxido de carbono (HUANG; CROOKES, 1998).

De maneira geral, quanto maior a concentração de CH_4 , mais puro é o biogás. O metano queima duas vezes mais rápido que o diesel, e assim, a combustão é mais rápida do que o dobro da velocidade de queima do diesel. Além disso, a concentração de CO_2 impacta significativamente no volume necessário para suprir a demanda de energia para a combustão. Com o aumento de volume de gás, o volume de ar absorvido pelo sistema é reduzido impactando na composição da mistura ar-combustível. Caso o gás possua no mínimo 50% de metano, o volume de gás será pequeno comparado ao volume de ar, logo, o impacto das impurezas são desconsiderados na operação do motor (MIKULSKI; WIERZBICKI, 2016).

5.2 DESEMPENHO DE GERAÇÃO

A eficiência de geração térmica, quando utilizado o gás natural, é praticamente constante, independente da relação de carga acoplada a unidade geradora. Embora com eficiência ligeiramente reduzida, o desempenho de geração é

considerado similar para o uso de biogás e o gás natural. Quando o biogás é utilizado, o mesmo comportamento estável do uso de gás natural pode ser observado quando o percentual de carga está acima de 70%. Ambos combustíveis apresentam eficiências elétricas proporcionais à relação de carga ao qual o sistema é submetido, sendo que o uso de biogás pode resultar em eficiência superior ao uso de gás natural. Assim, a quantidade de energia que pode ser gerada, proveniente da combustão interna a partir do biogás, é dependente da eficiência relacionada a razão de carga acoplada ao motor. O fator de utilização para a geração de eletricidade, ou seja, o custo para que o aproveitamento do biogás gere o máximo trabalho é inferior ao custo do gás natural (GAZDA; STANEK, 2016).

Em prol da análise de eficiência elétrica de acordo com a matéria-prima utilizada, vários estudos analisam o resultado da operação simulando variação da concentração de CH_4 do biogás. Em seu estudo, Assadi *et al.* (2014) demonstrou que para a operação de uma MTG, de até 100 kW, a eficiência elétrica é proporcional a potência gerada pelo sistema. Comparando os resultados ao uso do gás natural, a eficiência é reduzida, embora ainda seja proporcional ao percentual de CH_4 , para uma mesma demanda. Quando a concentração diminui, o ponto de operação da MTG desvia do ponto ótimo para o qual foi projetado para o uso de gás natural. Para concentração de 45% de CH_4 , por exemplo, a eficiência mínima é igual a 27,5% para uma demanda mínima de 50 kW. Quando o valor da demanda dobra, igual a 100 kW, a eficiência elétrica atinge o pico de 30,5%. Comparando esta eficiência às mesmas demandas usando gás natural, a diferença é apenas uma redução de 0,7%. Além deste fator, o estudo também apresentou a variação do fluxo de combustível, temperatura ambiente e pressão interna de acordo com a composição do biogás. Para os autores, o uso de biogás em MTG possui efeitos levemente negativos comparando com gás natural e recomenda-se o uso apenas para unidade geradora de pequena escala (ASSADI, *et al.*, 2014).

A capacidade de geração, em MCI de ciclo diesel, é impactada pelo combustível que é utilizado como combustível piloto, além do biogás para a combustão. O combustível piloto é utilizado para iniciar a combustão, permitindo a queima do biogás. Caso seja utilizado apenas um combustível, misturado ao ar no interior da câmara de combustão, a pressão interna será similar para todos os níveis de carga. Quando se utiliza dois combustíveis, esta pressão é levemente superior para um mesmo nível de carga, permitindo que se tenha maior fluxo. Além disso, o atraso

na ignição para o uso de dois combustíveis pode ser superior ao atraso quando somente um combustível é usado. Este ponto é importante de ser analisado, pois o este atraso impacta na eficiência do processo de combustão. Quando o atraso é nulo, tem-se o volume mínimo com o pistão no ponto mais alto. Conseqüentemente, conforme aumenta o atraso na ignição, o pistão movimenta-se para baixo e até o ponto mais baixo onde atinge o volume máximo influenciando na velocidade da combustão. Assim, esse atraso é ocasionado pela alteração do volume de compressão, redução da temperatura de carga, e também pelo poder calorífico do biogás da mistura (BARUA et al., 2013).

Sadhukhan (2014) percebeu uma necessidade que se assemelha a realização deste trabalho: o autor buscava oferecer as indústrias uma análise de tecnologias disponíveis e adaptáveis ao uso de águas residuais, ou seja, de esgoto. O estudo se baseou nas topologias: Célula Combustível a Membrana Trocadora de Prótons, do inglês *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*, MTG, MCI de ciclo diesel e de ciclo otto e SOFC combinada a uma TG. PEMFC, o tipo de célula combustível que utiliza o hidrogênio e o oxigênio, foi definida como a tecnologia com menor impacto ao meio-ambiente dentre as analisadas pelo autor, seguida por SOFC, SOFC-TG, MCI ciclo diesel, MTG e MCI ciclo otto com o maior potencial impacto. Ainda, o autor efetuou comparação da geração de eletricidade com o uso de cada topologia usando biogás e gás natural considerando a emissão de gases poluentes. Para o autor, a emissão de gases de efeito estufa e ozônio fotoquímico são os principais fatores que determinam a escolha da tecnologia a ser implementada (SADHUKHAN, 2014).

Em seus estudos, Sadhukhan (2014) analisou a geração para a mesma quantidade de biogás, equivalente a 11340 MJ ou 3150 kW, em cada topologia utilizada para sua transformação cujos resultados estão dispostos na Tabela 7. Observa-se que a combinação de uma MTG à SOFC permitiu a geração de 1826,9 kW, quantidade relevante comparada ao uso de MTG, que resultou em apenas 945 kW. A eficiência elevou-se de 30% para o uso de MTG para 57,9% resultante da combinação de MTG a SOFC. Considerando que a energia química a ser convertida, presente no biogás, não varia, verifica-se que quanto maior a eficiência elétrica, menor a eficiência térmica e vice-versa. Logo, a quantidade de energia térmica gerada para o caso com a quantidade mais elevada de energia elétrica, será o menor valor gerado de energia térmica, apenas 693,1 kW. Deve-se considerar que em cada topologia,

haverá uma perda de energia diferente devido ao equipamento utilizado e sua eficiência equivalente. Ainda, com este estudo pode-se perceber que a quantidade de energia elétrica gerada por uma MTG e um MCI de ciclo Otto são similares. Em resumo, o autor defende que cada topologia deve ser utilizada de acordo com a demanda de energia térmica ou por eletricidade de cada instalação. Caso tenha-se uma maior demanda por energia térmica, convém utilizar MCI de ciclo Otto ou a PEMFC pela alta eficiência de conversão (SADHUKHAN, 2014).

Tabela 7 - Eletricidade e calor gerado a partir de 11340 MJ de biogás

	Eletricidad e(kWh)	Eficiência elétrica (%)	Calor (kWh)	Eficiência térmica (%)
Proton exchange membrane fuel cell – PEMFC – 2 kWe	1008,0	32,0	1732,5	55,0
Solid oxide fuel fell (SOFC) – 125 kWe	1480,6	47,0	1039,5	33,0
SOFC - TG – 180 kWe	1826,9	57,9	693,1	22,00
Micro turbina a gás –100 kWe	945,0	30,0	1417,5	45,0
Motor Combustão – Ciclo Diesel	820,0	26,1	1396,1	44,3
Motor Combustão – Ciclo Otto	972,78	30,9	1587,2	50,4

Fonte: Adaptado de Sadhukhan (2014, P.199)

Considerando os resultados da revisão sistemática, foram filtrados os trabalhos relacionados que apresentassem dados de eficiência e potência que pudessem ser utilizados para comparações. O Apêndice A reúne as informações sobre o trabalho incluindo os autores, título, jornal onde foi publicado, ano de publicação, topologia utilizada, assim como o modo de operação, eficiência elétrica e a capacidade de geração de cada estudo. Dentre os trabalhos, alguns autores analisaram mais de uma topologia, logo o número de dados é ligeiramente superior ao número de trabalho encontrados. De acordo com a topologia utilizada, os resultados estão dispostos na Figura 16 conforme eficiência elétrica (%) e potência elétrica (kW). Dentre as possibilidades estão o uso de apenas uma topologia, sendo elas: TG, MTG, MCI de ciclo otto, MCI de ciclo diesel, MCI HCCI, MCFC e SOFC; ou a combinação de duas topologias: MCI combinado a TG, MCFC combinada a MTG, e a combinação de SOFC à MTG ou à TG. Dentre os resultados, quanto à capacidade de geração foram divididas entre as topologias cuja capacidade de geração é inferior a 100 kW, entre 100 e 500 kW e aquelas cuja capacidade é superior a 500 kW.

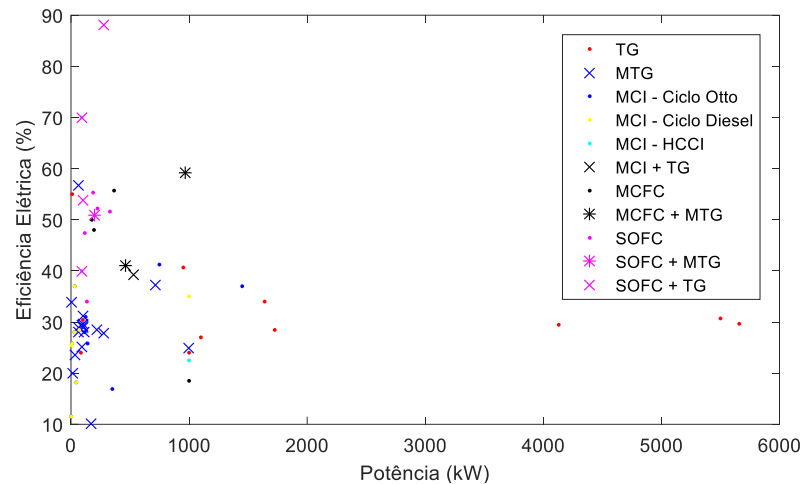


Figura 16 - Variação da eficiência em relação a potência resultantes da revisão sistemática

Fonte: Autoria própria.

Para aplicações onde a demanda é inferior a 100 kW, as topologias encontradas na revisão foram TG, MTG, MCI de ciclo Otto, ciclo diesel ou ainda do tipo HCCI e as FC do tipo SOFC. Observa-se da disposição dos dados mostrados na Figura 17 que a eficiência elétrica concentra-se na faixa de 20 a 40%, principalmente para os MCI e MTG que apresentam vários dados neste intervalo. Assim, indica-se que para unidades geradoras cuja potência é inferior a 100 kW, são utilizados principalmente as MTG e MCI de ciclo otto conforme indicado pelo resultado da revisão.

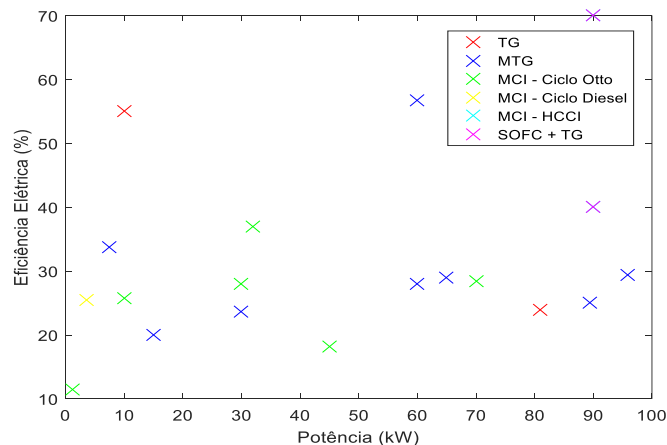


Figura 17 - Relação entre potência e eficiência elétrica para unidades inferiores a 100 kW

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que existem resultados que diferem para um mesmo valor de potência, e também os que se sobrepõem. Analisando os resultados da mesma potência, pode-se citar TG com 10 kW de potência apresentam eficiência de 55%, e MCI do tipo otto, apresentaram uma eficiência de 25,8%. Esta diferença ainda ocorre

em uma mesma topologia, como as MTG que apresentam eficiência elétrica diferentes para a mesma potência instalada. O modo de operação, a eficiência dos equipamentos que compõe a unidade junto à MTG ou a composição do biogás interferem no resultado da eficiência. Como cada estudo apresenta duas particularidades, os estudos apresentaram eficiências com valores diferentes. Considerando os resultados que se sobrepõem, a potência de 90 kW foi utilizada em MCI do tipo HCCI e na combinação de SOFC com uma TG. O motor instalado apresentou eficiências de 40 e 70% para esta potência, e coincidentemente a combinação de SOFC e TG também teve este resultado. O MCI do tipo HCCI apresenta vantagens em relação aos ciclos tradicionais, resultando em potência acima no nível esperado para o uso de um MCI. Assim como a SOFC, cuja eficiência elevada indica que seu uso gera um melhor aproveitamento do combustível do que o uso de TG.

Entre 100 e 500 kW, foram encontrados trabalhos usando TG, MTG, MCI de ciclo otto, e as FC do tipo MCFC e SOFC e as combinações destas com TG como apresenta a Figura 18. TG e MTG concentram-se em trabalhos cujos equipamentos apresentam potência nominal de 100 kW com eficiências de 30,4% para o uso de TG e 29,1, 29,6 e 31,1% para o uso de MTG. O uso das FC de tipo MCFC e SOFC tem eficiência elétrica de aproximadamente 50%. A combinação com a TG faz com que a eficiência seja levemente reduzida ao ser combinada à MCFC, contrariando a elevação de potência para o uso da combinação com SOFC. A eficiência mínima de 10% foi resultado de um sistema de identificação de performance. O resultado apresentado considerou diferentes percentuais de CH₄ presente no biogás, e a câmara de combustão precisou ser remodelada devido ao limite de volume em seu interior que limitava o seu funcionamento. Com a remodelagem, a eficiência tende a aumentar conforme ocorre aumento do fluxo de biogás para a câmara de combustão (CHEN; LEE; YANG, 2009).

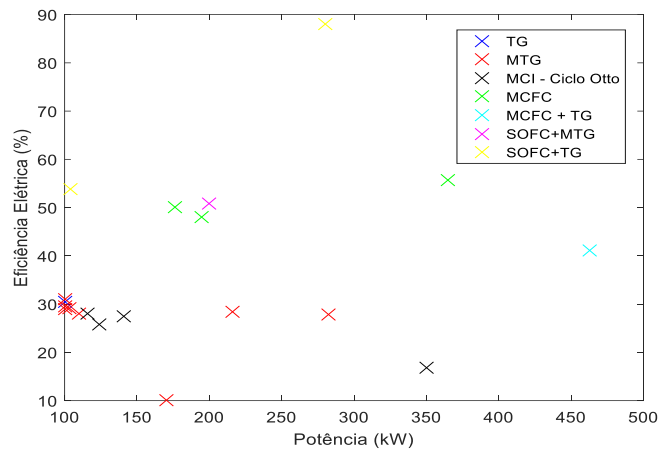


Figura 18 - Relação entre potência e eficiência elétrica para unidades de 100 a 500 kW
Fonte: Autoria própria.

Em unidades geradoras com alta demanda, como vilas afastadas ou indústrias cuja demanda é superior a 500 kW, convém utilizar uma topologia de conversão que seja projetada para esta demanda. TG são utilizadas amplamente em unidades maiores, visto o resultante custo benefício que proporcionam ao permitir o acoplamento de mais turbinas para alta, média e baixa pressão. É possível observar que potências elevadas, maiores que 1 MW, apresentaram apenas o uso desta topologia como mostrado a Figura 19. As topologias MTG, MCI, e FC apresentam resultados, também dispostos na Figura 19, que indicam que os estudos de simulação para análise da performance utilizam potência nominal igual a 1000 kW.

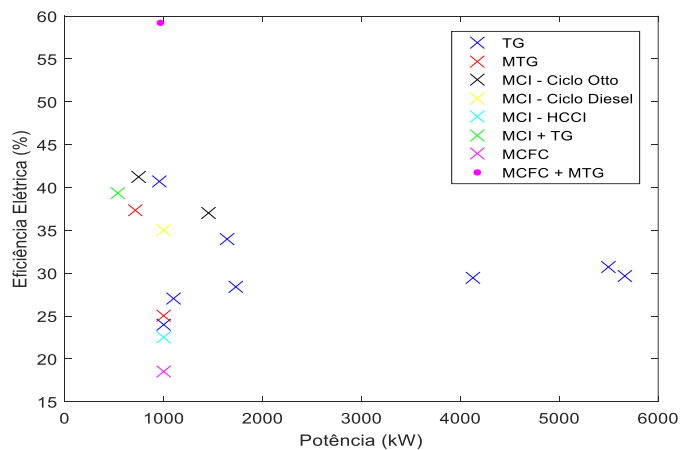


Figura 19 - Relação entre potência e eficiência elétrica para unidades superiores a 500 kW
Fonte: Autoria própria.

O estudo de Verda e Sciacovelli (2012) apresentou a eficiência elétrica de 59,2%, o valor mais alto dentre os resultados de potência superior a 500 kW. Em seu trabalho, antes de realizarem a simulação, os autores analisaram os parâmetros de

matéria-prima, demanda necessária e características dos equipamentos em prol da otimização do sistema. Com estas análises, optaram por incluir um compressor de ar na entrada do cátodo da MCFC, assim como um sistema de recirculação de gases na saída da célula e um evaporador para otimizar o fluxo de saída da MCFC (VERDA; SCIACOVELLI, 2012).

O número de artigos encontrados na revisão sistemática que utilizaram a topologia MTG, para a conversão de energia química do biogás para a energia elétrica, foi de 17 artigos. A Figura 20 apresenta um panorama destas aplicações organizadas de acordo com a faixa de potência entre 7,5 kW e 1000 kW, concentrando-se abaixo de 200 kW. Contrariando o estudo de Assadi et al. (2014), não foi possível verificar o aumento proporcional à potência de saída visto que os resultados apresentam a potência nominal da topologia. Porém, em análise do uso de MTG em diferentes faixas de potência, observa-se que ela se concentra entre 20 e 35%. A variação da eficiência pode ser aproximada por uma curva polinomial de terceiro grau, gerada a partir da função *Basic Fitting* do programa Matlab conforme a equação (14):

$$y = 1,483 \cdot 10^{-7} x^3 + 0,0002103 x^2 - 0,06968 x + 32,99 \quad (14)$$

esta curva apresenta a tendência da eficiência em relação a potência nominal do equipamento utilizado. Na equação x corresponde à potência da MTG, em kW, e y corresponde a eficiência elétrica esperada ao ser utilizado o biogás, em percentual equivalente.

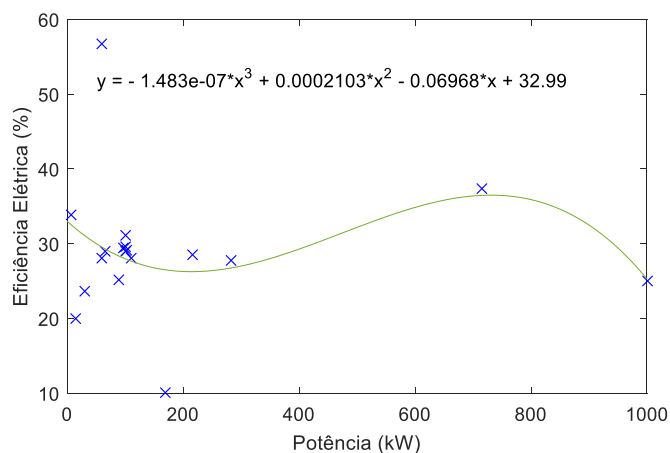


Figura 20 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência da microturbina a gás

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a eficiência da MTG varia entre 10% e 56,74% nos resultados encontrados na revisão sistemática. Comparando a outras topologias cuja capacidade de geração seja inferior a 100 kW, o rendimento inferior a 20% é considerado relativamente baixo, e foi encontrado em um estudo de caso para geração de eletricidade a partir do biogás de um lago. Ainda que a concentração de CH₄ utilizada no estudo era de 55%, cujo valor está dentro dos valores pré-estabelecidos para a geração a partir do biogás, houveram dificuldades em conter os vazamentos do biogás, pois este era armazenado com uma cobertura em um lago. Assim, a geração de energia foi comprometida por estes vazamentos e o resultado final foi inferior ao esperado. O outro extremo do gráfico, o valor mais elevado de eficiência dentre os trabalhos que usem MTG, foi um estudo cuja eficiência resulta em 56,74% em uma usina geradora a partir do biogás que funciona há 10 anos, com duas turbinas de 30kW. A média de geração desta usina é de 0,4154 kW por m³ cuja matéria-prima é proveniente de uma fazenda de gado leiteiro. Nesta usina, um GS de ímã permanente permite a operação deste sistema que abastece duas vilas, sendo conectado à rede de distribuição ou podendo funcionar em sistema isolado caso necessário. Observa-se que a não proporcionalidade entre a potência e a eficiência para usinas com MTG ocorre devido a variabilidade de matéria-prima, instalação e condições da planta geradora (JASH; SINGH, 2015).

Os resultados da revisão sistemática para o uso de MCI, como motor primário da planta geradora, apresentam a inclusão de MCI de ciclo Otto, ciclo diesel, HCCI ou ainda MCI combinado com TG. Observa-se que a aplicação predomina em unidades de pequena escala, como ilustra a concentração de dados na Figura 21. A abrangência desta topologia é vasta, incluindo motores com 1,15 kW até 1450 kW de potência nominal. A eficiência varia entre 11,5%, para unidade com capacidade de geração de 1,15 kW com MCI de ciclo Otto, até 70% para uma unidade de 90 kW com operação de um MCI do tipo HCCI.

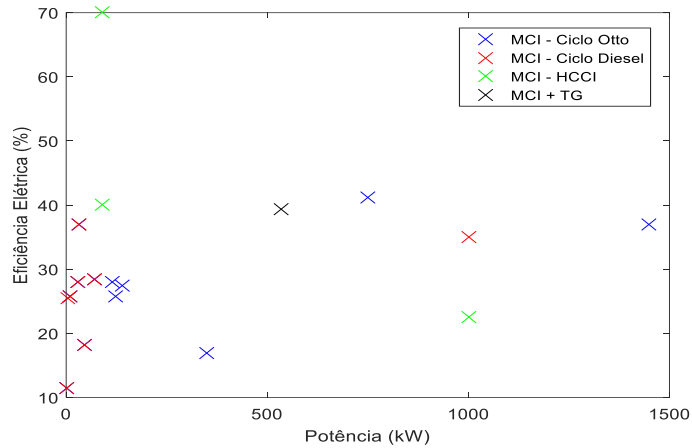


Figura 21 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência de motor combustão interna
Fonte: Autoria própria.

Os motores de MCI ciclo otto são a variação dentre os MCI mais utilizada para a geração de energia a partir do biogás, assim como para outras aplicações, dada a simplicidade de operação e robustez do equipamento, além do custo-benefício atrativo. A produção de gado leiteiro, em fazendas do Canadá por exemplo, apresentou eficiência elétrica de 43%, a eficiência de mais alto percentual dentre os estudos para o uso de ciclo otto indicada na Figura 22. Além disso pode-se observar que a relação entre a potência e a eficiência não segue uma linha de tendência, apresentando 16,9% de eficiência para 470 kW de capacidade de geração e 18,2% para 45 kW. Assim, com bases nos dados existentes, pode ser aproximada por uma curva polinomial cúbica, obtida na função *Basic Fitting* do programa Matlab, representada pela equação (15):

$$y = -4,484 \cdot 10^{-8}x^3 + 8,591 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,02259x + 26,06 \quad (15)$$

esta curva apresenta a tendência da eficiência em relação a capacidade de geração do equipamento utilizado. Na equação x corresponde à potência do MCI de ciclo otto e y a eficiência elétrica esperada ao ser utilizado o biogás neste topologia.

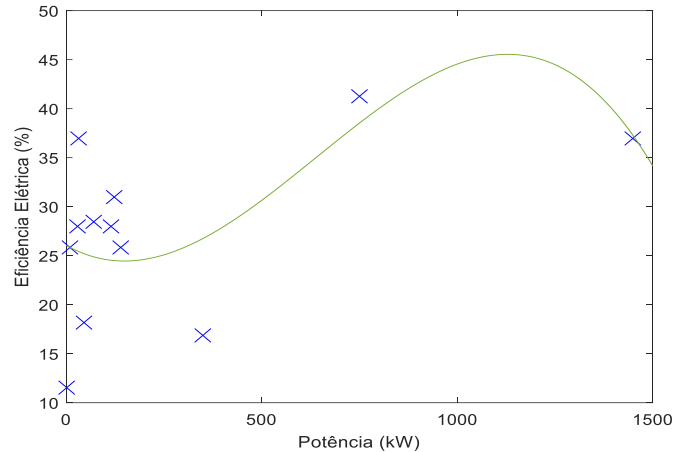


Figura 22 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência de MCI de ciclo Otto
Fonte: Autoria própria.

Para potências inferiores a 100 kW, MCI de ciclo Otto, podem ser acoplados em sistemas híbridos com outras topologias, para contribuir no aproveitamento do combustível. Um exemplo disto é a pesquisa de Gazda e Stanek (2016) que desenvolveram um algoritmo para análise de um sistema com painel fotovoltaico e um MCI de ciclo Otto. Dos 1816kW fornecidos pela energia química do biogás, com percentual de CH₄ estimado em 65%, a geração de energia apresentou 44,44% de eficiência térmica e 41,23% de eficiência elétrica. O biogás permite a geração de energia independente de condições climáticas, resultando ao longo do período de um ano em aproximadamente 64,7% da eletricidade gerada, enquanto que o painel fotovoltaico forneceu apenas 8,9% da energia elétrica (GAZDA; STANEK, 2016).

Com relação ao uso de TG, observa-se nas relações entre potência e eficiência elétrica, apresentadas na Figura 23, que há um intervalo vasto de aplicações variando entre 10kW até 5 MW. A eficiência correspondente à aplicação desta topologia varia entre aproximadamente 25 a 35%, com a exceção de um estudo cuja eficiência resultante atingiu 55%. Com a função *Basic Fitting*, a relação entre a potência e a eficiência elétrica de uma TG é aproximada pela equação (16):

$$y = -2,785 \cdot 10^{-10}x^3 + 2,937 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,009078x + 37,57 \quad (16)$$

em que x representa a potência nominal da TG, em kW, enquanto que y representa a eficiência elétrica estimada de acordo com a potência, em percentual.

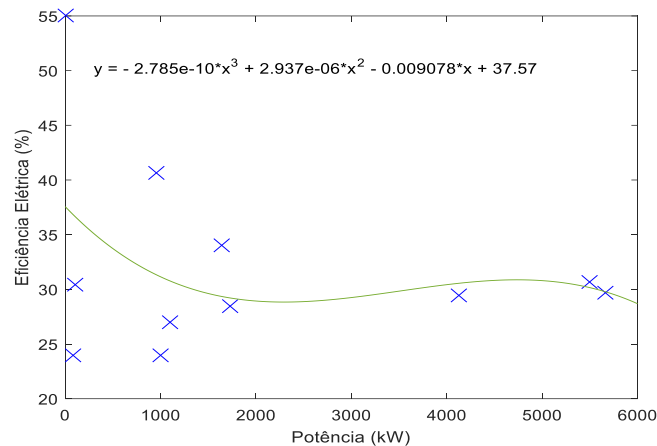


Figura 23 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência de turbina a gás
Fonte: Autoria própria.

Em estudo com uma TG de apenas 10 kW, atingiu-se a eficiência de 55% acoplado à uma TG com sistema de armazenamento de energia com banco de baterias cujas capacidades entre 3,3 a 9 kW permitiram a geração da energia conforme a disponibilidade do biogás. A carga mínima conectada ao gerador acoplado a turbina deve ser de 70%, devido a capacidade limitada de 10 kW da TG pois é acima deste valor de carga que o gerador funciona de maneira estável. Quando combinada o uso de TG com a SOFC resultou em eficiência elétrica de 70%, que é a soma das eficiências isoladas de cada topologia. Essa eficiência é resultante do aproveitamento de combustível no sistema pelas 643 células em série totalizando 60 kW e uma turbina de 30 kW. Ainda, a inserção de um super capacitor (SC) ao sistema contribuiu para o aumento da eficiência. Foi inserido um SC ao sistema de excitação do gerador, e um retificador de diodo simples acoplado ao gerador para o controle de variação de potência conforme a velocidade. O estudo também apresentou o design de controlador digital para o barramento CC e o CA do sistema conforme a demanda de carga (BAUDOIN et al., 2016b).

O uso de FC como único método de conversão fora encontrado nos resultados da revisão sistemática para FC do tipo MCFC e SOFC, como também acoplados à TG e a MTG, cujas eficiências estão dispostas na Figura 24. MCFC apresenta performance consideravelmente alta, independente da potência da planta. Embora a eficiência seja elevada quando comparada ao uso de MTG ou MCI, o tempo de retorno de investimento de uma MCFC é alto e inviabiliza sua aplicação em escala comercial. O uso de MCFC apresentou média de 43,05% de eficiência, com limite

superior de 55,7% e limite mínimo de 18,5%. O percentual mínimo resultou da aplicação de biogás com apenas 39,7% de CH₄ em MCFC. Este resultado surgiu da realização de testes para mistura de hidrogênio puro ao biogás. A máxima eficiência de FC foi atingida no estudo de Nicollin e Verda (2010), com base no design de uma planta de gás natural, com algumas alterações do sistema. Dentre as adaptações para o uso de biogás, foram retirados os trocadores de calor para que houvesse geração de energia térmica e de eletricidade de forma separada. Utilizou-se um compressor de ar para alimentação da MCFC e os gases de saída eram injetados na câmara de combustão. Segundo o autor, a eficiência é proporcional a compressão interna pois há uma maior porcentagem de combustível entrando na célula e posteriormente à câmara de combustão (NICOLIN; VERDA, 2010).

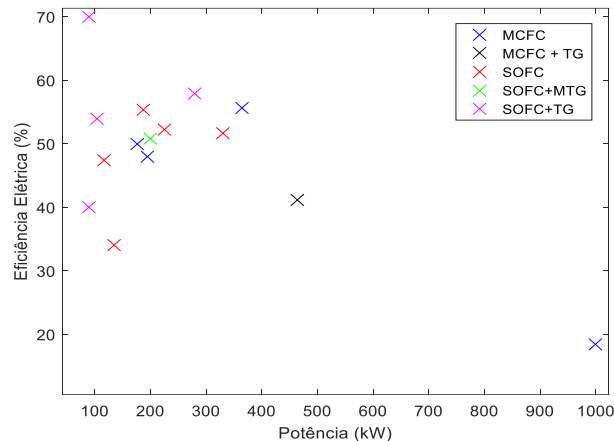


Figura 24 - Variação de eficiência elétrica em relação a potência de células combustíveis
Fonte: Autoria própria.

Recirculação de gases no ânodo da FC, elevação de temperatura do biogás e inclusão de SC de acordo com o tempo de resposta da turbina são alternativas para a otimização do uso de FC para geração de energia a partir do biogás. Com a análise prévia de parâmetros e da proporcionalidade entre quantidade de gás, temperatura e demanda, ocorre a otimização do processo atingindo níveis como 53,9%, 55,31% e 57,9% para o uso de SOFC e SOFC acopladas a MTG. Para o funcionamento da MTG acoplada à uma FC, aproveita-se o calor remanescente na saída da célula para a expansão dos gases e movimento da turbina. Assim, contribuindo para a eficiência no uso do combustível e também na redução de emissão de NO_x.

5.3 COMPRESSÃO

Como o biogás produzido no interior de um biodigestor tem pressão similar a pressão atmosférica, é necessário que este seja comprimido para permitir sua utilização para a geração de energia. O projeto de uma unidade geradora de energia elétrica a partir do biogás deve incluir pelo menos um compressor para a operação. Se este compressor for suficiente para que o biogás flua dentro do sistema, tornam-se desnecessários investimentos para recuperação ou reuso do gás. Assim, verifica-se que otimizar o fluxo do gás e a integração com a geração de calor é um aspecto importante a ser considerado para o aumento da eficiência do sistema. A compressão torna o gás de reabastecimento mais rápido e ainda, permite que o conteúdo armazenado seja suficiente para que o equipamento funcione por um período maior de tempo. Verifica-se que um compressor de três ou quatro estágios, é necessário para o funcionamento a uma pressão de 20 Mpa interna à câmara de combustão. Outra alternativa, é a utilização de múltiplos compressores, que permite um aproveitamento considerável do gás. Porém, o investimento inicial e o custo de operação de múltiplos compressores encarecem e tornam-se evitáveis quando apenas um compressor fornece flexibilidade suficiente à configuração do projeto (HARASEK; MAKARUK; MILTNER, 2010) (MOHANTY; MOHANTY; RAY, 2013).

Em MCI, um dos fatores limitantes para a eficiência é a taxa de compressão. A taxa de compressão é a razão entre o volume do cilindro somado do volume da câmara de combustão dividido pelo volume da câmara. Existem vários estudos que analisam o efeito que esta taxa possui em MCI que utilizam o biogás. Nagaligam, Porpatham e Ramesh (2012) apresentam que o aumento da compressão impacta no aumento do desempenho de um MCI. Para isso, os autores compararam a performance de um motor adaptado para o uso de biogás variando a taxa de compressão entre 9.3:1, 11:1, 13:1, e 15:1 para diversos parâmetros como eficiência, temperatura, emissão e características da combustão como pressão e taxa de liberação de calor. Analisando estas variações, observou-se que há elevação do volume de emissão de NO_x , assim como aumento da eficiência térmica e potência efetiva de saída proporcionalmente ao aumento da taxa de compressão. Além disso, a taxa de liberação de calor aumenta, enquanto que há redução do atraso de ignição, assim como do tempo entre a injeção de combustível e início da combustão, de

maneira proporcional ao aumento da taxa de compressão (NAGALINGAM, PORPATHAM, RAMESH, 2012)

Em outro estudo, Nagalingam, Porpatham e Ramesh (2008), estudaram o efeito da presença dos diluentes, ou seja, na concentração de CH_4 no biogás. Similar ao estudo da taxa de compressão, o estudo conduzido comprovou que reduzindo a concentração de CO_2 , há redução na emissão de hidrocarbonetos e elevação da eficiência térmica em cerca de 3% e eficiência elétrica em 2%. Variando a proporção de H_2 , por exemplo, em 5, 10 e 15%, verificou-se que a adição deste componente pode elevar a eficiência elétrica e térmica enquanto que contribui também para a redução da emissão de hidrocarbonetos. Os resultados da variação de H_2 foram compatíveis com o esperado com a substituição e conseqüente com a redução da concentração de CO_2 , gerando aumento na potência efetiva de saída de 4,7 kW com 41% para 5,4 kW com 20%. Isso se deve ao fato que, quanto menor a presença de CO_2 , maior a concentração de CH_4 e O_2 , elevando a velocidade da combustão e conseqüentemente a potência de saída do sistema de geração (NAGALINGAM; PORPATHAM; RAMESH, 2008).

6 MODO DE OPERAÇÃO

A inclusão da geração distribuída (GD) pode gerar benefícios como a postergação de investimentos para desenvolvimento na capacidade de geração e transmissão necessária com o aumento da demanda, assim como redução no carregamento da rede. Dessa maneira, a GD aparece como uma possível solução para a escassez de combustíveis fósseis no futuro da geração de energia. Tende a tornar-se economicamente viável com a integração de variedade de tecnologias de geração e armazenamento de energia na infraestrutura atual. A operação da GD depende da integração ou interconexão da geração à carga, ou ainda se esta geração está conectada à rede de distribuição convencional. A possibilidade de transição entre os dois casos existe, embora cuidadosamente tratada para que sejam mantidos os valores de tensão e frequência em níveis aceitáveis para que a qualidade de energia seja mantida. Estes níveis são mensurados de acordo com a distorção causada pelos harmônicos entre os terminais de carga e conexão à rede de distribuição. Além disso, a GD também inclui sistemas com duas ou mais formas de energia, caracterizando processos de cogeração (BASAK et al., 2012).

Quando a GD é conectada à carga e à rede de distribuição, esta pode incluir ou não um sistema de armazenamento de energia e sistema de controle de cargas. Em ambos casos, conversores CA-CA ou CC-CA são utilizados para fazer a conversão caso necessário. A interface desta conexão emprega inversores de potência eletrônicos tanto para a carga quanto à rede (CHAKRABORTY, 2011).

6.1 COGERAÇÃO

A energia química presente no biogás pode ser convertida em energia térmica, por meio de um processo de combustão. A energia térmica resultante deste processo, por sua vez, será transformada em energia mecânica por meio de um pistão, por exemplo. Então, esta energia mecânica será transformada em energia elétrica. A cogeração consiste no aproveitamento da energia térmica, gerada no processo de combustão, além do aproveitamento de energia mecânica para a geração

de energia elétrica. Logo, a geração de calor contribui para a viabilidade econômica de projeto cujo demanda por energia térmica localiza-se próxima a unidade de geração. A viabilidade de um sistema que utiliza biogás, a partir de análises econômicas, ocorre quando a capacidade de um biodigestor comporta a partir de 228,24 m³ para geração de eletricidade apenas, e 114 m³/s para quando utilizado para cogeração. Isto porque a energia térmica proveniente da cogeração contribuirá à eficiência do sistema tornando-o viável com quantidade de matéria orgânica reduzida. Assim, entende-se que a eficiência elétrica é um importante critério para a implementação da cogeração (BAUDOIN et al., 2014) (BRAUN; TRENDEWICZ, 2013).

Um dos maiores objetivos da cogeração é reduzir o consumo de matéria-prima, acrescentando a eficiência elétrica do sistema. Usinas de cogeração podem operar de alguns watts até centenas de megawatts, de acordo com os equipamentos utilizados. É comum que sejam empregados MCI em unidades de cogeração, e TG que utilizem contrapressão, que são as turbinas que aproveitam o vapor de alta pressão que sai da caldeira. TG são amplamente utilizadas nos Estados Unidos, todavia, não é comum que se encontre esta topologia em outros países. Isso ocorre porque o investimento inicial para o funcionamento desta turbina encarece o custo do projeto e acaba sendo substituído por outra topologia. Turbinas a vapor ou TG possuem apenas uma parte rotativa, assim, a manutenção deste dispositivo é facilitada, se comparada a manutenção de um MCI cujo equipamento possui vários componentes móveis. TG utilizam o gás combustível comprimido, de modo que é necessário compressor, câmara de combustão, turbina, gerador e equipamentos auxiliares para que esta topologia possa ser utilizada na cogeração como condensadores e trocadores de calor (KAUNDINYA; BALACHANDRA; RAVINDRANATH, 2009).

Para que uma unidade geradora seja considerada autônoma, o balanço energético de potência térmica e elétrica devem ser ajustados de acordo com a demanda. Em geral, sistemas de cogeração unificam a geração de eletricidade, por meio de um MCI, com o processamento do calor gerado pela combustão ou ainda com o vapor gerado em uma TG. Dependendo da matéria-prima utilizada para gerar o biogás e seu respectivo PCI, calcula-se a quantidade estimada de energia contida neste material e a quantidade de energia a ser gerada em um determinado intervalo de tempo, convertendo-se para um valor estimado de energia elétrica. Além disso,

deve-se combinar as informações de capacidade de geração à demanda de carga, para que seja efetuado o dimensionamento dos equipamentos a serem implementados. Após a geração do biogás, o lodo resultante da decomposição pode ser reusado após um processo de secagem. Embora não seja um processo comum, este lodo pode ser levado novamente à TG onde contribuirá, embora em parcela reduzida devido a quantidade inferior de energia contida no material, para o aumento da eficiência do sistema com uma geração de energia elétrica adicional. Para que o balanço energético seja feito de maneira precisa, considera-se importante que sejam analisadas as médias anuais considerando sazonalidades e particularidades de cada localidade (TRUONG; KROST, 2016).

Aliado ao estudo da cogeração, junto à ideia de otimização do combustível, é possível criar um sistema híbrido que inclua duas ou mais topologias para a geração de energia a partir do biogás. Como um exemplo, a adaptação de uma MTG para cogeração junto de uma FC do tipo MCFC em um projeto de Nicolin e Verda (2010) cujo diagrama do projeto segue o diagrama apresentado na Figura 25. Neste estudo fora proposto um sistema isolado em que o ar ambiente é comprimido e enviado para a MCFC, assim como para a TG, conforme os fluxos 15 e 21 indicados na Figura 25. O ar é misturado ao calor proveniente do exaustor da turbina em um recuperador, em que o CH_4 é convertido para H_2 . Esta adaptação permitiu o aquecimento do biogás, anterior à entrada na câmara de combustão, elevando a temperatura e a eficiência da combustão. A expansão dos gases no interior da turbina (G) gera trabalho mecânico (W_m), que por sua vez, faz funcionar o compressor e gera eletricidade por meio do inversor. A utilização de ambas topologias, em mesmo sistema, eleva a eficiência de um sistema para 55 a 60%. Se não houvesse essa integração, o condensador necessitaria de uma fonte externa de calor para atingir a temperatura de operação (NICOLIN; VERDA, 2010).

6.2 SISTEMAS ISOLADOS

Um sistema isolado da rede (SI), ou seja, um sistema sem o fornecimento de energia elétrica por uma concessionária de energia, deve-se considerar sua vulnerabilidade para futuras extensões de rede. Isso ocorre porque a distância da carga, distribuição de perdas, e demanda são fatores analisados para a escolha entre a expansão de rede existente ou a implantação de um SI para GD. O custo do fornecimento de energia considera, para uma expansão de rede, o custo da sua geração, transmissão e as respectivas perdas na distribuição. Em países como a Índia ou o Vietnã, considerando o sistema de transmissão e distribuição da eletricidade, os valores equivalentes das perdas de potência corresponderam respectivamente a 26 e 11% em 2004. Estes valores são consideravelmente altos, e indicam a implantação de SI como alternativa para vilas remotas e de difícil acesso (BARAL et al., 2010).

Para a operação de um SI, faz-se necessário compreender a linha de equilíbrio ou o valor crítico de um sistema. Este valor crítico corresponde ao valor tal que o custo de implantação de um SI seja inferior ao custo de expansão da rede. Se a distância da rede é menor do que este valor crítico, é viável fazer a expansão da rede de transmissão. Caso o valor da distância seja maior do que o valor crítico, considera-se viável a implantação de um SI de GC. Segundo pesquisa de Lahdelma (2013), uma unidade geradora a partir do biogás com potência elétrica entre 1 e 25 kW apresenta ponto crítico de custo em 0,15 U\$/kWh e o comprimento crítico de 4,5 km para a conexão entre o gerador e a carga (LAHDELMA; PAATERO; RAHMAN, 2013).

O custo para a produção de energia em um SI, em geral é superior ao custo por kWh de adquirir energia do sistema de distribuição. Para o uso do biogás, o estudo de Boadzo, Kibaara e Chowdhury (2016) apresentou custo de \$0,654 por kWh, enquanto que a energia proveniente da rede custa \$0,374 por kWh conforme mostrado na Tabela 8. Caso o uso de biogás seja combinado ao uso de outras fontes como solar, diesel ou eólica, o custo para a produção aumentará de acordo com a complexidade do sistema visando a redução da vulnerabilidade do sistema. A inclusão de sistema de armazenamento de energia viabiliza o aproveitamento da energia gerada quando a demanda é menor do que a capacidade de geração. Dessa forma,

o sistema é otimizado para que as cargas permaneçam alimentadas conforme a demanda (BOADZO; KIBAARA; CHOWDHURY, 2016).

Tabela 8 - Custo da produção de energia para diferentes combustíveis

Custo da Energia (\$ / kWh)	Biogás	Biogás – Solar	Diesel	Biogás – Solar – Eólica	Biogás – Eólica
Sistema Isolado	0,654	0,688	0,698	0,957	1,792
Conectado à rede	0,374	0,282	0,413	0,886	0,982

Fonte: Boadzo; Kibaara; Chowdhury, (2016, P. 4168)

Sistemas que incluem duas ou mais tecnologias em uma mesma unidade geradora de energia elétrica permitem que haja minimização de riscos em sua configuração. Para a modelagem de um sistema híbrido, otimizando a configuração deste sistema, deve-se considerar a eficiência do sistema com variabilidade de carga, a capacidade de suprimento da demanda, manutenção e operação de equipamentos, os custos relacionados a operação, conexão e as dificuldades representadas pela dinâmica de performance do sistema (BARAL et al., 2010).

Em um SI, o sistema de GD deve manter o balanço entre a potência requerida pela carga e a potência gerada. Ainda, a tensão e frequência precisam ser mantidas em níveis aceitáveis em todo o sistema. Para isso, pode ser necessário desligar cargas não-críticas ou diminuir a potência de geração para que a estabilidade do sistema não seja perdida. Neste sentido, o armazenamento de energia proporciona o tempo necessário, em um SI, para a recuperação de estabilidade de frequência e estabilidade de tensão. Quando a GD funciona conectada à rede, o gerador em sincronismo com o sistema interligado está relacionado à estabilidade de ângulo do rotor. Um GS pode manter a referência de amplitude e tensão, e caso não haja um GS no sistema, deve-se usar um controlador de tensão e frequência para esta finalidade (ASHOURIAN et al., 2011).

6.3 MICRORREDE

Ponderando a localização das fontes geradoras de um SI, assim como o tipo de carga, pode ser possível a instalação de uma microrrede. As microrredes (MR)

são compostas por sistemas concentrados como uma organização ou comunidade. Um sistema de geração, composto por um gerador acoplado a uma topologia que funciona como motor primário, e uma carga importante podem ser combinados e formar uma MR. Uma MR pode alternar entre os modos de operação de conexão com a rede e operação como um SI. A alternância entre estes dois modos pode ocorrer automaticamente. Para alternar entre a conexão com a rede ou modo de SI, deve existir um sistema de controle para os modos de operação incluso no projeto. Quando há uma falta na conexão externa, a MR é desconectada da rede, isolando a tecnologia geradora de energia e protegendo a carga contra oscilações da rede enquanto a operação funciona como um SI. Do mesmo modo, se a falta não estiver mais presente, e as condições do sistema permitirem automaticamente reconecta-se a MR ao sistema de distribuição. Relés de tensão são utilizados para monitorar a tensão e enviar sinais lógicos de controle para comutadores que realizam a conexão do sistema à rede (ZHANG; HU; WU, 2006).

Um SI geralmente inclui mais de uma tecnologia para geração de energia elétrica, de forma a suprir a demanda energética de um local. As fontes energéticas podem fornecer energia em CA ou em CC. Do mesmo modo, as cargas as quais esta demanda está associada podem ser CC ou CA. O esquema das configurações possíveis está apresentado na Figura 26. Uma das configurações possíveis, para um SI, é a utilização de um barramento CC para conexão de fontes geradoras e cargas. As fontes geradoras CC devem ser conectadas diretamente ou conectadas à um conversor elevador ou rebaixador, conversor CC-CC. Caso a fonte geradora utilize CA, faz-se necessário a utilização de um conversor para conectá-la ao barramento. Quando o barramento CC é utilizado, apresenta uma configuração simples e que não necessita de sincronização. Contudo, se o conversor CC-CA falha, há um comprometimento do sistema inteiro pois este não será capaz de suprir a demanda para as cargas CA. Já quando as fontes são acopladas a um barramento CA, apresenta-se uma configuração proporcional a necessidades de uma comunidade rural ou uma unidade industrial de pequena escala. Todavia, é necessário que exista sincronização entre o barramento e a saída do gerador para suprir as cargas CC (SAINI; SIDDAIAH, 2016).

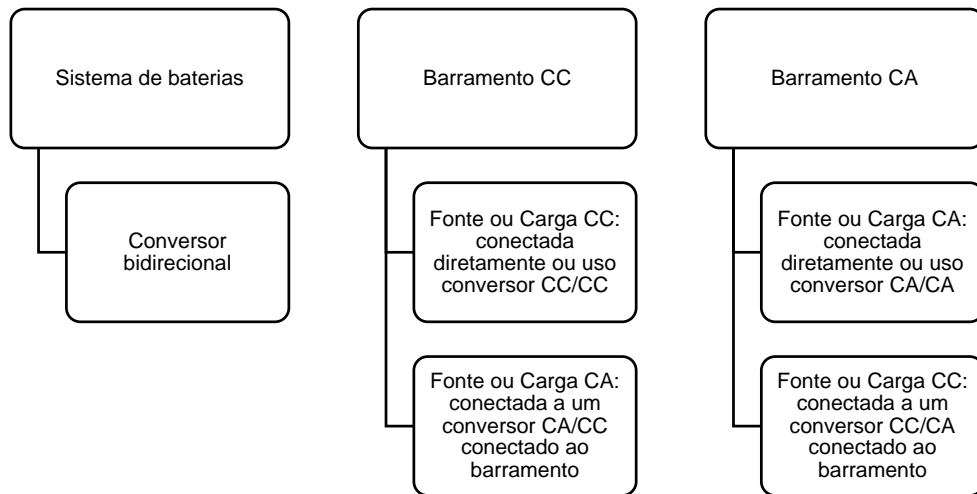


Figura 26 - Configuração para sistemas híbridos isolados com barramento único

Fonte: Adaptado de Siddaiah, Saini (2016, P. 380)

Para garantir o suprimento de energia, faz-se necessário a utilização de algum método de armazenamento de energia. Este sistema deve conectar-se a um conversor bidirecional antes do acoplamento ao barramento principal. Conectadas à um barramento CC, as cargas CC que serão supridas por este sistema têm conexão direta, enquanto que as cargas CA devem ser conectadas à um conversor CC-CA. O inverso é válido para o uso de barramento CA como barramento principal. De acordo com a configuração do sistema, pode-se acoplar um gerador movido a outro combustível, como diesel ou gasolina, para garantir o suprimento de energia constante. Contudo, deve-se considerar as consequências ambientais da inclusão deste gerador e o meio de abastecimento do combustível (SAINI; SIDDAIAH, 2016).

Fontes geradoras CA conectadas diretamente ao barramento CA e fontes geradoras CC conectadas diretamente ao barramento CC configuram um sistema de acoplamento híbrido. Esta configuração permite que as fontes e as cargas estejam conectadas aos barramentos com o mesmo tipo de corrente, sem o intermédio de conversores alternadores. Porém, quando necessário, se deve utilizar conversores rebaixadores ou elevadores para conectar as cargas ao barramento. Desse modo, o conversor CC – CA é conectado somente entre os barramentos de um acoplamento híbrido, reduzindo as perdas de conversão e eliminando o uso de conversor entre barramento e carga, ou barramento e fonte geradora. Caso haja um sistema de baterias, este sistema será conectado ao barramento CC por meio de um conversor bidirecional. O controle para esta configuração de sistema tem maior complexidade

do que as duas primeiras configurações, assim como o gerenciamento do fluxo de energia (SAINI; SIDDAIAH, 2016).

Quando conectado à rede, a tensão e frequência de geração são determinados pela rede ao qual se está conectado. Somente algumas fontes que usam GS utilizam inverso, isso quando a máquina primária opera com velocidade variável no eixo. A rede pode ser conectada à um GS por meio de um inversor e um retificador. Neste caso, a saída do gerador depende da potência de referência determinada pelo inversor conectado à rede e à carga. Quando desconectado da rede, o inversor mantém a potência de saída constante. A medida que a demanda por potência aumenta, maior quantidade de combustível é absorvida, de modo proporcional (ABBASI; JIANG; YU, 2009)

A tensão de GD fornecida a residências, empresas ou indústrias deve ser senoidal, com amplitude e frequência constantes em condições ideais. Embora desvios ocorram quando a corrente de carga não é senoidal, existem certos limites para as variações nas tensões que permitem o funcionamento do sistema. A causa dos desvios de tensão provocados pela carga são as harmônicas, cujas componentes de maior intensidade normalmente são a quinta e a sétima harmônica correspondentes as frequências de 250 e 350 Hz. Os dispositivos eletrônicos não funcionam perfeitamente se houver grande distorção ou muitas harmônicas de nível alto. Geradores de imã-permanente, uma das topologias de geradores, são dispositivos que pelo design do dispositivo podem gerar harmônicos de níveis altos (MACHADO, *et al.*, 2009).

6.4 CONTROLE DO SISTEMA

Quando a carga do sistema se altera, o sistema de controle deve atuar para que a geração acompanhe esta variação. O controle de potência é baseado na demanda local de cargas. Caso a demanda seja inferior a potência gerada pelo sistema, a potência excedente será entregue ao sistema de distribuição. Por outro lado, em situações em que o sistema não gere potência suficiente, a remanescente deverá ser absorvida da rede. Em SI, o remanescente deve ser absorvido do sistema de armazenamento de energia (MACHADO, *et al.*, 2009).

Um sistema de GD deve possuir um sistema de controle que inclua o processo de geração, detecção e ajuste da geração da energia, manutenção, otimização e a estrutura de mercado ou modelo de negócios a que está inserida. Este controle pode ser de três formas: local, centralizado ou descentralizado conforme o tamanho da área da MR. A metodologia para o controle basicamente inclui o gerenciamento de energia gerada, o despacho econômico e a otimização do controle centralizado. O controle local é responsável por um sistema de GD e respectivas cargas, e carece de um controle central que permita sua conexão à rede de distribuição (ISA; TAN; YATIM, 2017).

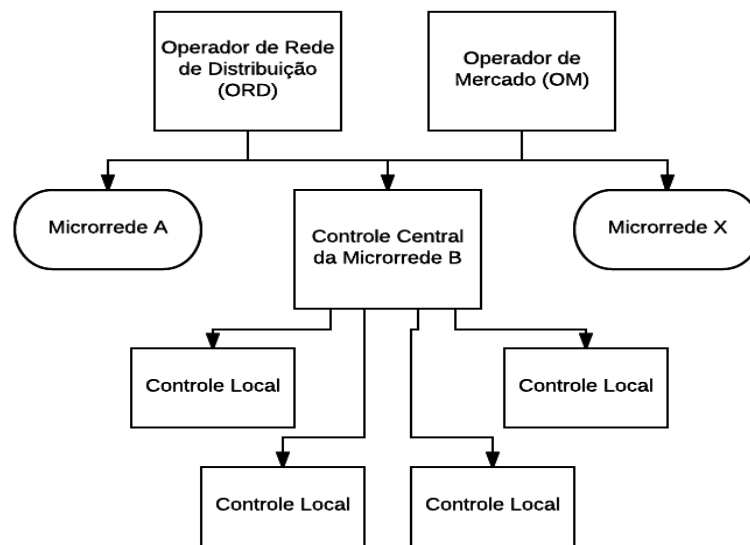


Figura 27 - Esquema de controle centralizado de microrrede
Fonte: Adaptado de Isa, Tan, Yatim, 2017, p. 16.

No controle local é feito o gerenciamento do controle de corrente e tensão, assim como o monitoramento da frequência de geração e tensão da MR. A verificação da potência ativa e reativa é utilizada para o controle de corrente. Este controle pode ser feito por um controlador proporcional integral, quando se usam FC, ou por um controlador lógico programável. Conforme indicado na Figura 27, este controle local é gerenciado por um controle responsável pelo controle de toda a MR. Cada MR interage com o sistema de distribuição, pelo fornecimento de dados de potência ativa e reativa, provenientes de geradores e do sistema de armazenagem de energia. O controle centralizado secundário compensa a variação na tensão e frequência do nível primário de controle seguindo a operação da rede de distribuição e a operação de mercado. O sistema de níveis de controle de GD compõe a chama hierarquia de controle que permite um controle sobre a totalidade do sistema com implementação

simples. Além disso, o custo reduzido deste controle contribui para que seja utilizado largamente no mundo ainda que ponderado pela dificuldade gerada pelos diversos controladores e uma comunicação confiável e de alta velocidade (ISA; TAN; YATIM, 2017).

A introdução de sistema de GD à rede de distribuição pode causar impactos indesejados, principalmente devido à mudança no fluxo de carga e alteração na corrente da rede. Para minimizar os efeitos os geradores devem possuir sincronia em nível de tensão e frequência gerada, sequência de fases e modulação das ondas. Ajustando o nível de tensão, procede-se para ajuste da sequência de fase incluindo todas as fases. Caso necessário, corrige-se eventual defasagem ou diferença de frequência para que a sincronia esteja completa. A sincronização de todos os terminais, no caso de uma MR com mais de uma fonte, é vista como desvantagem por dificultar o gerenciamento de unidades que são fisicamente distribuídas. Ainda, o controle e a comunicação entre as unidades demanda tempo e apresenta alto custo de comunicação entre as unidades. Assim, o controle local exerce papel fundamental à estabilidade na GD (MARTIGNONI, 2005).

Em geral, os sistemas de proteção são projetados com fluxo unidirecional de potência. Quando ocorre uma falta, o sistema de proteção deve atuar isolando a parte em que ocorreu a falha, por meio de dispositivos de proteção de sobrecorrente. Em GD, os dispositivos de proteção podem ser ativados por falhas em seções adjacentes. O impacto destas falhas deve ser incluso no planejamento das operações de rede, considerando toda a GD inclusa à rede. A introdução de uma GD pode ocasionar operação errônea em um relé de distância, portanto deve-se analisar o impacto ao longo de toda a rede (GORDEYKO; ROTHBAUER, 2006) .

Os controladores de carga eletrônicos, ou sistemas de regulação de tensão requerem sensores, comutadores e sistema de controles que encarecem o projeto, dificultando o uso em GD. No estudo de Verma, Pant e Singh (2010), os autores propuseram um esquema de menor complexidade acoplando um sensor de tensão e corrente ao gerador, com sensores para as três fases e também para o neutro. Este sensor emite sinais para um controlador, que por meio do chaveamento do controle de carga, mantém a tensão no termina de saída constante compensando com um conversor CC-CC a oscilação de corrente causada pela entrada ou saída de uma carga. No sistema proposto, existe um resistor em série com o conversor CC-CC, ambos conectados ao controlador em paralelo com um capacitor ao barramento de

corrente contínua, que absorvem as modificações de potência requerida e as dissipa pelo resistor (VERMA; PANT; SINGH, 2010).

Quando há detecção de alteração no nível de tensão na rede, de modo que comprometa o funcionamento do sistema de geração, automaticamente a proteção deve atuar isolando o sistema da rede. Tão logo a tensão proveniente da rede seja desconectada, o SI isolado é estabelecido e a geração de energia provém da topologia instalada no sistema. Em estudos de Zhang, Hu e Wu o intervalo para esta inversão de modos entre conectado à rede e SI é de 200 ms. Este intervalo corresponde ao requisito do padrão internacional estabelecido pelo IEEE. Assim, a isolação da carga e transição completa para o modo SI ocorre em intervalo de aproximadamente 12 segundos utilizando uma microturbina Capstone C200. A transição entre o SI e a conexão com a rede ocorre quando há detecção da tensão reestabelecia na rede. O sinal lógico transmitido pela detecção permite que os contatos sejam abertos. Primeiro, o contato abrindo indica que a tecnologia geradora de energia elétrica deve mudar do modo SI para o modo conexão com a rede. Portanto, a topologia que antes gerava energia elétrica para o sistema tem como função gerar a potência que não é fornecida pela rede (ZHANG; HU; WU, 2006).

7 CONCLUSÕES

A geração de energia elétrica a partir do biogás proporciona benefícios ao meio ambiente e à sociedade. Com o aproveitamento de resíduos, outrora descartados, contribui-se para a geração de energia elétrica e térmica. Embora tenha sido deixada de lado por alguns anos, o desenvolvimento de tecnologias para a geração de energia a partir do biogás contribuiu para o retorno desta fonte de energia como fonte renovável de geração. O uso de recursos locais, valorização do subproduto fertilizante que pode ser comercializado, economia em energia elétrica e melhora no padrão de vida de vilas afastadas estão entre os benefícios trazidos pelo uso deste material. Limitações para o uso do biogás podem surgir com a limitação de matéria-prima, poluição causada por biodigestores danificados ou a redução do nível de metano do biogás.

Neste sentido, a geração a partir do biogás tem se desenvolvido tanto com relação as matérias-primas do biogás, quanto às tecnologias utilizadas para a conversão da energia química que nele está contida. Existem processos de purificação do biogás, assim como de enriquecimento que o transformam em componentes com concentrações similares ao gás natural. Nestas condições, o biogás pode um excelente combustível para a geração de calor e/ou eletricidade. Esta geração depende da demanda do local onde será instalada, assim como é dependente da disponibilidade de equipamentos e investimento. Fatores como tamanho da planta, demanda de energia elétrica e térmica ou custo de instalação e operação influenciam na tecnologia a ser utilizada para geração.

Dentre as tecnologias utilizadas para a conversão da energia química do biogás, para a energia elétrica considerou-se a turbina a gás, microturbina a gás, motores de combustão interna e células combustíveis. Com a compreensão do funcionamento de cada tecnologia, foi buscado na literatura um entendimento de como estas eram aplicadas e utilizadas para o uso do biogás. Analisando a eficiência e a potência nominal de cada aplicação, foram encontradas as diferentes formas de aplicação de cada tecnologia, assim como a combinação entre elas. Motores de combustão interna têm performance mais eficiente para plantas de potência elevada, enquanto que células combustíveis possuem performance consideravelmente alta independente da potência da planta. Embora apresente maior eficiência e capacidade

de operação superior as demais topologias, as células combustíveis apresentam investimento alto quando sobredimensionadas. As células combustíveis tem sua viabilidade econômica ponderada pelo nível de tecnologia de seus componentes.

Turbinas a gás, microturbinas a gás e motores à combustão interna que utilizem o ciclo otto são consideradas as topologias mais utilizadas visto o número de trabalhos encontrados na revisão sistemática. Do mesmo modo, o número reduzido de trabalhos que analisaram células combustíveis indica que o nível tecnológico desta topologia ainda limita o seu uso. Porém, a variabilidade de estudos também sugere a tendência de desenvolvimento visto que são adaptáveis à sistemas híbridos com outras tecnologias elevando a eficiência do sistema. A maioria dos trabalhos analisados apresentou um estudo de aplicações para sistema isolado, indicado a tendência do uso do biogás como solução para locais afastados em que a conexão à rede não é viável economicamente. Turbinas a gás e células combustíveis são aplicadas tanto em sistemas isolados quanto em sistemas conectados à rede. Ambas topologias apresentam adaptabilidade a diferentes cenários permitindo a sua utilização com diferentes matérias-primas.

A revisão sistemática de artigos relacionados à geração de energia elétrica a partir do biogás apresentou informações pertinentes, no que diz respeito à potência e eficiência elétrica obtida em cada estudo. A análise de desempenho foi feita considerando os dados disponíveis e indicou a faixa de eficiência esperada para cada topologia. Para motores a combustão espera-se eficiência 20 a 30%, levemente superior quando usado o ciclo otto. Em microturbinas, eficiência de 20 a 35% enquanto que para turbinas a gás espera-se eficiência um pouco mais alta de 25 a 35%. Já para as células combustíveis, a faixa de eficiência é mais elevada abrangendo entre 40 e 60% de eficiência elétrica para o seu uso com biogás.

REFERÊNCIAS

ABBASI, A.; JIANG, Z.; YU, X. **Dynamic modeling and control design of microturbine distributed generation systems**. 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009.

ADOUANE, B. et al. **Theoretical estimation of the production of biogas from the landfill of Batna city and its electrical conversion by a SOFC**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 40, n. 39, p. 13799–13805, 2015.

ANEEL. **Atlas de Energia**. 2005. 93-106p. 2 - [s.n.], 2005. Disponível em: <<https://goo.gl/sO5KJY>>. Acesso em: Fevereiro 2017.

ASHOURIAN, M. H. et al. **Controlling and modeling power-electronic interface DERs in islanding mode operation micro grid**. 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, 2011.

ASLANZADEH, Solmaz; RAJENDRAN, Karthik; TAHERZADEH, Mohammad J. **Energies. Household Biogas Digesters - A Review**, Boras, Suíça, v. 5, n. 8, p. 2911 - 2942, 11 Mai 2012.

ASSADI, Mohse et al. Applied Thermal Engineering. **Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine using a validated thermodynamic model**. Stavanger - Noruega, v. 66, p. 181 - 190, Mai. 2014.

AULT, C.; RASUL, M. G.; SAJJAD, M. **Bio-gas Mixed Fuel Micro Gas Turbine Co-Generation for Meeting Power Demand in Australian Remote Areas**. Energy Procedia. Anais...2015

BARAL, Saroj S. et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy**. Zuari Nagar - Índia, v. 14, p. 2086 - 2094, 17 Mar. 2010.

BARUA, D. et al. **Technical and economic assessment of biogas based electricity generation plant**. 2013 International Conference on Electrical Information and Communication Technology, EICT 2013. Department of Electrical and Electronic Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET), Dhaka, Bangladesh: 2013

BASAK, P. et al. **A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, p. 5545–5556, 2012.

BASRAWI, M. F. BIN et al. **Analysis of the performances of biogas-fuelled micro gas turbine cogeneration systems (MGT-CGSs) in middle- and small-scale sewage treatment plants: Comparison of performances and optimization of MGTs with various electrical power outputs.** Energy, v. 38, n. 1, p. 291–304, fev. 2012.

BAUDOIN, S. et al. **Analysis and validation of a biogas hybrid SOFC/GT emulator.** 2014 IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTELLIGENT ENERGY SYSTEMS (IWIES). Anais...2014

BAUDOIN, S. et al. **Design of a SOFC/GT/SCs hybrid power system to supply a rural isolated microgrid.** Energy Conversion and Management, v. 117, p. 12–20, 2016a.

BAUDOIN, S. et al. **Sizing and control of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas microTurbine hybrid power system using a unique inverter for rural microgrid integration.** Applied Energy, v. 176, p. 272–281, 15 ago. 2016b.

BEDOYA, I. D. et al. **Experimental study of biogas combustion in an HCCI engine for power generation with high indicated efficiency and ultra-low NOx emissions.** Energy Conversion and Management, v. 53, n. 1, p. 154–162, jan. 2012a.

BEDOYA, I. D. et al. **Exploring Strategies for Reducing High Intake Temperature Requirements and Allowing Optimal Operational Conditions in a Biogas Fueled HCCI Engine for Power Generation.** Proceedings of The Asme Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference (Icef). Anais...Jul. 2012b

BEDOYA, I. D.; SAXENA, S. **Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 39, n. 5, p. 457–488, 1 out. 2013.

BIDART, Christian; FRÖHLING, Magnus; SCHULTMANN, Frank. **Applied Energy. Electricity and substitute natural gas generation from the conversion.** Karlsruhe, Alemanha, v. 113, p. 404-413, Jan. 2014.

BIG, Banco D. I. D. G. **Capacidade de Geração do Brasil.** Disponível em: <<https://goo.gl/UzkCgi>>. Acesso em: 16 Set. 2016. BIG Banco de Informações de Geração.

BOADZO, A.; KIBAARA, S. K.; CHOWDHURY, S. **A study on dairy farm-based hybrid renewable energy systems in South Africa**. Department of Electrical Engineering, University of Cape Town. South Africa: IEEE Power and Energy Society General Meeting. , 2016.

BOLIN, Christopher D. **Characteristics Of Alternative Fuels And Alternative Cooling Of Thermal Power Plants**. Michigan State University. East Lansing, Michigan: [s.n.], 2014. 176 p.

BOUCHY, L. et al. **On-site cogeneration with sewage biogas via high-temperature fuel cells: Benchmarking against other options based on industrial-scale data**. Fuel Processing Technology, v. 138, p. 654–662, 2015.

BRANDONI, CRENZI, M. **Study and application of a regenerative Stirling cogeneration device based on biomass combustion**. Applied Thermal Engineering, v. 67, n. 1–2, p. 341–351, 2014.

BRAUN, R. J.; TRENDEWICZ, A. A. **Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities**. Journal of Power Sources, v. 233, p. 380–393, 2013.

BUDZIANOWSKI, W. M. **A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 54, p. 1148–1171, fev. 2016.

BUONOMANO, Annamaria et al. Applied Energy. **Molten carbonate fuel cell: An experimental analysis of a 1 kW system fed by landfill gas**. Itália, v. 140, p. 146 - 160, 20 Nov. 2014.

BURKE, L. M.; GREBEN, H.; SZEWCZUK, S. **Biogas, as a renewable energy source, produced during the anaerobic digestion of organic waste**. 29th ISES Biennial Solar World Congress 2009, ISES 2009. Anais...Division for Natural Resources and Environment, CSIR, Pretoria, South Africa: 2009

CAPALDI, PIETRO; DALIENTO, A.; RIZZO, R. **An Innovative 10 kW Microcogenerator Suitable for Off Grid Application and Fed with Syngas or Biogas**. 2014 49TH INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC). Anais...2014

CARESANA, F. et al. **Energy production from landfill biogas: An italian case**. Biomass and Bioenergy, v. 35, n. 10, p. 4331–4339, 2011.

CHAKRABORTY, Arindam. **Advancements in power electronics and drives in interface with growing renewable energy resources**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Chicago, EUA, v. 15, p. 1816 - 1827, 2011.

CHEN, C. H. et al. **Numerical analyses and experiment investigations of an annular micro gas turbine power system using fuels with low heating values**. Science in China, Series E: Technological Sciences, v. 52, n. 12, p. 3565–3579, 2009.

CHEN, C. H.; LEE, C. C.; YANG, C. H. **System identification and performance improvement to a micro gas turbine applying biogas**. World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 58, p. 254–258, 2009.

CIGOLOTTI, V. et al. **Biofuels as opportunity for MCFC niche market application**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 33, n. 12, p. 2999–3003, jun. 2008.

CIGOLOTTI, V. et al. **MCFC fed with biogas: Experimental investigation of sulphur poisoning using impedance spectroscopy**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 36, n. 16, p. 10311–10318, ago. 2011.

COLDEBELLA, Anderson. **Viabilidade do Uso do Biogás da Bovinocultura e Suinocultura para a Geração de Energia Elétrica e Irrigação em Propriedades Rurais**. Universidade do Oeste do Paraná. Cascavel: [s.n.], 2006. 74 p.

DE SOUZA, S. N. M. et al. **Gas Emission and Efficiency of an Engine-Generator Set Running on Biogas**. Engenharia Agrícola, v. 36, n. 4, p. 613–621, 2016.

FAEP, Sistema. **Leite: Produção aumenta em 6% no Brasil e 10% no Paraná em 2016**. Federação da Agricultura do Estado do Paraná. 2014. Disponível em: <https://goo.gl/VTE7Mm>. Acesso em: 27 Nov. 2017.

FERRAREZ, Adriano H. **Análise da Viabilidade do Uso de Biogás como Fonte Energética na Cadeia Produtiva de Frango de Corte na Zona da Mata de Minas Gerais**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: [s.n.], 2009. 146 p.

FREITAS, W. et al. **Análise Comparativa entre Geradores Síncronos e Geradores de Indução com Rotor tipo gaiola de esquilo para aplicação em geração distribuída**. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, v. 16, n. 3, p. 332–344, 2005.

GA, Bui V.; NAM, Tran V. IET Renewable Power Generation. **Appropriate Structural Parameters of Biogas SI Engine Converted from Diesel Engine**, v. 9, p. p. 255–261, 2015.

GARCEZ, Catherine A. G. **Renewable and Sustainable Energy Reviews. What do we know about the study of distributed generation policies and regulations in the Americas? A systematic review of literature**, Brasilia, 10 Dez. 2016.

GARCIA-GUTIERREZ, P. et al. **Techno-Economic Feasibility of Selective CO₂ Capture Processes from Biogas Streams Using Ionic Liquids as Physical Absorbents**. ENERGY & FUELS, v. 30, n. 6, p. 5052–5064, jun. 2016.

GAZDA, W.; STANEK, W. **Energy and environmental assessment of integrated biogas trigeneration and photovoltaic plant as more sustainable industrial system**. Applied Energy, v. 169, p. 138–149, 2016.

GENG, X.; LÜ, X.; WENG, Y. **Performance analysis of an SOFC-GT hybrid system fueled with biomass**. Dongli Gongcheng Xuebao/Journal of Chinese Society of Power Engineering, v. 35, n. 2, p. 166–172, 2015.

GORDEYKO, S. C.; ROTHBAUER, A. L. **Biogas Energy Electricity Generation and Interconnection to the Power Grid**. Alberta Agriculture, Food and Rural Development, p. 1–46, 2006.

GRAYDON, John W.; KIRK, Donald W.; WHITE, Andrew J. **Renewable Energy. Analysis of small-scale biogas utilization systems on Ontario cattle farms**. Toronto, Canadá, v. 36, p. 1019 - 1025, Set. 2010.

GREBEN, Harma A.; OELOFSE, Suzan H. H. **Waste Management & Research. Unlocking the resource potential of organic waste: a South African perspective**. África do Sul, v. 27, p. 676 - 684, Nov. 2009.

HARASEK, M; MAKARUK, A; MILTNER, M. **Separation and Purification Technology. Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute**. Vienna, Áustria, v. 74, p. 83 - 92, Mai. 2010.

HARASEK, Michael; MAKARUK, Aleksander; MILTNER, Martin. **Pres2016: 19th International Conference On Process Integration, Modeling and Optimization For Energy Savings and Pollution Reduction**. Selected Methods of Advanced Biogas Upgrading, Vienna - Áustria, v. 52, p. 463 - 468, 2016.

HUANG, Jingdang; CROOKES, R.J. **Fuel. Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine**. Londres, v. 77, p. 1793 - 1801, Dez. 1998.

ISA, N. M.; TAN, C. W.; YATIM, A. H. M. **A comprehensive review of cogeneration system in a microgrid: A perspective from architecture and operating system**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, jun. 2017.

IWAI, H. et al. **Performance evaluation of a direct-biogas solid oxide fuel cell-micro gas turbine (SOFC-MGT) hybrid combined heat and power (CHP) system.** Journal of Power Sources, v. 223, p. 9–17, 2013.

IWAI, H. et al. **Selection of suitable operating conditions for planar anode-supported direct-internal-reforming solid-oxide fuel cell.** Journal of Power Sources, v. 204, p. 14–24, abr. 2012.

JASH, T.; SINGH, K. **Performance analysis of micro turbine-based grid-connected biogas power plant in Purulia in West Bengal, India.** CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY, v. 17, n. 3, p. 789–795, mar. 2015.

JATANA, Gurneesh S. et al. Experimental Thermal and Fluid Science. **Strategies for high efficiency and stability in biogas-fuelled small engines.** Bangalore, India, v. 54, p. 189-195, 02 Jan. 2014.

KARKI, A. B. **Biogas as Renewable Energy from Organic Waste.** Biotechnology, v. X, p. 85–94, 2009.

KAUNDINYA, D. P.; BALACHANDRA, P.; RAVINDRANATH, N. H. **Grid-connected versus stand-alone energy systems for decentralized power-A review of literature.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 8, p. 2041–2050, 2009.

KITCHEN, Kyle. **Is HCCI The Future Of The Internal Combustion Engine?.** Disponível em: <<https://goo.gl/kw2gb6>>. Acesso em: 12 Set 2017.

LAHDELMA, R.; PAATERO, J. V; RAHMAN, M. M. **Evaluation of choices for sustainable rural electrification in developing countries: A multicriteria approach.** Energy Policy, v. 59, p. 589–599, 2013.

LANKA, Biogas. **What is Biogas?.** Disponível em: <<https://goo.gl/3unG3R>>. Acesso em: 10 Set. 2017.

LEÓN, E.; MARTÍN, M. **Optimal production of power in a combined cycle from manure based biogas.** Energy Conversion and Management, v. 114, p. 89–99, 2016.

LIN, P.-Y.; WANG, L. **Analysis of a commercial biogas generation system using a gas engine-induction generator set.** IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 24, n. 1, p. 230–239, 2009.

LINDEMEYER, Ricardo M. **Análise da Viabilidade Econômico-Financeira do Uso do Biogás como Fonte de Energia Elétrica**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: [s.n.], 2008.

LÖNNQVIST, Tomas; SILVEIRA, Semida; SANCHES-PEREIRA, Alessandro. **Renewable and Sustainable Energy Reviews. Swedish resource potential from residues and energy crops to enhance**. Estocolmo - Suécia, v. 21, p. 298 - 314, Fev. 2013.

MACHADO, Ricardo Q. et al. **An electronic solution for the direct connection of a three-phase induction generator to a single-phase feeder**. Sba Controle e Automação, Campinas, v. 20, Set. 2009.

MAKARUK, A; MILTNER, M; HARASEK, M. **Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute**. SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY, v. 74, n. 1, p. 83–92, jul. 2010.

MARDANI, Abbas et al. Renewable and Sustainable Energy Review. **A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015**. Skudai Johor, v. 71, p. 216 - 256, Nov 2016.

MARTIGNONI, Alfonso. **Máquinas de Corrente Alternada**. 7. ed. São Paulo: Globo, 2005.

MATHAD, V. C. et al. **Comparative evaluation of emission and fuel economy of an automotive spark ignition vehicle fuelled with methane enriched biogas and CNG using chassis dynamometer**. Applied Energy, v. 105, p. 17–29, maio 2013.

METHODISMAGILOV, F. et al. **Method of designing high-speed generators for the biogas plant**. International Journal of Renewable Energy Research, v. 6, n. 2, p. 447–454, 2016.

MIKULSKI, Maciej; WIERZBICKI, Sławomir. Journal of Natural Gas Science and Engineering. **Numerical investigation of the impact of gas composition on the combustion process in a dual-fuel compression-ignition engine**. Olsztyn - Polônia, v. 31, p. 525 - 537, Abr. 2016.

MOHANTY, M.K.; MOHANTY, R.C.; RAY, N.H.S. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. **Biogas as Alternate Fuel in Diesel Engines: A Literature Review**. Odisha, Índia, v. 9, p. 23 - 28, Out. 2013.

MUSTAFI, N. N.; RAINE, R. R.; VERHELST, S. **Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels.** FUEL, v. 109, p. 669–678, jul. 2013.

NAGALINGAM, B.; PORPATHAM, E.; RAMESH, A. **Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine.** FUEL, v. 95, n. 1, p. 247–256, 2012.

NAGALINGAM, B.; PORPATHAM, E.; RAMESH, A. **Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine.** FUEL, v. 87, n. 8–9, p. 1651–1659, jul. 2008.

NASCIMENTO, Geraldo C. D. **Máquinas Elétricas - Teoria e ensaios.** 4. ed. São Paulo: Érica Ltda., v. 1, 2011.

NFAH, E. M.; NGUNDAM, J. M. **Feasibility of pico-hydro and photovoltaic hybrid power systems for remote villages in Cameroon.** Renewable Energy, v. 34, n. 6, p. 1445–1450, jun. 2009.

NICOLIN, F.; VERDA, V. **Thermodynamic and economic optimization of a MCFC-based hybrid system for the combined production of electricity and hydrogen.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 35, n. 2, p. 794–806, jan. 2010.

NISHIMURA, Rafael. **Análise de Balanço Energético de Sistema de Produção de Biogás em Granja de Suínos.** 2009. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande. Campo Grande, 2009.

OKOROIGWE, E. C.; MADHLOPA, A. **Evaluation of the potential for hybridization of gas turbine power plants with renewable energy in South Africa.** Proceedings of the 23rd Conference on the Domestic Use of Energy, DUE 2015. Anais...Energy Research Centre, University of Cape Town, Rondebosch, South Africa: 2015

OWENDE , Philip; PÖSCHL, Martina; WARD, Shane. **Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways.** Applied Energy, Dublin, v. 87, p. 3305 - 3321, Mai 2010.

PESSOA, Isabela C. **Estatística das Aplicações de Métodos Multicritério nas Áreas da Engenharia da Produção.** 2016.[s.n.], Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco. Pato Branco, 2016.

PETRECCA, G.; PRETO, R. Industrial Technology (ICIT) 2010 IEEE International Conference on. **Energy efficiency technologies for clean electric power from**

biomasses: The state of the art and perspectives for the future. Pavia - Itália, p. 865 - 870, 2010.

PRATI, Lisandro. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Gerado por Biodigestores.** Universidade Federal do Paraná. Curitiba: [s.n.], 2010. 83 p.

ROHSTOFFE, Fachagentur N. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização.** 2010. 236p. 5 - Gulzow., 2010. Disponível em: <<https://goo.gl/bGtOqR>>. Acesso em: 09 mar. 2017.

SADHUKHAN, J. **Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches.** Applied Energy, v. 122, p. 196–206, 1 jun. 2014.

SAINI, R. P.; SIDDAIAH, R. **A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 58, p. 376–396, maio 2016.

SANTOS, Edval L.; NARDI, Geraldo. **Tekhne e Logos. Produção de Biogás a Partir de Dejetos de Origem Animal.** Botucatu, v. 4, Agosto 2013.

SCIACOVELLI, A.; VERDA, V. **Sensitivity analysis applied to the multiobjective optimization of a MCFC hybrid plant.** Energy Conversion and Management. Anais...2012

SILVEIRA, José L.; VILLELA, Iraídes. **Aspectos técnicos da produção de biogás em um laticínio.** UNESP. Guaratinguetá: [s.n.], 2005. 99 - 108 p.

TRUONG, N.-H.; KROST, G. **Intelligent energy exploitation from sewage.** IET Renewable Power Generation, v. 10, n. 3, p. 360–369, mar. 2016.

VAN HERLE, J. et al. **Energy balance model of a SOFC cogenerator operated with biogas.** Journal of Power Sources, v. 118, n. 1–2, p. 375–383, maio 2003.

VELÁSQUEZ, Silvia. M. S. G. et al. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Proveniente do Tratamento de Esgoto.** USP / IEE / CENBIO. São Paulo: [s.n.], 2005.

VERDA, V.; SCIACOVELLI, A. **Optimal design and operation of a biogas fuelled MCFC (molten carbonate fuel cells) system integrated with an anaerobic digester.** Energy, v. 47, n. 1, p. 150–157, nov. 2012.

VERMA, V.; PANT, P.; SINGH, B. **Indirect current controlled VSC for reactive power and load control support to self-excited induction generator feeding 3-phase 4-wire isolated power system**. 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2010 and 2010 Power India. Anais...Department of Electrical Engig, Delhi Technological University, Delhi, India: 2010

VISAKHAMOORTHY, S. et al. **Numerical study of a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine fueled with biogas**. Applied Energy, v. 92, p. 437–446, abr. 2012.

ZHANG, Y.; HU, X.; WU, X. **Study on the dynamic performance of a MicroGrid**. IET Conference Publications. China Electric Power Research Institute, No.15, Xiaoying East Road Qinghe, Beijing 100085, China: 2006

APÊNDICE A – RESULTADO DA REVISÃO SISTEMÁTICA GERAÇÃO A PARTIR DO BIOGÁS

	Autor	País	Título	Jornal	Ano	Topologia	Conexão à rede	Eficiência elétrica (%)	Potência elétrica (kW)
1	Ahmed, S I; Johari, A; Hashim, H; Mat, R; Lim, J S; Ngadi, N; Ali, A	Malásia	Optimal landfill gas utilization for renewable energy production	Environmental Progress and Sustainable Energy WSEAS	2014	Motor combustão interna - ciclo Otto Turbina a gás	Microrrede Microrrede	35 27	1450,0 1100,0
2	Alexe, Florin; Cenusă, Victor	România	Comparative Analysis on Performances of Micro Gas Turbines Burning Biogas vs. Natural Gas	Transactions on Environment and Development	2007	Microturbina a gás	Microrrede	29,4 - 31,6	95,9 - 96,1
3	Alexe, Florin; Cenusă, Victor; Marculescu, Cosmin	România	Analysis of biomass and waste gasification lean syngases combustion for power generation using spark ignition engines	Waste Management	2015	Motor combustão interna - ciclo Otto	Isolado	18,2	45,0
4	Assadi, Mohse; Breuhaus, Peter; Morkved, P.T. ; Nikpey, Homam;	Noruega	Experimental evaluation and ANN modeling of a recuperative micro gas turbine burning mixtures of natural gas and biogas	Applied Energy	2014	Microturbina a gás	Isolado	29,6	100,0
5	Baky, A; Bernesson, S; Hansson, P.-A.; Kimming, M; Nordberg, Å; Norén, O; Sundberg, C	Suécia	Biomass from agriculture in small-scale combined heat and power plants - A comparative life cycle assessment	Biomass & Energy	2011	Microturbina a gás	Isolado	29	100,0
6	Balcazar, Juan Galvarino Cerda; Balestieri, José Antonio Perrella; Dias, Rubens Alves	Brasil	Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities	Energy	2013	Turbina a gás	Microrrede	29,46	4130,0
7	Barelli, Linda; Baudoin, Sylvain; Camblong, Haritza; Vinassa, Jean-Michel; Vechiu, Ionel;	Itália	Sizing and control of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas microTurbine hybrid power system using a unique inverter for rural microgrid integration	Applied Energy	2012	Célula combustível SOFC + Turbina a gás	Microrrede	70	90,0
8	Basrawi, F; Yamada, T; Nakanishi, K; Naing, S	Japão	Effect of ambient temperature on the performance of micro gas turbine with cogeneration system in cold region	Applied Thermal Engineering	2011	Microturbina a gás	Microrrede	23,6	30,0
9	Baudoin, Sylvain; Camblong, Haritza; Vechiu, Ionel	França	Control of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas MicroTurbine hybrid system using a multilevel convertor	7th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe 2015	2015	Célula combustível SOFC + Turbina a gás	Microrrede	40	90,0
10	Bedoya, I D; Cadavid, F J; Dibble, R W; Saxena, S; Wissink, M	Estados Unidos	Experimental study of biogas combustion in an HCCI engine for power generation with high indicated efficiency and ultra-low NOx emissions	Energy Conversion and Management	2012	Motor combustão interna - Variações	Isolado	44	60,0
11	Bora, Bhaskor J; Saha, Ujjwal K	Índia	Optimisation of injection timing and compression ratio of a raw biogas powered dual fuel diesel engine	Applied Thermal Engineering	2015	Motor combustão interna - ciclo Diesel	Isolado	25,44	3,5

12	Bouchy, L; Cortina, J L; De Arespacochaga, N; Hornero, A; Peregrina, C; Valderrama, C	Espanha	On-site cogeneration with sewage biogas via high-temperature fuel cells: Benchmarking against other options based on industrial-scale data	Fuel Processing Technology	2015	Motor combustão interna - ciclo Otto	Microrrede	31 - 37	124,0
						Microturbina a gás	Microrrede	28	110,0
						Célula combustível - MCFC	Microrrede	48	195,0
						Célula combustível - SOFC	Microrrede	34	135,0
13	Brandoni, Caterina; Renzi, Massimiliano	Inglaterra - Itália	Study and application of a regenerative Stirling cogeneration device based on biomass combustion	Applied Thermal Engineering	2014	Motor combustão interna - Variações	Microrrede	22,5	1000,0
14	Braun, R. J. ; Trendewicz, A.A.	Estados Unidos	Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities	Journal of Power Sources	2013	Célula combustível - SOFC	Isolado	51,6	330,0
15	Brignole, E; Costamagna, P; Del Borghi, A; Gallo, M; Girdinio, P; Strazza, C	Itália	Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a SOFC system for distributed power generation	Energy Conversion and Management	2015	Célula combustível - SOFC	Microrrede	52,2	224,5
16	Bruno, Joan Carles; Coronas, Alberto, Ortega-López, Victor	Espanha	Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant	Applied Energy	2009	Microturbina a gás	Isolado	25,12	89,5
17	Buonomano, A; Calise, F; Ferruzzi, G; Palombo, A	Itália	Molten carbonate fuel cell: An experimental analysis of a 1kW system fed by landfill gas	Applied Energy	2015	Célula combustível - MCFC	Isolado	18,5	1000,0
18	Byun, Ju Suk; Park, Jungso	Coréia	Predicting the performance and exhaust NOX emissions of a spark-ignition engine generator fueled with methane based biogases containing various amounts of CO2	Journal of Natural Gas Science and Engineering	2014	Motor combustão interna - ciclo Otto	Isolado	28 - 35	30,0
19	Capaldi, Pietro; Daliento, Alfonso; Rizzo, Renato	Itália	An Innovative 10 kW Microcogenerator Suitable for Off Grid Application and Fed with Syngas or Biogas	49th International Universities Power Engineering Conference (Upec) 2014	2014	Motor combustão interna - ciclo Otto	Isolado	25,8 - 27,5	10,0
20	Caresana, F; Comodi, G; Pelagalli, L; Pierpaoli, P; Vagni, S	Itália	Energy production from landfill biogas: An italian case	Canadian Journal of Civil Engineering	2012	Microturbina a gás	Microrrede	27	716,0
21	Castellanos, J G Nimmo, W Poggio, D Pourkashanian, M Walker, M	Inglaterra	Modelling an off-grid integrated renewable energy system for rural electrification in India using photovoltaics and anaerobic digestion	Renewable Energy	2014	Microturbina a gás	Microrrede	33,8	7,5
22	Chen, C H Lee, C C Yang, C H	China	System identification and performance improvement to a micro gas turbine applying biogas	World Academy of Science, Engineering and Technology	2009	Microturbina a gás	Isolado	10	170,0
23	Chowdhury, S; Chowdhury, S P; Mbav, W N	África do Sul	Feasibility and cost optimization study of Landfill Gas to Energy Projects based on a Western Cape Landfill Site in South Africa	Proceedings of the Universities Power Engineering Conference	2012	Microturbina a gás	Isolado	25-30	1000,0
24		Itália	Biofuels as opportunity for MCFC niche market application		2009	Motor combustão interna - ciclo Otto	Isolado	33	116,0

	Cigolotti, Viviana; Massi, Erica; Moreno, Angelo; Poletini, Alessandra; Reale, Francesco			International Journal of Hydrogen Energy		Turbina a gás Célula combustível - MCFC	Isolado	24	84,0
25	Coccolino, Raffaelo; Lombardi, Lidia; Tribioli, Laura	Itália	Use of biogas from biowaste in a solid oxide fuel cell stack: Application to an off-grid power plant	Renewable Energy	2017	Célula Combustível - SOFC	Isolado	47,4	116,6
26	Mudasser, Muhammad; Yiridoe, Emmanuel K	Canadá	Cost-benefit analysis of grid-connected wind-biogas hybrid energy production, by turbine capacity and site	Renewable Energy	2015	Motor combustão interna - ciclo Otto	Microrrede	37 - 43	32,0
27	Damm, C; Dechant, S; Egan, B	Estados Unidos	Building as a power plant: Modeling and selection of a combined heat and power system for an advanced commercial building	ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings	2007	Microturbina a gás	Isolado	28,5	216,0
28	Damrongsak, D; Tippayawong, N	Tailândia	Performance and thermoeconomic analysis of a biogas engine powered ventilation system for livestock building	Engineering Journal	2014	Motor combustão interna - ciclo Otto	Isolado	11,5	1,2
29	Fung, A S; Zabihian, F	Canadá	Performance analysis of hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine cycle: Application of alternative fuels	Energy Conversion and Management	2013	Célula combustível SOFC + Turbina a gás	Isolado	53,9	104,0
30	Gazda, Wieslaw; Stanek, Wojciech	Polônia	Energy and environmental assessment of integrated biogas trigeneration and photovoltaic plant as more sustainable industrial system	Applied Energy	2016	Motor combustão interna - ciclo Otto	Microrrede	41,23	748,8
31	Geng, X; Lü, X; Weng, Y	China	Performance analysis of an SOFC-GT hybrid system fueled with biomass	Journal of Chinese Society of Power Engineering	2015	Célula combustível - SOFC	Isolado	55,31	187,3
32	Gimelli, A; Luongo, A	Itália	Thermodynamic and experimental analysis of a biomass steam power plant: Critical issues and their possible solutions with CCGT systems	Energy Procedia	2014	Microturbina a gás	Isolado	29,19	103,3
33	Gould-Wells, Diana; Williams, Douglas W	Estados Unidos	Biogas Production From A Covered Lagoon Digester And Utilization In A Microturbine	Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Meeting and Exhibition	2004	Microturbina a gás	Isolado	20 - 25	15 - 25
34	Görgülü, A; Koç, Yi; Koç, A; Tandiroğlu, A; Yağlı, H	Turquia	Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat	Energy	2016	Motor combustão interna - ciclo Diesel + Turbina a Gás	Isolado	39,3	534,0
35	Hur, Kwang-beom; Park, Jung-keuk; Rhim, Sang-kyu	Coréia	Mechanical characteristics evaluation of biogas micro turbine power systems	Journal of Loss Prevention in the Process Industries	2009	Microturbina a gás	Microrrede	26 - 28	60,0
36	Hur, Kwang-beom; Kang, Do Won; Kim, Tong Seop; Park, Jung Keuk	Coréia	The effect of firing biogas on the performance and operating characteristics of simple and recuperative cycle gas turbine combined heat and power systems	Applied Energy	2012	Turbina a gás	Microrrede	29,65 - 33,33	5659 - 6749
37	Iwai, H; Saito, M; Wongchanapai, S; Yoshida, H	Japão	Performance evaluation of a direct-biogas solid oxide fuel cell-micro gas turbine (SOFC-MGT) hybrid combined heat and power (CHP) system	Journal of Power Sources	2013	Célula Combustível - SOFC + Microturbina a gás	Isolado	50,8	200,0

38	Jash, Tushar; Singh, Krishna	Índia	Performance analysis of micro turbine-based grid-connected biogas power plant in Purulia in West Bengal, India	Clean Technologies and Environmental Policy	2015	Microturbina a gás	Microrrede / Isolado	56,74	60,0
39	Jiezhi, L I; Qi, Q I U; Xiangzhu, H E; Yingjian, L I	China	Energy use project and conversion efficiency analysis on biogas produced in breweries	World Renewable Energy Congress 2011	2011	Motor combustão interna - ciclo Otto	Isolado	28,45	70,0
40	Kimberlin, T; Ribeiro, S G	Brasil / Estados Unidos	High efficiency waste to energy power plants combining municipal solid waste and natural gas or ethanol	18th Annual North American Waste-to-Energy Conference	2010	Turbina a gás	Isolado	30,7	5500,0
41	Kontokostas, G; Goulos, I; Stamatis, A	Grécia	Techno-economic evaluation of recuperated gas turbine cogeneration cycles utilizing animal manure and energy crops for biogas fuel A new process concept for highly efficient conversion of sewage sludge by combined fermentation and gasification and power generation in a hybrid system consisting of a SOFC and a gas turbine	Proceedings of the ASME Turbo Expo	2014	Turbina a gás	Isolado	40,67	951,2
42	Kraaij, G; Speidel, M; Wörner, A	Alemanha	Optimal production of power in a combined cycle from manure based biogas	Energy Conversion and Management	2015	Célula combustível SOFC + Turbina a gás	Microrrede	52,80	11730,0
43	León, E; Martín, M	Espanha	Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute	Energy Conversion and Management Separation and Purification Technology	2016	Turbina a gás	Isolado	28,45	1725,2
44	Makaruk, A; Miltner, M; Harasek, M	Áustria	Feasibility of pico-hydro and photovoltaic hybrid power systems for remote villages in Cameroon	Renewable Energy	2009	Turbina a gás	Isolado	55	10,0
45	Nfah, E M; Ngundam, J M	Camarões	Thermodynamic and economic optimization of a MCFC-based hybrid system for the combined production of electricity and hydrogen	Hydrogen Energy	2009	Célula combustível - MCFC	Isolado	55,7	365,0
46	Nicolin, Flavio; Verda, Vittorio	Itália	Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches	Applied Energy	2014	Célula combustível SOFC + Turbina a gás	Microrrede	88,00	280,0
47	Sadhukhan, Jhuma	Inglaterra	Sensitivity analysis applied to the multiobjective optimization of a MCFC hybrid plant	Energy Conversion and Management	2012	Célula Combustível - MCFC + Microturbina a gás	Isolado	41,1	463,0
48	Sciacovelli, A; Verda, V	Itália	Optimal design and operation of a biogas fuelled MCFC (molten carbonate fuel cells) system integrated with an anaerobic digester	Energy	2012	Célula Combustível - MCFC + Microturbina a gás	Microrrede	59,2	965,0
49	Sciacovelli, A; Verda, V	Itália	Conversion of large diesel engine to run on biogas for high efficiency electrical power generation	AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America	2009	Motor combustão interna - ciclo Otto	Isolado	27,4	140,7
50	Siriponakarachai, S; Sucharitakul, T	Tailândia							