THALES PRINI FRANCHI

**UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL TIPO PEM COMO
ALTERNATIVA NA GERAÇÃO AUXILIAR EM INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS DE GRANDE PORTE**

**São Paulo
2009**

THALES PRINI FRANCHI

**UTILIZAÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL TIPO PEM COMO
ALTERNATIVA NA GERAÇÃO AUXILIAR EM INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS DE GRANDE PORTE**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Sistema de Potência**

**Orientador:
Prof. Dr. Augusto Ferreira Brandão
Júnior**

**São Paulo
2009**

DEDICATÓRIA

À minha família, com amor, admiração e gratidão por toda compreensão, carinho, presença e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Augusto Ferreira Brandão Júnior, que, nos anos de convivência, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

À Escola Politécnica da USP, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Faculdade de Engenharia de Sorocaba, pela compreensão e apoio neste período de estudos.

RESUMO

A atual situação energética global demonstra a dependência pela energia elétrica, evidenciando a importância do uso racional da energia e da redução de poluentes em sua produção. A utilização de hidrogênio como fonte de geração de energia elétrica nas células a combustível utiliza um bem abundante na face terrestre, e produz energia elétrica sem poluição. A célula a combustível constitui-se de um conversor eletroquímico, que converte a energia química proveniente dos reagentes hidrogênio e oxigênio em energia elétrica (corrente contínua), água e calor. Esta tecnologia é promissora e apresenta uma gama de aplicações no cotidiano, sendo atrativa em relação às outras tecnologias convencionais, com incrementos na eficiência, emissão de poluentes, simplicidade, maior vida útil, tamanho e peso, sendo modular e silenciosa. As células a combustível possuem aplicações no setor automobilístico, como geração auxiliar em instalações elétricas, geração de energia para equipamentos portáteis e programas espaciais. Entre as restrições estão o custo da célula e a produção de hidrogênio e como estocá-lo. O hidrogênio não é uma fonte primária de energia, mas pode ser obtida a partir de processos tais como a eletrólise, fontes fósseis, pirólise a plasma, biocombustíveis como o lixo urbano e a biomassa.

Este trabalho apresenta um estudo do estado da arte e uma sistematização das formas de utilização de células a combustível como geração auxiliar em instalações elétricas de grande porte. Esta tecnologia é de desenvolvimento recente, intensificando-se com as restrições ambientais às outras fontes, além da previsão da redução futura do custo deste tipo de aproveitamento. O trabalho faz uma comparação entre a geração auxiliar em instalações elétricas de grande porte feita com células a combustível com as outras gerações auxiliares convencionais, como o gerador a diesel, e é sugerido o seu emprego como opção, sendo feitas análises técnica e econômica. Também uma análise de seu funcionamento e um estudo de caso com a viabilidade econômica de seu emprego em um laboratório de informática em uma instituição de ensino.

ABSTRACT

The current global energy situation shows the dependence on the electric energy, and the importance of the rational use of energy and the reduction of pollutants in the production of energy. The hydrogen as source of generation of electrical energy in fuel cells uses an abundant resource in Earth, and produces electrical energy with no pollution. The fuel cell consists of an electrochemical converter, that converts the chemical energy from the hydrogen and oxygen reagents into electric energy (continuous current), water and heat. This technology is promising and presents a range of applications in every day life, being attractive in relation to the other conventional technologies, due to increments in the efficiency, emission of pollutants, simplicity, longer life and smaller weight, being modular and silent. The cells the fuel have applications in the automotive segment, as auxiliary generation in electrical installations, generation of energy for portable equipment and space programs. Among the restrictions there is the cost of the cell and the hydrogen production and how to store it. The hydrogen is not a primary source of energy, but can be obtained from processes such as fossil electrolysis, plasma pyrolysis, bio fuels as the urban garbage and the biomass.

This paper presents a study of the state of the art of this technique and also a systematization of the ways in which it can be used as auxiliary generation in automated electric installations. This technology, of recent development, has its interest increased by the environmental restrictions to the sources of energy and also by the cost reduction that is forecast. There is also a case study with a comparison between fuel cells and other more conventional options as the diesel generation. The paper is carried out for an existing computer processing center in an educational institution.

Keywords: Fuel Cells. Hidrogen. Clean energy. Electrical engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Processo de geração de Eletricidade.....	17
Figura 2.2 – Célula a Combustível.	18
Figura 2.3 – Comparativo de eficiências.	26
Figura 3.1 – Ilustração do diagrama esquemático de uma célula a combustível.	28
Figura 3.2 – Composição das Células a Combustível.....	31
Figura 3.3 – Estrutura do polímero Nafion da membrana.	31
Figura 3.4 – Rendimento de um sistema qualquer.....	36
Figura 3.5 – Rendimento de um sistema de células a combustível.....	37
Figura 3.6 – Comparação entre as eficiências da máquina de Carnot e as células a combustível.	38
Figura 3.7 – Potencial perdido durante a polarização por ativação.....	40
Figura 3.8 – Gráfico do potencial perdido pela densidade de corrente.	41
Figura 3.9 – Gráfico do potencial elétrico perdido pela densidade de corrente nos três tipos de perdas.....	42
Figura 3.10 – Curva de polarização da pilha.	42
Figura 4.1 – Esquema elétrico de uma instalação com um gerador.....	44
Figura 4.2 – Diagrama de blocos de um gerador diesel.....	47
Figura 4.3 – Gerador a diesel SC-M da Mitsubishi.....	48
Figura 4.4 – Gerador a gás natural ou propano da Cummins.	49
Figura 4.5 – Estação de células a combustível juntamente com seus subsistemas. .	51
Figura 4.6 – Esquema de borbulhagem do gás.....	53
Figura 4.7 – Esquema de injeção direta de água ou vapor.	54
Figura 4.8 – Esquema troca do calor e água da exaustão do cátodo.	54
Figura 4.9 – Pirólise a Plasma.....	57
Figura 4.10 – Potencial elétrico pela densidade de corrente.....	58
Figura 4.11 – Aplicação em carga de corrente contínua.	60
Figura 4.12 – Tipos de conversores CC/CA.....	60
Figura 4.13 - Diagrama esquemático de um subsistema de potencia CA.....	62
Figura 4.14 - Diagrama esquemático de um subsistema de potencia CA com ligação paralela com rede pública.	62

Figura 4.15 - Diagrama de blocos de um sistema genérico de célula a combustível.	63
Figura 5.1 – Esquema elétrico do local sem geração auxiliar.	68
Figura 5.2 – Esquema elétrico do local com geração auxiliar.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação entre 5 Tecnologias de Células a Combustível.....	23
Tabela 2.2- Comparação entre 5 tecnologias de Células a Combustível.	24
Tabela 3.1 – Entalpias e entropias de formação dos reagentes e produtos da célula a combustível a 25°C..	29
Tabela 4.1 – Classificação do equipamento e sistema de utilização.....	46
Tabela 5.1 – Custos de equipamentos e manutenção das tecnologias.	73
Tabela 5.2 – Custo final anual do gerador a diesel.	73
Tabela 5.3 – Custos totais do gerador a gás natural.....	74
Tabela 5.4 – Custo Total da Estação de Células a Combustível.....	75
Tabela 5.5 – Comparação dos custos.....	76
Tabela 5.6 – Comparativos dos geradores auxiliares.	77
Tabela 5.7 – Custo total com crédito de carbono para geração auxiliar a diesel.	80
Tabela 5.8 – Custo total com crédito de carbono para micro turbina a gás natural..	81
Tabela 5.9 – Custo total com crédito de carbono para estação de células a combustível.	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Organização	11
1.2	Estado da arte	13
1.3	Desenvolvimentos Futuros	15
2	INTRODUÇÃO SOBRE AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....	17
2.1	O que é uma Célula a Combustível.....	17
2.2	Histórico da Célula a Combustível	18
2.3	Tipos de Células a Combustível.....	19
2.3.1	AFC – Célula a Combustível Alcalina	20
2.3.2	PEMFC – Membrana de Troca de Prótons.....	20
2.3.3	PAFC – Ácido Fosfórico	21
2.3.4	MCFC – Células a Combustível de Carbono Fundido	22
2.3.5	SOCF – Célula a combustível de Óxido Sólido	22
2.4	Razões para a utilização das células a combustível	24
3	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....	27
3.1	Funcionamento das Células a Combustível Tipo PEM.	27
3.1.1	Geração de calor	29
3.2	Estrutura das Células a Combustível	30
3.2.1	Membrana Polimérica.....	31
3.2.2	Eletrodos	32
3.2.3	Camada de difusão.....	32
3.2.4	Suportes difusores de gás	33
3.2.5	Placas Bipolares.....	33
3.2.6	Células de refrigeração.....	34
3.3	Princípios operacionais das células a combustível	34
3.3.1	Potencial elétrico teórico de uma célula a combustível	34
3.3.2	Efeito da temperatura	35
3.3.3	Efeito da Pressão	35
3.3.4	Eficiência Teórica das Células a Combustível.....	36
3.4	Perdas da tensão	39

3.4.1	Polarização de ativação.....	39
3.4.2	Perdas ôhmicas.....	40
3.4.3	Polarização de concentração	41
4	GERAÇÃO AUXILIAR EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS.....	43
4.1	Tipos de geradores auxiliares	47
4.1.1	Geradores a diesel	47
4.1.2	Microturbinas a gás natural ou propano	48
4.1.3	Estação de Células a Combustível.....	50
4.1.3.1	Subsistemas - Oxigênio	52
4.1.3.2	Subsistema Hidrogênio – Reformador de Combustível	55
4.1.3.3	Integração do gerenciamento do sistema de água e calor.....	58
4.1.3.4	Subsistema elétrico	59
4.1.3.5	Eficiência do sistema.....	63
4.1.3.6	Vantagens e desvantagens da sua aplicação.....	64
5	ESTUDO DE CASO	67
5.1	Medições e levantamento da curva de demanda.....	69
5.2	Dimensionamento do gerador	70
5.2.1	Dados utilizados para o cálculo do gerador.....	71
5.2.2	Geradores a diesel	73
5.2.3	Geradores a Gás Natural.....	74
5.2.4	Estação de células a combustível tipo PEM.....	75
5.2.5	Análise das tecnologias utilizadas	75
5.3	Análise do custo com a utilização do Crédito de Carbono	78
5.3.1	Gerador a diesel	79
5.3.2	Micro turbinas a gás natural	80
5.3.3	Estação de células a combustível	81
6	CONCLUSÃO	83
	BIBLIOGRAFIA	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 Organização

A presente dissertação aborda a possibilidade de utilização de células a combustível do tipo PEM como geração auxiliar em instalações elétricas de potência. O principal motivo para a escolha desta tecnologia está ligado aos estudos que a Eletrocell, o LACTEC e a AES Eletropaulo estão desenvolvendo no território nacional. Outra razão para o estudo da possibilidade da aplicação das células a combustível está no fato de que as empresas de distribuição de energia, como AES Eletropaulo, estar investindo neste setor por acreditarem que a célula a combustível seja uma das principais fontes de energia elétrica não poluente desenvolvida nos últimos anos. Podendo ser colocadas no mesmo hall das gerações eólica, solar e biomassa. E com algumas vantagens: ela é armazenável, menor e mais acessível do que a eólica e a solar, pois utiliza como matéria-prima o oxigênio e hidrogênio, que se transformam em água durante o processo. (NT PETRÓLEO, 2004).

Toma-se, também, como base nesta dissertação, que as instalações elétricas de grande porte estão referenciadas às instalações elétricas de hospitais, shopping Centers, indústrias, edifícios de escritórios e campi universitários. Onde normalmente a geração auxiliar destas unidades é realizada por meio de grupos de geradores a diesel, que são conectados ao sistema quando há falta de energia elétrica da concessionária ou fornecer energia para parte das cargas no horário de ponta.

Portanto, estuda-se aqui o estado da arte das células a combustível juntamente com suas reações químicas envolvidas, as gerações auxiliares convencionalmente utilizadas no mercado para este propósito, a possibilidade de utilização das células a combustível como substituto das gerações auxiliares convencionais, análise comparativa no cenário atual e estudo de caso. A dissertação está dividida nos seguintes capítulos.

Capítulo 2: Como as células a combustível é uma tecnologia recente no mercado de geração de energia elétrica limpa, este capítulo possui a finalidade de explanar ao leitor os princípios de funcionamento e os tipos de células a combustível utilizadas mundialmente.

Capítulo 3: Este capítulo aborda o estado da arte das células a combustível, como sua construção, as reações químicas envolvidas e as energias liberadas no processo de geração de energia elétrica.

Capítulo 4: Este capítulo tem por finalidade descrever a utilização de um gerador auxiliar em uma instalação elétrica, mostrando os principais tipos de geradores que podem ser utilizados para este fim. Porém é dada maior ênfase nas estações de células a combustível tipo PEM, ilustrando o princípio de seu funcionamento.

Capítulo 5: Este capítulo foi destinado ao desenvolvimento de uma aplicação, na qual será dimensionado um gerador auxiliar de energia para fornecer energia de reserva a um centro de processamento de dados de uma instituição de ensino e ilustrar as principais diferenças tecnológicas e econômicas das gerações escolhidas.

Capítulo 6: Este capítulo foi destinado para o desenvolvimento da conclusão da dissertação.

1.2 Estado da arte

O desenvolvimento das células a combustível no Brasil está apenas no início dos estudos, os quais são patrocinados por algumas empresas (AES Eletropaulo, Eletrocell e Lactec), institutos de pesquisa e universidades (USP e UNICAMP), apoiadas financeiramente pelas concessionárias de energia e algumas montadoras de automóveis e, aos poucos, pelo governo brasileiro.

Os principais projetos de pesquisa das células destinam-se às aplicações automobilísticas e geração de energia estacionária residencial e comercial. Aos poucos, a gama de aplicação será estendida até atingir os equipamentos portáteis, tais como celulares e laptops, serão esses equipamentos que terão maior visibilidade da aplicação com a população no futuro próximo.

O governo brasileiro tem demonstrado interesse em investimentos nesta tecnologia, onde possui pesquisadores e investimentos motivados ao desenvolvimento de células a combustível nacional. A iniciativa do governo começou em novembro de 2002 com o Programa Brasileiro de Sistemas de Célula a Combustível (ProCaC), que tem como finalidade incentivar projetos e desenvolvimentos de pesquisa. (COSTA, 2005).

No Paraná, a COPEL em parceria com a LACTEC, está realizando pesquisas de células a combustível com a tecnologia de Ácido Fosfórico (AFC). Em São Paulo a ELETROCELL em parceria com a AES Eletropaulo está também em desenvolvimento desta tecnologia, utilizando o etanol como combustível. No Rio de Janeiro, a URFJ, juntamente à Renault, está desenvolvendo pesquisas de armazenamento de átomos de hidrogênio inseridos dentro da estrutura atômica de um metal. A Unicamp desenvolve um protótipo de um reformador de metanol para a produção de hidrogênio em células a combustível de 300 W (COSTA, 2005).

O desenvolvimento brasileiro em células a combustível não se limita a estes pontos, pois o Brasil possui todos os quesitos para tornar-se uma grande referência nesta promissora tecnologia. Uma vez que o Brasil destaca-se na diversidade de fontes de hidrogênio, com o Pró-álcool, por exemplo, que é uma tecnologia que retira da cana-de-açúcar o álcool (rico em hidrogênio) como combustível.

Devido a suas propriedades atrativas, as células a combustível desenvolvidas já possuem inúmeras aplicações que estão explanadas abaixo.

Automobilística

Algumas montadoras estão desenvolvendo sua própria tecnologia em seus automóveis a base de células a combustível, como General Motors, Toyota e Honda. Outras compram o sistema de células a combustível de empresas como a Ballard e introduzem em seus veículos, como Daimler Chrysler, Ford, Nissan, Mazda, Hyundai, Fiat e Volkswagen. (BABIR, 2005).

Sistema de distribuição de energia

A distribuidora AES Eletropaulo investiu R\$ 1,75 milhão em um projeto de célula combustível, que foi executado pela Eletrocell, empresa responsável por montar e desenvolver o protótipo. O Centro Incubador de Empresas Tecnológicas (Cietec) da Universidade de São Paulo (USP) é o terceiro parceiro e a universidade será responsável por testes e análises do equipamento. (TN Petróleo, 2004).

Energia de reserva “backup”

A célula a combustível pode ser utilizada como backup de energia elétrica em hospitais, servidores de Internet, sistemas de telecomunicações, edifícios "inteligentes", setores da sociedade que necessitam de uma tecnologia de energia auxiliar confiável e com custo competitivo. (PARAN@SHOP, 2008).

Energia em equipamentos portáteis

Companhias como a Motorola, Fuji, Medis e Polyfuel estão em fase de desenvolvimento de baterias de células a combustível tipo PEM para dispositivos

eletrônicos. Basicamente essas células são alimentadas com metanol e por isso é necessário um micro reformador para a extração do hidrogênio. (BABIR, 2005).

Programas espaciais

A NASA utiliza as células a combustível em seus projetos espaciais para a geração de energia e água potável para suas espaçonaves e tripulantes. (BARBIR, 2005).

1.3 Desenvolvimentos Futuros

O maior desafio encontrado hoje é como contornar de forma eficaz o aumento de demanda gerada pelas indústrias e consumidores, ou seja, como disponibilizar energia elétrica futuramente, sendo que, os recursos encontrados hoje são limitados. Desse modo estuda-se a necessidade de uma nova tecnologia de produção de eletricidade conhecida como a célula a combustível, que é uma tecnologia modular, silenciosa e com pouco ou nenhum problema de emissões de gases poluentes ao meio ambiente.

No entanto a principal razão que limita sua utilização é o seu elevado custo e uma das principais soluções para minimizar este efeito é o estudo e desenvolvimento de novas tecnologias, equipamentos e componentes com menor preço, porém com a mesma eficiência. Como por exemplo, o catalisador de uma célula a combustível do tipo PEM o qual é um dos itens que possui o custo mais elevado, pois sua construção neste momento é feita de platina.

Portanto, para que as células a combustível sejam realmente utilizadas no cotidiano, como fonte de energia, são necessários investimentos que requerem mais simplicidade na sua construção e com componentes em sua estrutura mais econômicos. Desse modo, possibilitará a utilização das células a combustível por

diversas camadas da sociedade para suprir as necessidades energéticas e aliviando o sistema elétrico.

2 INTRODUÇÃO SOBRE AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

2.1 O que é uma Célula a Combustível

Uma célula a combustível é nada mais do que um conversor eletroquímico de energia, que converte a energia química proveniente dos reagentes hidrogênio e oxigênio em energia elétrica (corrente contínua). Um processo de geração de energia de uma termoelétrica envolve as etapas de conversão, disponibilizadas na figura 2.1.

Figura 2.1 – Processo de geração de Eletricidade.

A célula a combustível basicamente elimina todas as fases da figura 2.1 e gera eletricidade em apenas uma etapa, através da combinação dos reagentes químicos hidrogênio e oxigênio e obtendo como subproduto água e calor, conforme a figura 2.2.

Figura 2.2 – Célula a Combustível.

Esta tecnologia encontra-se em pleno desenvolvimento e, portanto seu custo é considerado elevado pelos especialistas da área de geração de energia elétrica. Porém com o advento de novas tecnologias a tendência é a redução do seu custo para tornar-se acessível a todos os níveis de emprego.

Outro ponto propício a ser questionado é quanto a sua eficiência no processo de conversão de energia, esse assunto será descrito minuciosamente nos próximos capítulos.

2.2 Histórico da Célula a Combustível

O início do cronograma do desenvolvimento das células a combustível está atribuído ao senhor Willian Bosque em 1839, porém esta tecnologia somente teve aplicações práticas em 1937, nas quais foi montada uma célula a combustível de 6 kW.

As primeiras aplicações tiveram sucesso nos anos 60 em projetos espaciais americano como o Apollo e Gemini, nos quais foram utilizadas para a geração de eletricidade e água potável (BABIR, 2005).

Em meados dos anos 60 a General Motors experimentou uma pilha de células a combustível em uma caminhonete. Embora com forte utilização em projetos espaciais ela foi esquecida novamente em aplicações sociais até meados de 1990. Em 1989, a Perry Energy Systems, uma divisão Perry Technologies, trabalhando com a Ballard, uma companhia emergente canadense, demonstrou com sucesso uma célula a combustível de membrana de eletrólito (PEM) em um submarino e em 1993, Ballard Power Systems demonstrou a aplicação das pilhas de célula a combustível em um ônibus. A Energy Partners, um sucessor da Energy Perrey, demonstrou em 1993 o primeiro carro popular funcionando a base de hidrogênio e oxigênio. A partir desta data até o final do século, várias montadoras de carro já tinham construído e demonstrado seus carros com essa tecnologia.

Hoje as aplicações de células a combustível vão muito além e já estão sendo utilizadas como geradores em distribuição de energia em instalações de grande porte.

2.3 Tipos de Células a Combustível

Hoje no mercado existem vários tipos de células a combustível disponível para cada tipo de aplicação, seja ela industrial, residencial, veicular e em baterias de celulares e computadores.

Sua classificação é feita referente ao ponto de temperatura de operação da célula a combustível, essa temperatura está ligada diretamente ao eletrólito utilizado para reagir os reagentes hidrogênio e oxigênio. Para cada tipo de aplicação existe um determinado eletrólito a ser utilizado.

A classificação é feita através dos nomes: AFC, PEMFC, PAFC, MCFC e SOFC.

2.3.1 AFC – Célula a Combustível Alcalina

A sigla AFC significa “Alkaline Fuel Cell” que em português quer dizer “Célula a Combustível Alcalina”, é uma tecnologia utilizada por muitos anos na NASA, desenvolvida pelo britânico Francis Bacon em 1930 e utilizava eletrólitos alcalinos ao invés de eletrólitos ácidos. (NETO, 2005).

Sua principal vantagem é a utilização de materiais de baixo custo, por outro lado a grande desvantagem é a necessidade de utilizar hidrogênio e oxigênio extremamente puros. O problema das velocidades de reação baixa (baixas temperaturas) é superado com a utilização de eletrodos porosos, com platina impregnada, e com a utilização de pressões elevadas. Neste tipo de células a combustível, a redução do oxigênio no cátodo é mais rápida em eletrólitos alcalinos, comparativamente com os ácidos e, devido a isso, existe a possibilidade da utilização de metais não nobres neste tipo de células.

2.3.2 PEMFC – Membrana de Troca de Prótons

A sigla PEMFC deriva do inglês “Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, que quer dizer em português “Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons”. Essa tecnologia utiliza uma membrana plástica e sólida que tem a capacidade de transportar as cargas positivas quando está úmida, foi inventada pela General Electric nos anos 50 e muito utilizada pela NASA nos seus projetos espaciais como Gemini e Apollo. (NETO, 2005).

A tecnologia PEMFC é perfeita para o funcionamento em baixas temperaturas de operação, sendo essa temperatura entre 60 a 140°C. A célula operando em baixa temperatura possui uma grande vantagem, pois o início do seu funcionamento é mais rápido do que em outras tecnologias, o que a torna excelente para as aplicações citadas acima. Porém possuem várias desvantagens, uma é sentida no preço, pois ao trabalhar em temperaturas baixas ocorre a necessidade de um catalisador de platina, utilizado para acelerar as reações químicas. Outra

desvantagem é que ela é facilmente contaminada pelo monóxido de carbono sendo necessária a utilização de hidrogênio com altíssimo grau de pureza e para isso torna necessária a instalação de um reformador e purificador.

2.3.3 PAFC – Ácido Fosfórico

A sigla PAFC deriva do inglês “Phosphoric Acid Fuel Cell”, que em português quer dizer “Célula a Combustível de Ácido Fosfórico”, essa tecnologia emprega a utilização de ácido fosfórico como eletrólito e seu funcionamento é similar a tecnologia PEMFC. (NETO, 2005).

Essas células foram as primeiras a ser produzidas comercialmente e apresentam uma ampla aplicação a nível mundial. Muitas unidades de 200 kW, produzidas pela empresa “International Fuel Cells Corporation” estão instaladas nos Estados Unidos e na Europa, sendo essa tecnologia a mais avançada comercialmente, pois já possuem mais de 260 unidades instaladas em todo mundo. Esse tipo de células possui aplicações em hospitais, hotéis, centros comerciais, escolas, aeroportos, e até em estações de tratamento de esgoto e água. No Brasil está instalado nas cidades de Curitiba e Rio de Janeiro

Essa tecnologia é considerada de baixa temperatura (160°C e 240°C) e também deve utilizar platina como catalisador. Sua eficiência é menor em comparação as outras tecnologias, estão em entorno de 35% a 47%, essa perda de energia está relacionada à reforma do gás natural e o biogás que é feita com temperatura entre 450 e 500°C, o que torna necessária a queima de parte do combustível para atingir a temperatura necessária.

2.3.4 MCFC – Células a Combustível de Carbono Fundido

A sigla MCFC origina-se do inglês “Molten Carbonate Fuel Cell” o que em português quer dizer “Célula a Combustível de Carbono Fundido” é uma célula a combustível destinada a aplicações que necessitam de alta potência (acima de 1MW). Essas células trabalham em altas temperaturas da ordem de 600 a 800°C, o que traz o grande benefício de funcionarem sem catalisadores. (NETO, 2005).

Essa tecnologia por operar em altas temperaturas permite o uso de combustíveis como o gás natural, biogás e o etanol sem utilizar reformadores.

2.3.5 SOFC – Célula a combustível de Óxido Sólido

A sigla SOFC origina-se do inglês que é “Solid Oxide Fuel Cell”, o que em português tem o significado de “Célula a Combustível de Óxido Sólido”, é uma célula construída de um material cerâmico e sólido que permite a passagem dos íons (NETO, 2005).

É uma tecnologia em estudo voltada para geração de energia em residências com potência de 5 a 10kW e em indústrias com potência de 250 a 500kW. Essa célula a combustível trabalha com alta temperatura operando entre 600°C a 1000°C o que facilita sua construção, pois operando em temperaturas elevadas as reações químicas são aceleradas sem a utilização de catalisadores nobres como a platina, podendo ser utilizado o níquel como um catalisador bom e barato.

Essa tecnologia permite o uso de combustíveis como gás natural, o biogás e o etanol, podendo ser reformados dentro do próprio sistema da célula a combustível.

A principal desvantagem desta tecnologia é que por operar em alta temperatura o início do seu funcionamento fica lento.

A tabela 2.1 mostra as reações químicas envolvidas no processo de geração de energia elétrica, podendo verificar que essas reações químicas ocorridas no interior das células a combustível é uma reação que não produz poluição, a não ser a

tecnologia MCFC que gera dióxido de carbono. Já a tabela 2.2 mostra a comparação entre os tipos de combustível que podem ser utilizados, seus respectivos tipos de reformadores, a eficiência elétrica e a densidade de corrente.

Tabela 2.1: Comparação entre 5 Tecnologias de Células a Combustível. (NETO, 2005).

Célula a Combustível	Eletrólito	Temperatura Operação(°C)	Reações eletroquímicas
PEMFC	Polímeros Orgânicos	50 - 100	Ânodo: $H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e$
			Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e \longrightarrow H_2O$
			Célula: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$
AFC	Solução Aquosa de Hidróxido de Potássio	90 - 100	Ânodo: $H_2 + 2(OH)^- \longrightarrow 2H_2O + 2e$
			Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e \longrightarrow 2(OH)^-$
			Célula: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$
PAFC	Ácido Fosfórico Líquido	160 - 210	Ânodo: $H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e$
			Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e \longrightarrow H_2O$
			Célula: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$
SOFC	Óxido de Zircônia sólido com uma pequena quantidade de lítio	500 - 100	Ânodo: $H_2 + O_2^- \longrightarrow H_2O + 2e$
			Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2e \longrightarrow O_2^-$
			Célula: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$
MCFC	Solução líquida de lítio, sódio e/ou carbonatos de potássio	600 - 800	Ânodo: $H_2 + CO_2^{-3} \longrightarrow H_2O + CO_2 + 2e$
			Cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e \longrightarrow CO_2^{-3}$
			Célula: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_2 \longrightarrow H_2O + CO_2$
			Cátodo: $\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e \longrightarrow 3H_2O$
			Célula: $CH_3OH + \frac{3}{2}O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$

Tabela 2.2- Comparação entre 5 tecnologias de Células a Combustível. (NETO, 2005).				
Célula a Combustível	Eficiência Elétrica	Densidade de Potência	Reforma de Combustível	Combustível
PEMFC	35 – 55%	3,8 – 13,5kW/m ²	Externo	Hidrogênio
AFC	45 – 65%	0,7 – 8,1kW/m ²	Externo	Hidrogênio puro
PAFC	40 – 50%	0,8 – 1,9 kW/m ²	Externo	Gás natural, biogás
SOFC	50 – 65%	1,5 - 5 kW/m ²	Externo ou interno	Gás Natural, biogás, etanol, etc
MCFC	50 – 65%	0,1 – 1,5 kW/m ²	Externo ou interno	Gás Natural, biogás, etanol, etc

2.4 Razões para a utilização das células a combustível

A utilização das células a combustível poderá atingir futuramente imensa gama de aplicações no cotidiano, pois ela traz muitas propriedades que as tornam atrativas em relação às outras tecnologias convencionais de conversão de energia, os quais podem ser citados:

- **Eficiência:** A eficiência de uma célula a combustível é mais elevada do que a eficiência de um motor a combustão interna. A figura 2.3 ilustra um comparativo da eficiência entre diversas fontes de energia.

- **Emissão de poluentes:** Por utilizarem basicamente hidrogênio e oxigênio, as células a combustível geram eletricidade, água e calor. No entanto algumas células necessitam retirar o hidrogênio de outros combustíveis nocivos ao meio ambiente, gerando desse modo poluição ao meio ambiente em menor escala em comparação com as fontes de combustíveis fósseis, o que torna sua utilização mais atrativa num futuro próximo.

- **Simplicidade e tendência de diminuição do custo:** Até o presente momento o custo da geração de energia está relativamente alto, pois as células a combustível utilizam em sua estrutura metais nobres (platina) como catalisadores. Com a sua produção em massa e o desenvolvimento desta tecnologia a tendência é a diminuição do seu custo.

- **Aumento da vida útil:** Por ser um sistema relativamente simples e sem peças girantes para gerar energia, espera-se no futuro próximo que sua vida útil que hoje é da ordem de 3.000 até 5.000 horas seja estendida para 40.000 até 80.000 horas (BABIR, 2005).

- **Tamanho e peso:** Podem ser produzidas em vários tamanhos e pesos, sendo sua potência da ordem de microwatts até megawatts, dependendo do seu destino e aplicação.

- **Modular:** Para estabelecer a potência necessária é preciso somente realizar a conexão em série das células a combustível, criando assim uma estação de energia.

- **Silenciosa:** As células a combustível são silenciosas em sua produção de energia, ideal para aplicações que exigem energia de reserva ("backup") sem emissão de ruído como em hospitais, em equipamentos portáteis, aplicações militares, em centro de processamento de dados, residências, etc..

- **Capacidade de Cogeração:** As células a combustível na produção de energia gera calor e este pode ser reutilizado para cogeração de energia aumentando a eficiência de geração de energia.

Figura 2.3 – Comparativo de eficiências.

3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

A célula a combustível é um conversor eletroquímico que converte a energia química dos reagentes hidrogênio e oxigênio em energia elétrica e como tal, deve obedecer as Leis da Termodinâmica.

3.1 Funcionamento das Células a Combustível Tipo PEM.

Esta tecnologia destaca-se sobre as demais devido a sua simplicidade, viabilidade, partida rápida e pelo simples fato de possuir aplicações em diversas situações.

O principal componente de uma célula a combustível tipo PEM é a membrana de polímero que possui a capacidade de ser impermeável a gases, mas possibilita a passagem de prótons em sua estrutura. Esta membrana é envolvida nos dois lados por uma camada porosa de eletrólito composto tipicamente por papel de fibra de carbono, no qual a inserção dos gases hidrogênio e oxigênio este conjunto é comprimido.

Na junção do eletrólito e da membrana, possui um catalisador de platina para acelerar a reação química na quebra das moléculas dos gases hidrogênio e oxigênio, todo este processo de construção pode ser ilustrado no diagrama esquemático da figura 3.1.

Figura 3.1 – Ilustração do diagrama esquemático de uma célula a combustível. (NETO, 2005).

A figura 3.1, ilustra a inserção do gás hidrogênio (H_2) pelo lado do ânodo da célula a combustível que ao entrar em contato com o catalisador e a membrana, separe-se de sua molécula gerando íons de (H^+) e dois elétrons livres. Pelo lado do cátodo da célula a combustível é inserido o gás oxigênio (O_2) que no mesmo processo do hidrogênio é quebrado em íons de oxigênio (O^-) e absorve um elétron, gerando dessa forma uma diferença de potencial entre os dois pólos da célula. Os íons de hidrogênio que passaram pela membrana combinam com os íons de oxigênio gerando como resultado final o subproduto água e calor.

As reações químicas envolvidas na célula a combustível podem ser visualizadas nas equações (1), (2) e (3).

Ânodo: $H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-$	(1)
Cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O$	(2)
Célula: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O$	(3)

3.1.1 Geração de calor

As reações químicas descritas nas equações (1), (2) e (3) são reações que produzem calor ao meio externo, denominadas de processo exotérmico. Para o seu cálculo é necessário conhecer os valores das entalpias (ou calor de formação) dos reagentes e produtos das reações químicas, dispostas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Entalpias e entropias de formação dos reagentes e produtos da célula a combustível a 25°C. (BABIR, 2005).

	$h_f (KJ / mol^{-1})$	$s_f (KJ / mol^{-1} . K^{-1})$
Hidrogênio	0	0,13066
Oxigênio	0	0,20517
Água líquida	-286,02	0,06996
Vapor de água	-241,98	0,18884

Portanto a energia gerada pela reação química será dada pela expressão (4).

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(h_f)_{O_2} \quad (4)$$

De acordo com a tabela 3.1 e com a equação (4) é calculada a 25°C a energia total produzida pela reação, que será aproximadamente 286,02 KJ/mol. No entanto uma pequena parcela dessa energia é dissipada em forma de calor e o restante é transformado em energia elétrica.

Essa energia dissipada em forma de calor é denominada entropia de uma reação e está diretamente relacionada com a temperatura de operação da célula a combustível, descrita pela equação (5).

$$T\Delta S = T \left[(s_f)_{H_2O} - (s_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(s_f)_{O_2} \right] \quad (5)$$

Analisando a tabela 3.1 e a equação (5) à temperatura de 25°C, a energia perdida será de 48,68 KJ/mol.

Portanto a energia introduzida na célula a combustível é representada pela máxima energia térmica a qual pode ser extraída do hidrogênio, no entanto esta energia não gerará trabalho útil na carga devido às perdas ocorrentes no sistema, como demonstrado nas equações (4) e (5). Desse modo a energia que gerará trabalho útil na carga será a diferença entre as entalpias e entropias da reação dos reagentes e produto, cuja representação é feita pela energia livre de Gibb's, conforme a equação (6).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6)$$

Dessa forma a 25°C, a energia que pode ser convertida em energia elétrica será de 237,34 kJ/mol.

3.2 Estrutura das Células a Combustível

As células a combustível são formadas por camadas compactadas de acordo com a figura 3.2.

Figura 3.2 – Composição das Células a Combustível.
(ELETROCEL, 2009).

3.2.1 Membrana Polimérica

A membrana polimérica de uma célula a combustível possui em torno de 12 e 210 μm (COSTA, 2005), sendo o principal responsável pela condutibilidade de prótons, oferece também uma barreira adequada à mistura do gás do combustível e do reagente. Sua composição é geralmente de ácido politetrafluoretileno, o qual necessita de uma solução aquosa para realizar a condução dos prótons. Atualmente a membrana mais utilizada é o Nafion, que está ilustrada na figura 3.3.

Figura 3.3 – Estrutura do polímero Nafion da membrana.

3.2.2 Eletrodos

Os eletrodos do ânodo e do cátodo de uma célula a combustível tipo PEM possuem espessuras entre 250 e 450 μm (COSTA, 2005). Seu material de composição é um condutor elétrico poroso, que possui a função de realizar a difusão gasosa do hidrogênio e oxigênio.

A sua construção deverá permitir a maximização da interface trifásica entre os gases (hidrogênio ou oxigênio), os sólidos (eletrodo e membrana) e a água necessária para o funcionamento da membrana. Deverá também possuir atividade catalítica, o que influenciará diretamente na densidade de corrente oferecida pela célula (BARBIR, 2005).

3.2.3 Camada de difusão

É uma camada de pequena espessura localizada entre o catalisador e as placas bipolares. Embora esta camada não participe diretamente nas reações químicas ela possui diversas funções importantes como:

- Encaminhamento do gás do reagente diretamente ao catalisador.
- Retira a água da célula a combustível.
- Conexão elétrica entre o catalisador e a placa bipolar.
- Condução do calor gerado nas reações químicas.
- Sustentação mecânica ao MEA (conjunto eletrodo e membrana).

3.2.4 Suportes difusores de gás

Os suportes difusores de gás (gas diffusion backing / backing layers) possuem espessura entre 300 e 400 μm , sendo constituídos de um material condutor elétrico, geralmente, papel carbono poroso ou tecido a base de carbono, podendo ser revestidos de Teflon que previne a aderência de água e possibilita uma rápida difusão dos gases (COSTA, 2005).

O material poroso possui três funções básicas importantes, que são:

- Propiciar o contato elétrico entre os eletrodos e as placas separadoras,
- Fazer melhor difusão gasosa dos reagentes (hidrogênio e oxigênio) para que alcance a platina dos eletrodos,
- Permitir somente o trânsito de vapor de água, mantendo a umidade necessária para o transporte iônico na membrana confinada à MEA.

3.2.5 Placas Bipolares

As placas bipolares são constituídas de materiais rígidos, impermeáveis aos gases, condutores elétricos e se possível de baixo peso. Os materiais mais utilizados são os metais, grafite ou compostos a base de carbono (BARBIR, 2005). Suas propriedades exigidas no sistema de célula a combustível são:

- Conexão entre as pilhas de células a combustível.
- Fornecem sustentação estrutural ao sistema.
- Conduzem calor das células ativas.

3.2.6 Células de refrigeração

Para que a célula a combustível não pare de funcionar é necessário realizar o controle da temperatura do seu funcionamento, evitando assim com que a temperatura não resseque a sua membrana. O controle da temperatura é feito com células de refrigeração intercaladas com a célula a combustível, realizando desse modo a circulação de uma substância refrigerante na pilha.

3.3 Princípios operacionais das células a combustível

3.3.1 Potencial elétrico teórico de uma célula a combustível

O potencial elétrico máximo que pode ser gerado pela célula a combustível é a relação entre a energia livre de Gibbs com o número de elétrons produzido pelo H₂ e a constante de Faraday (produto do número de Avogrado e a carga do elétron, F=96,48 Coulombs/elétron.mol), conforme descrito na equação (7).

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{237,340}{2 \times 96,485} = 1,23 \text{Volts} \quad (7)$$

O potencial elétrico de 1,23V produzido pela célula a combustível é para a temperatura e pressão ambiente de funcionamento. No entanto se ocorrer à mudança da temperatura e da pressão, ocorre também à variação do potencial elétrico gerado.

3.3.2 Efeito da temperatura

A equação (8) mostra como a temperatura interfere no potencial elétrico gerado pela célula a combustível.

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) \quad (8)$$

Desse modo, com o aumento da temperatura de funcionamento da célula a combustível ocorre o aumento da entropia da reação (perdas) e consequentemente o potencial elétrico tende a diminuir, caso a temperatura abaixe, o potencial elétrico tende a aumentar não ultrapassando o seu potencial elétrico máximo de 1,23 V.

3.3.3 Efeito da Pressão

A pressão também interfere no funcionamento das células a combustível, ou seja, com a alteração da mesma ocorre a mudança da energia de Gibb's gerada e de modo análogo a temperatura também modifica o potencial elétrico gerado pela célula a combustível. Conforme pode ser visualizado pelas equações (9) e (10).

$$\Delta G = \Delta G_0 + R.T.\ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}P_{O_2}^{0,5}}\right) \quad (9)$$

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF}\ln\left(\frac{P_{H_2}P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (10)$$

Observando que as equações precedentes somente são válidas para produtos e reagentes gasosos. Quando a água é produzida em uma célula combustível, sua pressão será de valor 1 atm ($P_{H_2O} = 1$). Da equação (10) pode-se observar que quanto maior for a pressão dos reagentes, mais elevado será o potencial elétrico da pilha, que também está diretamente ligado à concentração de oxigênio puro. Ou seja, se o ar estiver sendo usado no lugar do oxigênio puro ocorre a diminuição da pressão e consequentemente diminuirá o potencial elétrico da pilha, conforme a equação (11) (BARBIR, 2005).

$$\Delta E = E_{O_2} + E_{Ar} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{Air}} \right)^{0,5} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{1}{0,21} \right)^{0,5} \quad (11)$$

3.3.4 Eficiência Teórica das Células a Combustível

A eficiência de qualquer sistema de conversão de energia é definida como sendo a relação entre entrada e saída de energia no sistema, conforme ilustra a figura 3.4.

Figura 3.4 – Rendimento de um sistema qualquer.

Nas células a combustível, o processo de cálculo da sua eficiência é praticamente o mesmo raciocínio, porém a energia de entrada da célula será a

entalpia do hidrogênio conforme a figura 3.5. Supondo que toda a energia livre de Gibb's pode ser convertida em energia elétrica, a eficiência máxima (teórica) possível de uma célula combustível seria:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34}{286,02} = 83\% \quad (12)$$

Figura 3.5 – Rendimento de um sistema de células a combustível.

Para o cálculo da eficiência de uma célula a combustível é utilizado o menor valor calorífico do hidrogênio, pois este valor é igualmente comparado ao motor a combustão interna, cuja eficiência é expressa tradicionalmente com o menor valor calorífico do combustível. Nesse caso a eficiência teórica máxima da célula combustível seria:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H_{LHV}} = \frac{228,74}{241,98} = 94,5\% \quad (13)$$

Outra forma de expressar o rendimento de uma célula a combustível é dividir o ΔG e ΔH por nF e fazer a relação entre os dois potenciais:

$$\eta = \frac{-\Delta G}{-\Delta H} = \frac{\frac{-\Delta G}{nF}}{\frac{-\Delta H}{nF}} = \frac{1,23}{1,482} = 0,83 \quad (14)$$

Onde:

$\frac{-\Delta G}{nF}$: é o potencial teórico da pilha.

$\frac{-\Delta H}{nF}$: é o potencial que corresponde ao valor calorífico mais elevado do hidrogênio.

A eficiência da célula combustível será proporcional ao potencial da pilha e pode ser calculada através da relação do seu potencial e do potencial que correspondem a um valor calorífico mais elevado do hidrogênio, isto é, 1,482V (BABIR, 2005).

O rendimento das células a combustível quando comparado com o ciclo termodinâmico é alto, no entanto sua eficiência não pode ser comparada com a eficiência de Carnot, devido ao seu funcionamento ser eletroquímico e o da máquina térmica operar em dois pontos de temperaturas diferentes.

Conforme a figura 3.6, uma célula a combustível funcionando a baixa temperatura como, por exemplo, a 60°C e a rejeição de calor ao meio ambiente de 25°C, pode proporcionar uma eficiência mais alta do que um motor a combustão entre os dois pontos de temperatura. À medida que a temperatura na célula a combustível aumenta, o seu rendimento tende a diminuir e ficar menor do que o rendimento da máquina de Carnot (BARBIR, 2005).

Figura 3.6 – Comparação entre as eficiências da máquina de Carnot e as células a combustível.

3.4 Perdas da tensão

Como a célula a combustível não é uma fonte de tensão ideal, ocorre a geração de perdas de tensão no sistema, ou seja, uma célula de combustível operando sem carga gera potencial elétrico nos seus terminais de aproximadamente 1,23 V como dito anteriormente, mas ao aplicar uma carga nos seus terminais esse potencial elétrico tende a ficar menor do que 1 V. Isso ocorre devido às perdas que ocorrem no interior da células a combustível, que podem ser enumeradas como:

- Perdas por Polarização de Ativação.
- Perdas Ôhmicas.
- Perdas por Polarização de Concentração.

Nos itens abaixo serão explicadas cada uma dessas perdas.

3.4.1 Polarização de ativação

A tensão de polarização está presente em qualquer reação eletroquímica onde a velocidade da reação nos eletrodos é baixa. Ou seja, nas células a combustível as perdas por ativação representam a energia inicial para vencer a dupla camada nos eletrodos, gerando assim uma queda de tensão nos terminais da célula (BABIR, 2005).

A figura 3.7 ilustra o potencial elétrico perdido nos eletrodos com o aumento da densidade de corrente nos mesmos, desse modo essa perda irá atingir um valor máximo que estabelece o potencial elétrico inicial para vencer a dupla camada de eletrodos.

Figura 3.7 – Potencial perdido durante a polarização por ativação (BARBIR, 2005).

3.4.2 Perdas ôhmicas

As perdas ôhmicas gerada numa célula a combustível são ocasionadas pela resistência que o eletrólito oferece à passagem de fluxo de íons e pela resistência ao fluxo dos elétrons através dos componentes condutores da célula combustível. Estas perdas podem ser expressas pela lei de ohm:

$$\Delta V_{Ohm} = i.(R_{i,eletrólito} + R_{i,eletrodo} + R_{i,difusores} + R_{i,placas_separadoras}) \quad (15)$$

O valor de resistência ôhmica são valores que dependem de dados construtivos da célula, que poderão sofrer variações devido à temperatura de operação e a umidade contida na célula para a condução protônica (BARBIR, 2005).

3.4.3 Polarização de concentração

A polarização de concentração ocorre quando um dos reagentes é consumido pela reação eletroquímica nos eletrodos da célula, gerando uma incapacidade da vizinhança do meio em manter a concentração inicial junto ao eletrodo. Causando uma queda de potencial elétrico, que é denominada de perda por concentração ou tensão de polarização.

A causa da perda de potencial está ligada a dois fatores, o primeiro é a área do eletrodo que não é uniformemente porosa e a segunda está relacionada com densidade de corrente, que não é uniforme na superfície do eletrodo, como pode ser visto na figura 3.8.

Figura 3.8 – Gráfico do potencial perdido pela densidade de corrente (BARBIR, 2005).

A figura 3.9 ilustra as curvas das perdas de potencial elétrico ocorridos na célula a combustível, mostrando que as perdas por ativação são as perdas maiores nas células a combustível.

Figura 3.9 – Gráfico do potencial elétrico perdido pela densidade de corrente nos três tipos de perdas (BARBIR, 2005).

Já a figura 3.10 ilustra o potencial elétrico gerado pela célula a combustível juntamente com suas perdas.

Figura 3.10 – Curva de polarização da pilha.

4 GERAÇÃO AUXILIAR EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

A utilização de um sistema de geração auxiliar é justificada em dois casos, em que requer a necessidade de garantir a segurança da vida humana ou por razões econômicas, que podem ser incluídas como perdas de serviços ou dados valiosos. A instalação de geradores auxiliares em instalações elétricas seja ela residencial ou industrial, tem por finalidade pelo menos dois objetivos, os quais são a diminuição do preço pago pela conta de energia elétrica mensal e a proteção de seu local contra falta de energia proveniente da concessionária.

O dimensionamento de um gerador auxiliar depende exclusivamente das cargas que eles irão energizar, desse modo devem ser especificados os circuitos de uma instalação que não podem parar de operar por nenhum motivo. Esses circuitos são denominados de circuitos críticos, que normalmente são destinados a segurança do local e podem ser enquadrados pelos seguintes sistemas:

- Circuitos de elevadores.
- Iluminação de emergência.
- Circuitos de incêndio.
- Circuitos de saída.
- UTI (Hospital).
- CPD's.

Dessa forma os geradores devem ser instalados em pontos estratégicos para garantir de modo eficaz e econômico a sustentabilidade da energia elétrica nas cargas acionadas pelo mesmo. Os demais circuitos que não foram citados acima e não oferecem risco ao serem interrompidos são conhecidos como circuitos normais. Uma instalação elétrica com geração auxiliar pode ser visualizada na figura 4.1.

Figura 4.1 – Esquema elétrico de uma instalação com um gerador.

De acordo com a figura 4.1, se por algum motivo qualquer seja ele um curto circuito ou um colapso energético o qual obrigue a concessionária de energia parar por tempo indeterminado o fornecimento de energia, os grupos de geradores devem entrar em operação garantindo o fornecimento de energia aos circuitos críticos. Hoje no mercado existem algumas opções de grupos de geradores que procuram atender a necessidade de cada cliente, podendo ser grupo de geradores a diesel, solar, a gás natural e a propano, cujas instalações dependem exclusivamente do poder econômico do cliente e das características das cargas que irão acionar.

Os sistemas de geração auxiliar podem ser classificados pelo tipo e classe do equipamento de geração. A classificação do equipamento é feita sobre o modo de funcionamento do mesmo, e pode ser standby, prime e contínua. Já a classe do sistema é definida como emergência, energia prime, carga básica, standby legalmente exigidos, corte de pico, co-geração, standby opcional e redução de custos. Abaixo segue um breve comentário sobre suas diferenças (Power Generation, 2003).

Sistema de Emergência: São sistemas que visam garantir a energia e iluminação do recinto por curto período de tempo, com a finalidade de garantir a segurança da vida humana.

Energia Prime: É a geração de energia feita em locais onde a energia elétrica não foi liberada pelas redes públicas. Possuindo normalmente dois geradores, dos quais um é destinado à geração de energia para o recinto e o outro é utilizado como fonte de reserva.

Carga Básica: São sistemas que realizam a geração local de energia elétrica e disponibilizam-na para a rede da concessionária. Geralmente estas instalações são propriedades das concessionárias de energia.

Standby Legalmente Exigido: São sistemas parecidos com sistema de emergência, no entanto são especificados com a carga mínima a ser utilizada.

Corte de Picos: São sistemas que utilizam a geração local para manter constante o consumo de energia, ou seja, os picos de energia consumida da concessionária serão supridos pelos geradores.

Co-geração: São sistemas que possuem a finalidade de utilizar o calor de escape irradiado por outros sistemas de geração de energia para suprir a energia elétrica fornecida pela concessionária, normalmente estes sistemas trabalham em conjunto com o sistema de Carga Básica.

Standby Opcional: São sistemas instalados onde a falta de energia pode gerar problemas como interrupções de processos, perdas de negócios e causar inconveniências ou desconfortos.

Redução de Custos: São sistemas que operam em comum acordo com a concessionária, no qual o usuário utiliza seus geradores em determinados períodos do dia para assumir uma quantidade de carga específica, em troca de preços mais acessíveis de energia estipulados pela concessionária.

A tabela 4.1 ilustra a classificação do equipamento e do sistema que deve ser utilizado.

Tabela 4.1 – Classificação do equipamento e sistema de utilização.

Tipo de Sistema	Classificação do Grupo Gerador		
	StandBy	Prime	Contínua
	Emergência	Energia Prime	Carga Básica
	Standby Legalmente Exigidos	Corte de Pico	Co-Geração
	Standby Opcional	Redução de Custos	

Portanto, para o dimensionamento de um gerador auxiliar é necessário levantar algumas considerações iniciais que irão auxiliar na escolha do gerador adequado. Essas considerações são:

- 1) Verificar qual tipo e classificação do gerador que atende o caso proposto;
- 2) Determinar o local da instalação do gerador;
- 3) Escolher o combustível necessário;
- 4) Verificar os impactos ambientais.

De posse dessas considerações basta escolher a melhor tecnologia que atende o caso desejado. Hoje existem no mercado diversas tecnologias para esta aplicação, no entanto nesta dissertação serão estudados os grupos de geradores a diesel, micro turbina a gás natural e a estação de células a combustível tipo PEM. Sendo o último o enfoque principal deste trabalho.

4.1 Tipos de geradores auxiliares

4.1.1 Geradores a diesel

Os geradores a diesel utilizam o combustível diesel para a geração de energia elétrica, são sistemas compostos basicamente por um motor diesel e um gerador de corrente alternada (alternador), conforme ilustra a figura 4.2, podendo ser interligado a um sistema de supervisão e controle para garantir o funcionamento autônomo do sistema.

Figura 4.2 – Diagrama de blocos de um gerador diesel.

Os grupos de geradores a diesel podem ser instalados em sistemas que procuram atender:

- Geração de energia de ponta;
- Gerenciamento de energia em empreendimentos comerciais, residenciais ou industriais;
- Hospitais;
- Telecomunicações.

Com tecnologia sólida e sofisticável os geradores a diesel podem oferecer vantagens na sua utilização como:

- Confiabilidade comprovada e baixos custos de ciclo de vida;
- Alta eficiência e flexibilidade operacional;
- Desempenho elétrico de alta qualidade;
- Sólida infra-estrutura de serviços;

Por se tratar de um sistema de combustão de um combustível fóssil surgem desvantagens, como a poluição do meio ambiente e a poluição sonora gerada no seu funcionamento, porém este último problema já é contornado pelos grandes fornecedores com o advento de novas tecnologias para diminuir o som emitido. A figura 4.3 ilustra um exemplo de gerador que utiliza esta tecnologia.

Figura 4.3 – Gerador a diesel SC-M da Mitsubishi.

4.1.2 Microturbinas a gás natural ou propano

Os grupos de geradores a base de gás natural ou propano são limpos, silenciosos e geram níveis de ruídos expressamente baixos, devido à instalação de

gabinetes protetores que reduzem sua emissão. Um exemplo desse quesito pode ser visualizado na figura 4.4.

Figura 4.4 – Gerador a gás natural ou propano da Cummins.

As vantagens da utilização do gás natural para acionar o sistema são:

- Abastecimento normalmente ilimitado - não é necessário nenhum reabastecimento.
- Combustão não poluente.
- Combustível quase sempre disponível durante as falhas da rede elétrica externa.
- Nenhum tanque de combustível de aparência desagradável.

Já as desvantagens da utilização do gás natural para acionar o sistema são:

- O combustível pode faltar durante um desastre natural (terremoto etc.).
- Menor rendimento (30% de BTU's a menos que a gasolina).
- A tubulação do sistema de alimentação acarreta maior custo de instalação.
- Indisponível em muitas áreas.

Vantagens da utilização do propano (LP), para acionar o sistema são:

- Longo prazo de validade.
- Combustão não poluente.
- Facilmente armazenado, tanto em grandes tanques quanto em cilindros menores de 5-10 galões.
- Pode ser obtido durante as interrupções da rede elétrica - os postos de combustível talvez não consigam bombear outros combustíveis, durante as interrupções da rede elétrica, mas os cilindros de LP costumam ser armazenados cheios.
- A facilidade de abastecimento de grandes tanques residenciais é muito comum hoje em dia.

Desvantagens da utilização do propano (LP), para acionar o seu sistema residencial de reserva:

- Gás inflamável em cilindros pressurizados.
- Sistema de alimentação mais complicado (maior possibilidade de falha).
- Tanques maiores, esteticamente desagradáveis.
- A tubulação do sistema de alimentação acarreta maior custo de instalação.
- Algumas legislações locais proíbem o uso de propano à alta pressão, em aplicações residenciais.

4.1.3 Estação de Células a Combustível

Um sistema de célula a combustível é composto pelos seguintes subsistemas:

- Fonte de oxigênio (oxigênio ou ar),
- Fonte de hidrogênio,
- Monitoramento de calor,
- Monitoramento de água,
- Condicionamento da potência,
- Sistema operacional.

A figura 4.5 ilustra o diagrama de blocos simplificado de um sistema de estação de células a combustível juntamente com seus subsistemas.

Figura 4.5 – Estação de células a combustível juntamente com seus subsistemas.

Nos itens abaixo serão descritos de forma resumida os subsistemas das células a combustível.

4.1.3.1 Subsistemas - Oxigênio

O oxigênio utilizado nas estações de células a combustível pode ser proveniente de duas formas distintas, uma delas é a obtenção do próprio ar que respiramos e a outra é a partir de cilindros de oxigênio comprimido instaladas no sistema geral. A escolha de captação do oxigênio depende de cada tipo de projeto e sua finalidade de uso, pois existem situações nas quais a obtenção do ar é impossível, como em projetos de submarinos e naves espaciais.

A figura 4.5 ilustra como o oxigênio do ar é coletado e inserido na estação de células a combustível. Na medida em que o oxigênio é requisitado pela estação, o subsistema de controle aciona o compressor que conduz o ar para a estação. No entanto é necessário conduzi-lo antes ao processo de umidificação, o qual ajustará a temperatura e a umidade do gás com as condições de funcionamento do sistema, esse processo é feito através da água e do calor gerado pela estação.

A umidificação do ar é feita para assegurar de forma sucinta o fluxo de íons pela membrana da célula e evitar o seu ressecamento. Toda a água gerada pelo sistema deverá ser armazenada e reutilizada para umidificar os gases dos reagentes e resfriar o conjunto como um todo.

Os processos utilizados para a umidificação do oxigênio/ar são:

- Borbulhagem do gás através da água,
- Injeção direta da água ou de vapor,
- Injeção de Água Quente Proveniente do Catodo.

Borbulhagem do gás

Método utilizado em células pequenas ou únicas, no qual o fluxo de ar é relativamente pequeno. Este método consiste em injetar o ar em um tubo imerso em um líquido quente, dessa forma as bolhas de ar serão umedecidas. O nível de

umidade pode ser ajustado pelo controle de temperatura do líquido por meio de calefadores elétricos, conforme mostra a figura 4.6. Este dispositivo deve ser projetado de tal modo que o ar umedecido não transporte gotas de água para o sistema. No entanto esse sistema é pouco utilizado devido ao seu tamanho e problemas no controle de temperatura e nível de água (BARBIR, 2005).

Figura 4.6 – Esquema de borbulhagem do gás.

Injeção direta de água ou vapor

É um método mais compacto de umidificação do ar, que pode ser visualizado pela figura 4.7. A quantidade exigida de água a ser utilizada pode ser calculada em função das condições de funcionamento da pilha (temperatura, pressão, taxa de fluxo do gás e umidade relativa desejada) e dosada por meio de uma bomba de medida. No entanto a água necessita de uma fonte de calor para realizar sua evaporação, podendo ser utilizado compressor de ar (obviamente aplicável somente em sistemas pressurizados) e o calor da própria pilha da célula combustível. A injeção da água durante o processo de compressão pode melhorar a eficiência do processo e simultaneamente refrigerar o gás comprimido, entretanto, este método não é aplicável para todos os tipos de compressores.

A injeção de vapor direta elimina a necessidade de calor adicional, entretanto, o vapor deve ser gerado no próprio sistema, desse modo o método é aplicável somente para os sistemas onde o calor gerado possui temperatura acima da temperatura de ebulição da água (100°C em 101.3 kPa).

Figura 4.7 – Esquema de injeção direta de água ou vapor.

Troca do calor e água da exaustão do cátodo

É o processo que utiliza o próprio calor e a água gerada pelo sistema de células a combustível para abastecer o umidificador, realizando dessa forma a umidificação do ar entrante na estação de células a combustível, conforme mostra a figura 4.8.

Figura 4.8 – Esquema troca do calor e água da exaustão do cátodo.

4.1.3.2 Subsistema Hidrogênio – Reformador de Combustível

O hidrogênio é um bem abundante na face terrestre, no entanto ele não é encontrado na sua forma bruta para utilização, mas pode ser obtido a partir de outros combustíveis encontrados no mercado nacional, como combustíveis derivados do petróleo e o álcool. Como na estação de células a combustível sua utilização deve ser pura, é necessário reformá-lo neste subsistema para não contaminar e prejudicar o funcionamento da estação. O principal desafio encontrado neste subsistema é como realizar esse processo de separação do hidrogênio do combustível utilizado de modo eficiente e não prejudicial ao funcionamento da estação.

Os processos utilizados neste subsistema para a reforma do combustível são a reforma a vapor, oxidação parcial e pirólise a plasma.

Reforma a vapor

Nos processos químicos envolvendo fontes fósseis, o método mais comum e eficiente de produzir o hidrogênio é a partir de reforma a vapor que representa cerca de 70 a 80% da produção.

Esse método consiste em misturar um vapor quente a 950°C ao gás natural, que vai convertê-lo numa mistura rica em hidrogênio e monóxido de carbono, após esse processo que já resultou o hidrogênio pode ocorrer a mistura do monóxido de carbono com água para resultar mais hidrogênio e dióxido de carbono. Abaixo segue de forma simplificada a reação química.

A partir deste processo pode ocorrer a produção de hidrogênio da ordem de 100 mil metros cúbicos por hora.

No entanto a eficiência real desse processo não é de 100%, gerando perdas de calor no processo, incluindo o calor dissipado ao ambiente e o calor levado ao gás.

Oxidação parcial

Outra forma de obter o hidrogênio a partir de fontes fósseis é através da oxidação parcial, o princípio de produção é praticamente o mesmo da reforma a vapor, porém com uma pequena diferença, ao invés de inserir vapor de água quente ocorre a inserção de oxigênio ou ar nas reações. Esse método possibilita a utilização de combustíveis mais pesados e com mais átomos de carbono como o petróleo e o carvão mineral.

Pirólise a Plasma

É o método que permite a produção de hidrogênio e carbono extremamente puro, seu princípio de produção é simples e consiste em aplicar um arco elétrico num hidrocarboneto gasoso possibilitando assim a sua separação sem liberar gases prejudiciais ao meio ambiente.

Essa reação ocorre a uma temperatura de aproximadamente 1500°C. Seu esquema de produção segue na figura 4.9.

Figura 4.9 – Pirólise a Plasma.

Qualquer um dos três modos utilizados para a reforma do combustível produz hidrogênio quente e saturado de água, eliminando a necessidade de um umidificador do lado do ânodo, porém exige um radiador para o gás do ânodo operar com a mesma temperatura de funcionamento da célula combustível.

No entanto, comparando-se o potencial elétrico gerado pela célula a combustível utilizando o gás hidrogênio puro com o gás hidrogênio produzido pelo reformador gera-se uma perda de potencial elétrico da célula a combustível de 30 mV (BABIR, 2005). Essa perda de potencial em comparação a aplicação de uma estação de célula a combustível não causará problemas, pois a estação é formada por um conjunto de células visando produzir o potencial elétrico necessário para aplicar na carga. A figura 4.10 ilustra uma comparação entre os gases de hidrogênio utilizado numa célula a combustível.

Figura 4.10 – Potencial elétrico pela densidade de corrente (BABIR, 2005).

Essa perda de potencial está ligada diretamente ao baixo índice de hidrogênio gerado e aos gases poluentes gerados na reforma do combustível, contaminando dessa forma os componentes da célula e o meio ambiente com o monóxido de carbono e dióxido de carbono.

4.1.3.3 Integração do gerenciamento do sistema de água e calor

Além de monitorar e controlar o fornecimento dos reagentes à estação de célula a combustível, ocorre a necessidade do sistema também monitorar a produção de água e calor. Pois para o bom funcionamento da estação ocorre a necessidade de umedecer os reagentes com o intuito de manter a membrana polimérica das células úmidas, uma vez que o transporte de íons depende da umidade contida nas membranas.

O excesso de água produzida no ânodo pode obstruir a entrada de oxigênio na estação e consequentemente prejudicar o funcionamento de todo o sistema, a água produzida nesse processo deverá ser conduzida a um reservatório com o intuito de utilizá-la juntamente com o calor da exaustão produzido pela pilha de célula a

combustível no processo de umidificação dos reagentes e na reforma do combustível.

4.1.3.4 Subsistema elétrico

O subsistema elétrico de uma célula a combustível é o setor responsável pela entrega de potência necessária a carga. A configuração e as características desse subsistema dependem exclusivamente das exigências da carga que irá ser acionada, a qual pode variar de acordo com cada tipo de aplicação.

O potencial elétrico gerado pela pilha depende do número de células associadas no sistema, sendo sua geração em corrente contínua (C.C.), no entanto dependendo da aplicação é necessário passá-lo por um conversor de energia e por um regulador de tensão. Os circuitos eletrônicos desses conversores podem ser compostos por componentes tais como:

- Tiristores.
- MOSFET; usado tipicamente nos sistemas de baixa voltagem até aproximadamente 1kW.
- IGBT; para aplicações de alto valor de corrente ($> 50 \text{ A}$).

Estes componentes juntamente de diodos, capacitores e indutores podem fornecer a tensão de saída desejada pela carga, que está em função do tempo de chaveamento dos componentes eletrônicos.

A figura 4.11 ilustra o esquema elétrico de uma estação de células a combustível acionando uma carga em corrente contínua.

Figura 4.11 – Aplicação em carga de corrente contínua.

O conversor DC/DC possui a finalidade de ajustar a tensão de saída de uma estação de células a combustível com a tensão de entrada de uma bateria e essa bateria acionará a carga com a devida tensão elétrica necessária em corrente contínua.

Para aplicações das células a combustível em cargas que exija corrente alternada (C.A.) deve incluir uma etapa de transformação C.C. para C.A. de frequência fixa de 60 Hz. Isto é realizado por um circuito eletrônico ilustrado na figura 4.12.

Figura 4.12 – Tipos de conversores CC/CA.

A corrente resultante desse conversor possui a forma de onda quadrada que muitas vezes não é aceitável para o acionamento de cargas e é necessário

transformá-la ao mais próximo possível de uma função senoidal, isso é feito por modulação por largura de pulso (PWM).

O sistema de células a combustível deve possuir uma bateria para realizar a partida dos seus componentes antes do seu próprio funcionamento, e quando estiver operando normalmente passa de modo automático a recarregá-la.

Tanto em aplicações em corrente alternada ou em corrente contínua as estações de células a combustível possuem um sistema operacional de controle, conforme pode ser visto pelas figuras 4.11 e 4.13, abrangendo todos os dispositivos de acionamento, controle e segurança, permitindo a operação das células com as devidas especificações de sua aplicação. O seu princípio de funcionamento consiste em analisar todos os parâmetros de operação da estação, atuando na entrada de gases de acordo com a solicitação de potência elétrica e reconhece quando ocorre alguma perturbação e falhas que poderá danificar o sistema, emitindo assim um alarme de aviso (WENDT, 2001).

Portanto, o sistema operacional de controle possui a função de controlar parâmetros de funcionamento da célula combustível (taxas de fluxo, temperatura, umidade, etc.) e realizar a comunicação com a carga e os outros componentes elétricos do sistema, procurando estabelecer o ponto necessário de entrega de potência à carga sem danificar a estação. Isto é essencial a aplicações nas quais a célula combustível opera integrada dentro de uma rede elétrica. O funcionamento dos subsistemas elétrico e sistema operacional dependem de cada tipo de aplicação e a figura 4.13 mostra a configuração elétrica para ser utilizado em corrente alternada juntamente com seus principais componentes:

- Pilha da célula combustível que gera a corrente C.C. em determinada tensão.
- Conversor de nível de tensão produzida pela célula combustível.
- Bateria.
- Diodo, para impedir o fluxo atual de volta à célula combustível.
- Capacitor imediatamente antes do conversor de DC/DC para filtrar os ruídos.

- Sistema operacional de controle para assegurar o funcionamento eficiente e a confiança do sistema, realiza o monitoramento da corrente e da tensão no subsistema, podendo também determinar e fornecer sinais de controle.
- Fonte de alimentação (C.C.) para o equipamento auxiliar da célula combustível (ventilador, bombas, válvulas de solenóide, instrumentos, etc.).

Figura 4.13 - Diagrama esquemático de um subsistema de potência CA.

Dependendo da finalidade da aplicação, o sistema pode operar como autônomo ou paralelo com a rede de energia elétrica, conforme ilustra a figura 4.14, neste caso é necessário ocorrer o sincronismo com a concessionária.

Figura 4.14 - Diagrama esquemático de um subsistema de potência CA com ligação paralela com rede pública.

Para ocorrer o sincronismo com rede elétrica pública devem-se obedecer alguns regulamentos como:

- A tensão gerada pelo sistema de célula a combustível deve possuir o mesmo nível de frequência e tensão que a rede.
- A tensão da célula deve estar em fase com a tensão da rede.
- Filtrar os harmônicos produzidos.
- Se ocorrer algum imprevisto indesejável sua retirada da rede elétrica deve ser instantâneo para segurança.

4.1.3.5 Eficiência do sistema

A eficiência das estações de células a combustível depende dos componentes adicionais que a constituem como os elementos que abastecem o processador e os que realizam o condicionamento da potência a ser entregue à carga. A figura 4.15 mostra um diagrama de bloco de um sistema genérico de célula combustível.

Figura 4.15 - Diagrama de blocos de um sistema genérico de célula a combustível.

A eficiência das estações de células a combustível pode ser calculada realizando o produto dos rendimentos dos componentes que a compões, conforme ilustra a equação (15).

$$\eta_{Sistema} = \eta_{reformador} \cdot \eta_{combustível} \cdot \eta_{FC} \quad (15)$$

Onde:

- $\eta_{Sistema}$: Rendimento do sistema.
- $\eta_{reformador}$: Eficiência do reformador.
- $\eta_{combustível}$: Eficiência do combustível.
- η_{FC} : Eficiência do potencial elétrico.

As eficiências das estações possuem a tendência de ficarem mais elevadas, devido aos avanços tecnológicos no processo de reforma do combustível, no condicionamento da potência e na integração do sistema.

4.1.3.6 Vantagens e desvantagens da sua aplicação

A implementação de uma estação de células a combustível, hoje, como geração auxiliar de energia pode propiciar prós e contras à sua utilização, pois ela surge no cenário energético como uma solução aos problemas de geração de energia, no entanto o seu alto custo no momento justifica a não utilização dessa tecnologia. Pois seu papel na geração auxiliar pode ser facilmente substituído por umas das duas tecnologias estudadas nesta dissertação e bem mais acessível do que a proposta aqui.

Contudo, com o seu desenvolvimento e a redução do seu custo ela sem dúvida passa a ser propícia de análise e aplicação, podendo acarretar benefícios a sua utilização como:

- Ausência de ruído, eliminando muitas fontes de ruídos em comparação com os sistemas convencionais, uma vez que ela não possui partes móveis em seu funcionamento e tornando-se assim mais confiável.
- A estação pode ser instalada próxima aos pontos a ser energizados, estabelecendo economia com cabos e equipamentos instalados para seu perfeito funcionamento e também evitando perdas energéticas na rede de distribuição.
- Alto poder de conversão energética contida num combustível em energia elétrica e calor.
- O calor gerado pode ser utilizado para cogeração.
- O seu funcionamento gera baixa poluição da ordem de dez vezes menos do que as normas ambientais mais restritas, trazendo benefícios na qualidade do ar e a redução do consumo de água e a descarga de água residual.
- Diversidade de combustível que pode ser utilizado como o gás natural, gasolina ou outros combustíveis fáceis de obter e transportar, basta apenas possuir um reformador químico que separará o hidrogênio.
- É de uma tecnologia nova que está em pleno desenvolvimento.

Já as desvantagens são:

- A necessidade da utilização de metais nobres como, por exemplo, a platina que é um dos metais mais caros e raros no nosso planeta.
- O elevado custo atual em comparação às fontes de energia convencional.
- A elevada pureza que o hidrogênio deve ter para não contaminar o catalisador.

- Os problemas e os custos associados ao transporte e distribuição de novos combustíveis como, por exemplo, o hidrogênio.
- Os interesses econômicos associados às indústrias de combustíveis fósseis e aos países industrializados.

Desta forma, o desenvolvimento da tecnologia em todos os materiais que compõem a célula a combustível, juntamente às vantagens de sua utilização e à redução dos custos num futuro próximo a sua aplicação, tornará viável a geração de energia elétrica auxiliar.

5 ESTUDO DE CASO

Estuda-se aqui o dimensionamento de um gerador auxiliar de energia elétrica em um laboratório de informática de uma instituição de ensino, tendo como alternativas citadas no decorrer da dissertação à geração auxiliar a diesel, a gás natural e a células a combustível tipo PEM. Ilustrando as principais características e o custo-benefício de cada tipo de geração.

O principal intuito da aplicação de um gerador neste setor será manter totalmente energizado o andar no período de ponta e no caso de ocorrência de falhas no sistema elétrico da concessionária. Desse modo todas as salas de aula e o servidor da instituição não sofrerão paralisação em seu funcionamento, evitando danos e perdas de arquivos do sistema.

O sistema atual encontrado nesta instituição de ensino é disponibilizado na figura 5.1, na qual não há nenhum tipo de geração auxiliar, tendo apenas no-break instalado no servidor principal que irá garantir a alimentação do mesmo por um período curto de tempo. Já a figura 5.2 ilustra a nova instalação com geração auxiliar, que o no-break disponibilizará energia elétrica ao servidor até o gerador auxiliar entrar em funcionamento e assumir a energização do andar como um todo e retirar o no-break de operação.

Figura 5.1 – Esquema elétrico do local sem geração auxiliar.

Figura 5.2 – Esquema elétrico do local com geração auxiliar.

Com o retorno da energia elétrica da concessionária o gerador será retirado de operação.

Para o dimensionamento da potência necessária do gerador foi realizada a medição de demanda em um período de uma semana. Esse tempo foi determinado pelo motivo de repetição das cargas ligadas serem constantes semanalmente.

5.1 Medições e levantamento da curva de demanda

Durante o período do dia 4 ao dia 11 de setembro, aproximadamente uma semana, foi realizada a medição de consumo de potência ativa, através do medidor SAGA 4000, fazendo assim o levantamento da curva de demanda neste período, disposto na figura 5.3 (1 registro/15 minutos, 98 registros).

Figura 5.3 – Curva de demanda.

Analisando a curva de demanda da figura 5.3 pode-se observar que demanda máxima consumida neste período foi de 15,4 KW. Este valor de demanda será utilizado para o dimensionamento do gerador adequado para suprir as necessidades deste recinto.

5.2 Dimensionamento do gerador

Com a potência de demanda máxima registrada na figura 5.3 e analisando as possíveis potências do gerador disponibilizado no mercado, pode-se concluir que a potência do gerador que atenderá o caso será de 20 kW.

5.2.1 Dados utilizados para o cálculo do gerador

O gerador funcionará 3 horas por dia no período de ponta de segunda a sexta e como geração auxiliar no caso de ocorrer alguma falha no fornecimento de energia da concessionária. Desse modo pode-se estimar o período de funcionamento do gerador no mês e no ano, que será de:

$$T_{Funcionamento_{mês}} = H_{Horário_funcionamento_{dia}} \cdot D_{dias_mês} = 3.22 \Rightarrow T_{Funcionamento_{mês}} = 66horas / mês$$

$$T_{Funcionamento_{ano}} = T_{Funcionamento_{mês}} \cdot N_{número_mês_{ano}} = 66.12 \Rightarrow T_{Funcionamento_{ano}} = 792horas / ano$$

Portanto o gerador funcionará 66 horas por mês e 792 horas por ano, do mesmo modo pode-se determinar a energia mensal e anual gerada pelo gerador, adotando a geração de 20 kWh por dia, totalizando assim a energia de:

$$E_{mês} = D_{dias_mês} \cdot E_{dia} = 22 \times 20 \Rightarrow E_{mês} = 440kWh / mês$$

$$E_{anual} = E_{mês} \cdot N_{número_mês_{ano}} = 440 \times 12 \Rightarrow E_{ano} = 5.280kWh / ano$$

Portanto, esse gerador gerará 440 kWh/mês e 5.280 kWh/ano. Estes dados juntamente dos valores específicos de preço do kW do gerador, do custo de manutenção, do custo do combustível e da análise de amortização do capital, conforme fórmula (16), será analisada o custo anual de cada gerador para esta aplicação. O capital investido será de empréstimo bancário com tempo limite para a quitação de 30 anos e com juros de 12% ao ano.

$$A = \frac{j}{1 - (1 + j)^{-N}} C \quad (16)$$

Onde:

- A: Amortização do capital;
- j: Taxa de juros ao ano;
- N: Tempo de investimento;
- C: Capital investido.

Desse modo a amortização do capital em função do custo de aquisição do gerador será de:

$$A = \frac{0,12}{1 - (1 + 0,12)^{-30}} C \Rightarrow A = 0,124.C \quad (17)$$

Outros dados para determinar os valores dos geradores são os custos do kW do gerador e o custo de manutenção do mesmo, e podem ser visualizados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Custos de equipamentos e manutenção das tecnologias. (WHOLE BUILDING DESIGN GUIDE, 2009).

Gerador e Custos		Tempo e preço médio da manutenção	
Geradores	Custo (\$ / kW)	Tempo para realizar a manutenção	Custo médio da manutenção (¢ / kWh)
Micro turbinas	700 à 1.100	5.000 – 8.000	0,5-1,6 (estimado)
Células a Combustível	3.000 à 5.0000	Anualmente: verificar o sistema de abastecimento de combustível e o reformador do sistema 40.000: substituir células pilha	0,5-1,0 (estimado)
Geradores a Diesel	300 à 800	750-1.000: mudança de petróleo e filtro de óleo 8.000: reconstruir cabeça motor 16.000: reconstruir motor bloco	0,5-1,0 (estimado)

Nos itens abaixo será feita uma comparação dos custos anuais para cada tipo de gerador especificado nesta dissertação.

5.2.2 Geradores a diesel

O preço do kW do gerador a diesel está em torno de 750 US\$/kW e para a potência necessária de 20 kW o capital de investimento na aquisição deverá ser de US\$ 15.000,00, o custo médio de manutenção é de 0,75 c/kWh, o consumo de combustível é de 8L/h e o preço do combustível diesel está em torno de 0,94 US\$/l. De posse desses dados foi montada a tabela 5.2, que indica os valores gastos ao ano.

Tabela 5.2 – Custo final anual do gerador a diesel.

Item	Preço (US\$/ano)
Amortização do Capital	1.860,00
Manutenção	3.960,00
Combustível	5.955,84
Total	11.775,84

Portanto, o custo anual em um período de 30 anos para possuir um gerador auxiliar a diesel deverá ser cerca de US\$ 1.775,84, após os 30 anos serão somente o custo de manutenção, troca de peças e custo de combustível a serem pagos.

5.2.3 Geradores a Gás Natural

O preço do kW do gerador a gás natural está em torno de 1.100,00 US\$/kW e para a potência necessária de 20 kW o capital de investimento na aquisição deverá ser de US\$ 22.000,00, o custo médio de manutenção é de 1,2 c/kWh, consumo médio de combustível é de 5,9 m³/h (totalizando 4.672,8 m³/ano) e o preço do gás natural é de aproximadamente 0,79 R\$/m³, que é equivalente 0,35 US\$/m³. transcrevendo para a tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Custos totais do gerador a gás natural.

Item	Preço (US\$/ano)
Amortização do Capital	2.728,00
Manutenção	6.336,00
Combustível	1.635,48
Total	10.699,48

Portanto o custo anual em um período de 30 anos para possuir um gerador auxiliar a gás natural deverá ser cerca de US\$ 10.699,48, após os 30 anos serão somente o custo de manutenção, troca de peças e o custo de combustível a serem pagos.

5.2.4 Estação de células a combustível tipo PEM

O preço do kW do gerador a diesel está em torno de 4.000,00 US\$/kW e para a potência necessária de 20 kW o capital de investimento na aquisição deverá ser de US\$ 80.000,00, o custo médio de manutenção é de 0,75 c/kWh, consumo médio de combustível é de 44,9 m³/h (totalizando 35.560,8 m³/ano) e o preço do gás natural é de aproximadamente 0,79 R\$/m³, que é equivalente 0,35 US\$/m³. Transcrevendo para a tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Custo Total da Estação de Células a Combustível.

Item	Preço (US\$/ano)
Amortização do Capital	9.920,00
Manutenção	3.960,00
Combustível	12.446,28
Total	26.326,28

Portanto o custo anual para possuir um gerador auxiliar a célula a combustível deverá ser cerca de US\$ 26.326,28, após os 30 anos serão somente o custo de manutenção e o custo de combustível a serem pagos.

5.2.5 Análise das tecnologias utilizadas

Qualquer uma das três tecnologias estudadas para geração auxiliar satisfaz a aplicação desejada, no entanto, o fator custo é exaltado na escolha do gerador. O que no momento torna a aplicação da estação de células a combustível totalmente inviável para esta aplicação, de acordo com os custos anuais calculados, conforme mostrado nos itens anteriores e na tabela 5.5. As estações de células a combustível será 246% mais cara do que os geradores a gás natural que é o menor custo anual.

Tabela 5.5 – Comparação dos custos.

Tecnologia	Custo (US\$/ano)
Gerador a diesel	11.775,84
Micro turbina a gás natural	10.699,48
Células a combustível	26.326,28

A tabela 5 ilustra a comparação entre os geradores escolhidos nesta dissertação (WHOLE BUILDING DESIGN GUIDE, 2009).

Tabela 5.6 – Comparativos dos geradores auxiliares.

Tecnologia	Benefícios	Desvantagem	Combustível	Tamanho (kW)
Micro turbinas A eficiência é de 28% para 33%	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperação térmica melhora a eficiência dos sistemas. • Energia térmica de saída para aplicações residenciais ou comerciais. • Acionáveis como geração estacionária, para eliminação de picos de energia, ou back-up. • Comercialmente disponível em quantidades limitadas 	Insuficiente energia térmica de saída para aplicações industriais.	O gás natural Propano Multi-combustível	15-250
Célula a Combustível Alta temperatura: Eficiência é de 45% a 55% Baixa temperatura: a eficiência é de 30% para 40%	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência alta de conversão do hidrogênio em eletricidade. • aplicações residenciais, comerciais e industriais. • Pode ser mais eficiente quando utilizado a recuperação do calor. • Emissões de apenas água e calor com baixas emissões de outros combustíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos dispositivos disponíveis comercialmente. • A maioria dos estudos é para aplicações automotivas. • Necessidade de reformador de combustível em quase todas as aplicações (redução de combustível e da eficiência elétrica) • Arranque a frio é de 1 hora para PEMFC. 	Direto por hidrogênio Gás natural Propano Metanol ou outra fonte de hidrogênio através reformador	3-250
Gerador a diesel A eficiência é de 28% para 37%	<ul style="list-style-type: none"> • Acionáveis como geração estacionária, para eliminação de picos de energia, ou back-up • Instalação perto do local de armazenamento do combustível. 	• As questões ambientais, emissões de poluentes e ruído.	Diesel	Associação de grupo de geradores.

Analisando as tabelas 5.5 e 5.6, pode-se observar que a tecnologia mais econômica para a aquisição no presente momento é o gerador a diesel, seguido pela micro turbina a gás natural e por último surge as células a combustível como a mais cara devido a sua tecnologia ser recente no cenário mundial. Porém com análise feita sobre a eficiência na tabela 5.6, as células a combustível leva larga vantagem sobre as demais, podendo aumentar sua eficiência com a utilização do calor gerado para geração de eletricidade. Quanto ao quesito de mão de obra de manutenção as células a combustível é mais barata, no entanto após 40.000 horas de funcionamento é necessário realizar a troca da pilha de células a combustível, levando o sistema a ficar mais caro que os demais, mesmo levando em consideração as devidas manutenções previstas.

Os benefícios gerados pelas tecnologias levam a célula a combustível a um patamar superior às demais, pois além de possuir alta eficiência, ela gera água, calor e baixa poluição ao meio ambiente, ao contrário das demais. Porém o fator financeiro mostra a situação totalmente desfavorável a sua aplicação, pois a micro turbina a gás natural e o gerador a diesel realizarão o mesmo efeito que a estação de células a combustível e com menor custo. A tendência com a evolução da tecnologia e a difusão da sua utilização será a redução do custo para 400,00 US\$/kW em 2015 (MATELLI, 2001), o que passaria a ser sua utilização mais atraente em relação às outras tecnologias.

5.3 Análise do custo com a utilização do Crédito de Carbono

Créditos de Carbono são certificados que autorizam o direito de poluir. As agências de proteção ambiental reguladoras emitem certificados autorizando emissões de toneladas de dióxido de enxofre, monóxido de carbono e outros gases poluentes. Inicialmente, selecionam-se indústrias que mais poluem no País e a partir daí são estabelecidas metas para a redução de suas emissões. As empresas recebem bônus negociáveis na proporção de suas responsabilidades. Cada bônus, cotado em dólares, equivale a uma tonelada de poluentes. Quem não cumpre as metas de redução progressiva estabelecidas por lei, tem que comprar certificados

das empresas mais bem sucedidas. O sistema tem a vantagem de permitir que cada empresa estabeleça seu próprio ritmo de adequação às leis ambientais. Estes certificados podem ser comercializados através das Bolsas de Valores e de Mercadorias, como o exemplo do Clean Air de 1970, e os contratos na bolsa estadunidense. (KHALILI, 2003).

Nos itens abaixo será realizado um estudo financeiro-econômico sobre a utilização de geradores auxiliares em instalações elétricas visando também preservar o meio ambiente com participação no mercado de carbono. Comparando os valores anuais de cada geração auxiliar com as vendas e compras de crédito de carbono.

5.3.1 Gerador a diesel

O gerador a diesel analisado nesta dissertação possui a vazão de gases de escape da ordem de 106 l/s, totalizando desta forma 382.000 l/h. Como o gerador funcionará 792 horas por ano acabará liberando ao meio ambiente cerca de 303.000.000 l/ano de gases prejudiciais, que corresponde a 303.000 m³ de volume.

Os créditos de carbono são obtidos em função da massa em tonelada de gases poluentes despejada ao meio ambiente e para isso é necessário conhecer a densidade do dióxido de carbono, que é 1,98 Kg/m³. Com a densidade do dióxido de carbono e o volume emitido ao meio ambiente pode-se calcular a massa em toneladas, que é de:

$$d = \frac{m}{v} \Rightarrow m = d.v = \frac{1,98 \times 303.000}{1000} \Rightarrow m = 599,94 \text{ _toneladas}$$

O crédito de carbono está custando na bolsa de valores 10 euros por toneladas (13,23 dólar por toneladas), para a massa de 599,94 toneladas essa instituição

deverá gastar em torno de 7.937,21 US\$/ano. Completando a tabela 5.2 resultará o valor pago anual com os créditos de carbono, como pode ser visualizada na tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Custo total com crédito de carbono para geração auxiliar a diesel.

Item	Preço (US\$/ano)
Amortização do Capital	1.860,00
Manutenção	3.960,00
Combustível	5.955,84
Crédito de Carbono	7.937,21
Total	19.713,05

Portanto o custo final anual para a obtenção de um gerador a diesel com a aquisição dos créditos de carbono será de US\$ 19.713,05.

5.3.2 Micro turbinas a gás natural

A micro turbina a gás natural analisada nesta dissertação possui a vazão de gases de escape da ordem de 4,9 m³/min, totalizando desta forma 294 m³/h. Como o gerador funcionará 792 horas por ano acabará liberando ao meio ambiente cerca de 232.848 m³/ano de gases prejudiciais.

Os créditos de carbono são obtidos em função da massa em tonelada de gases poluentes despejada ao meio ambiente e para isso é necessário conhecer a densidade do dióxido de carbono, que é 1,98 Kg/m³. Com a densidade do dióxido de carbono e o volume emitido ao meio ambiente pode-se calcular a massa em toneladas, que é de:

$$d = \frac{m}{v} \Rightarrow m = d.v = \frac{1,98 \times 232.848}{1000} \Rightarrow m = 461_toneladas$$

O crédito de carbono está custando na bolsa de valores 10 euros por toneladas (13,23 dólar por toneladas), para a massa de 461 toneladas essa instituição deverá gastar em torno de 6.099,03 US\$/ano. Completando a tabela 5.3 resultará o valor pago anual com os créditos de carbono, como pode ser visualizada na tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Custo total com crédito de carbono para micro turbina a gás natural.

Item	Preço (US\$/ano)
Amortização do Capital	2.728,00
Manutenção	6.336,00
Combustível	1.635,48
Crédito de Carbono	6.099,03
Total	16.798,51

Portanto o custo final anual para a obtenção de uma micro turbina a gás natural com a aquisição dos créditos de carbono será de US\$ 16.798,51.

5.3.3 Estação de células a combustível

As células a combustível emitem aproximadamente 500 Kg a cada 1000 kWh de energia elétrica de dióxido de carbono ao meio ambiente (NEVES, 2002), como a estação gerará 5280 kWh por ano, ela emitirá ao meio ambiente 2.640 Kg (2,64 toneladas).

O crédito de carbono está custando na bolsa de valores 10 euros por toneladas (13,23 dólar por toneladas), para a massa de 2,64 toneladas essa instituição deverá gastar em torno de 35 US\$/ano.

Fazendo uma comparação da emissão de dióxido de carbono da estação de células a combustível com a geração mais crítica, que é o gerador a diesel, ilustra enorme vantagem das estações de células a combustível. Mostrando que se pode obter lucro na instalação da estação como geração auxiliar em forma de vendas de créditos de carbono. Para essa instituição o lucro será de aproximadamente:

$$\begin{aligned}
 Lucro_{Crédito_Carbono} &= Custo_{Crédito_Carbono_{Diesel}} - Custo_{Crédito_Carbono_{Células_Combustível}} \\
 Lucro_{Crédito_Carbono} &= 5.955,84 - 35 \\
 Lucro_{Crédito_Carbono} &= 5.920,84
 \end{aligned}$$

Com o lucro que pode ser obtido e com as informações descritas acima, a tabela 5.4 pode ser incrementada, resultando na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Custo total com crédito de carbono para estação de células a combustível.

Item	Preço (US\$/ano)
Amortização do Capital	9.920,00
Manutenção	3.960,00
Combustível	12.446,28
Créditos de Carbono	35,00
Venda de Créditos de Carbono	- 5.920,84
Total	20.440,44

Portanto, o custo final anual para a obtenção de uma estação de células a combustível com a venda de créditos de carbono será de US\$ 20.440,44. Isso mostra que as células a combustível utilizando a favor do meio ambiente e com a participação em vendas de créditos de carbono ela torna-se uma opção viável para a sua utilização.

6 CONCLUSÃO

O contexto histórico da humanidade mostra grande dependência da eletricidade e com o aumento da demanda da energia elétrica causa a preocupação com a falta de energia elétrica no decorrer dos próximos anos. Uma vez que as principais fontes de energia brasileira, que são as hidrelétricas, estão na sua totalidade no limite de geração o que pode acarretar colapsos energéticos futuramente no País. A saída para essa preocupação seria o investimento em novas hidrelétricas ou em outras fontes de energia alternativas como as usinas térmicas, usinas nucleares, sites eólicos e a mais promissora fonte de energia baseada nas células a combustível.

Esta dissertação procurou descrever o estado da arte da célula a combustível, descrevendo seus componentes e reações químicas envolvidas no processo de geração de energia, também descreve o estado da arte de uma estação de células a combustível, explicando os principais componentes responsáveis para geração de energia elétrica em larga escala. Trata também da utilização da estação de células a combustível em um estudo de caso real realizando comparações com gerador a diesel e micro turbina a gás natural, comparando os seus preços e a aquisição de créditos de carbono no mercado mundial.

Como descrito no decorrer da dissertação pode-se perceber que teoricamente as células a combustível possuem uma posição de destaque no cenário energético, pois ela gera energia elétrica através da reação dos gases hidrogênio e oxigênio, obtendo como subproduto a água, o calor e dependendo da forma de obtenção do gás hidrogênio, ocorre a geração de poluição ambiental, porém em pequena escala quando comparado às outras fontes de energia.

Pode-se analisar também, no transcorrer desta dissertação, uma aplicação de um estudo de caso no qual foi dimensionado um gerador auxiliar para um laboratório de informática de uma instituição de ensino ilustrando as possibilidades de geradores que podem ser utilizados para essa aplicação. O custo de aquisição das estações de células a combustível é considerado elevado por ser uma tecnologia recente, porém se for utilizado como estratégia a pouca emissão de poluentes ao meio ambiente e negociar este bem no mercado de créditos de carbono pode se tornar muito atrativo. Ressurgindo no cenário energético com grandes possibilidades

de aquisição no presente momento, pois seu custo quase se equipara às tecnologias de gerador a diesel e a micro turbina de gás natural.

Portanto, com o desenvolvimento da tecnologia, a tendência é a redução do seu custo para tornar-se atrativa a sua utilização e reduzir ainda mais o seu custo com a participação no mercado de créditos de carbono.

BIBLIOGRAFIA

Meisen, P. et al. **Application of fuel cells and infrastructure development for the hydrogen economy**. Denver, IEE, 9 junho 2004. IEEE power engineering society energy development and power generating committee, Denver, 2004.

Redação, com colaboradores. **Célula a combustível de hidrogênio inova o mercado de energia auxiliar**: Paran@shop, Paraná, 14 Abril 2008. Disponível em: <<http://www.paranashop.com.br/colunas/imprimir.php?id=19190>> Acesso em: 27 Abril, 2009.

WENDT, H. et al. **Células a combustível de baixa potência para aplicações estacionárias**. Quim. Nova, Vol. 25, No. 3, p472, setembro 2001.

PUKRUSHPAN, T. J.; STEFANOPOULOU, G. A.; PENG H. **Control of fuel cells breathing**. IEEE Control Systems Magazine, abril 2004.

KISHINEVSKY, Y., ZELINGHER, S. **Coming clean whit fuel cells**. IEEE power & energy magazine, IEEE p22-25, novembro e dezembro 2003.

SERPA, A. L. **Estudo e implementação de um sistema gerador de energia empregando células a combustível do tipo PEM**. 2004. 208p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

Fry, M. R. **Environmental impacts of electricity generation: fuel cells**. IEE PROCEEDINGS-A, Vol. 140, NO. 1, Janeiro 1993.

STARKE, X. Y.; TOLBERT, L.M.; OZPINECI, B. **Fuel cell power conditioning for electric power applications: a summary**. IET Electr. Power Appl., 2007, V. 1, No. 5, p. 643–656, 2007.

LELLIS, M. M. **Fontes alternativas de energia de energia elétrica no contexto da matriz energética brasileira: meio ambiente, mercado e aspectos jurídicos**. 2007. 134p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007.

Neto, E. H. G. **Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível**. Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005. 240 p.

NISHI, H. M. **Influência dos créditos de carbono na viabilidade financeira de três projetos florestais**. Viçosa. 2004. 8p.

NEVES, P. N. **Introdução da produção energética através de células de combustível no planejamento energético**. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, agosto. 2002. Palestra conferida por ocasião a CENERGIA – COOPE/URFJ. Rio de Janeiro, 2002.

FONTES, G. et al. **Interactions Between Fuel Cells and Power Converters: Influence of Current Harmonics on a Fuel Cell Stack**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, V. 22, NO. 2, Março 2007.

AGBOSSOU, K. **Integrated Stand-alone Renewable Energy System Based On Energy Storage In The Form Of Hydrogen**. IEEE Canadian,, 2003, p. 17-20, 2003.

POWER GENERATION. **Manual de aplicação grupos geradores arrefecidos a água**. [2003]. 183p. Apresenta a classificação dos geradores.

II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES, 7., 2008, Florianópolis. **Módulos de simulação para estudos de células a combustível**. Florianópolis. 2008. 12p.

COSTA, A. R. **Modelagem computacional e análise do comportamento de células a combustível de membrana polimérica em regime estático e dinâmico de carga**. 2005. 119p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

SOO, G. Y. C. J. et al. **Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Modeling for High Efficiency Fuel Cell Balance of Plant (BOP)**. Seoul, outubro 2007. Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, 2007.

JEON, Y. G. **PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell Bipolar Plates**. Seoul, outubro 2007. Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, 2007.

BARBIR, F. **PEM Fuel Cells**. Califórnia: Elsevier Academic Press, 2005. 433p.

SMARSSARO, R. T. **Simulação de células a combustível em matlab/simulink**. 2007. 63p. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2007.

MARTELLI, A. J. **Sistemas de cogeração baseados em células combustível aplicados em hospitais**. 2001. 136p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

WENDT, H.; GÖTZ, M.; LINARDI, M. **Tecnologia de células a combustível**. Química Nova, Vol. 23, No 4, p538, julho 1999.

JAIN, A. M.; KUSHARE, B.E. **Techno-economics of solar wind hybrid system in indian context: a case study**. Índia, dezembro 2007. IET-UK International Conference on Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES 2007), Índia, 2007.

GASNET. São Paulo. <<http://www.gasnet.com.br/conteudos.asp?cod=2606&tipo=Novidades&categoria=4>>. Acesso em 27 abril 2007.

Eletrocell. São Paulo. Funcionamento das células a combustível. Disponível em <<http://www.electrocell.com.br>>. Acesso em: 24 abril 2007.

AGÊNCIA BRASIL. São Paulo. Apresenta o custo dos créditos de carbono. Disponível em: <[http://www.agenciabrasil.gov.br/noticias/2009/04/07/materia.2009-04-07.827603909 4/view](http://www.agenciabrasil.gov.br/noticias/2009/04/07/materia.2009-04-07.827603909%204/view)>. Acesso em: 27 abril 2009.

WHOLE BUILDING DESIGN GUIDE. Washington. Apresenta os custos de manutenção dos geradores. Disponível em: <<http://www.wbdg.org/resources/fuelcell.php>>. Acesso em: 20 abril 2009.

AMBIENTE BRASIL. Curitiba. Apresenta o funcionamento dos créditos de carbono. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./noticias/index.php3&conteudo=./noticias/amyra/creditos.html>>. Acessado em: 02 março 2009.