

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Projeto de Micro Turbina integrada a Célula de Combustível

**Fernando Silva Sasdelli
Wilson José Ferreira Farias**

**São Paulo
2005**

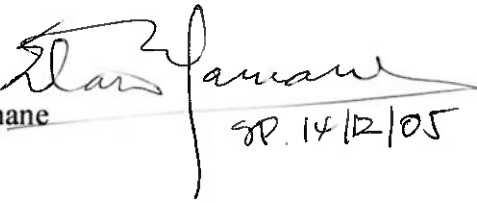
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projeto de Micro Turbina integrada a Célula de Combustível

Trabalho de Formatura Apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
Obtenção do Título de Graduação em Engenharia

Fernando Silva Sasdelli
Wilson José Ferreira Farias

Orientador: Eitaro Yamane



SP. 14/12/05

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2005

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011821

FICHA CATALOGRÁFICA

001482506

Sasdelli, Fernando Silva

**Projeto de micro turbina integrada à célula de combustível /
F.S. Sasdelli, W.J.F. Farias. -- São Paulo, 2005.
p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Energia (Mecânica aplicada) 2.Inovações tecnológicas
I.Farias, Wilson José Ferreira II.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica III.t.**

RESUMO

Este trabalho se propõe a projetar uma microturbina que opera em conjunto com uma célula a combustível, gerando energia elétrica e térmica a partir de um único combustível. Apesar de se tratar de um sistema de cogeração, o foco será dado à microturbina, às condições de entrada desta, perdas no escoamento interno e dimensionamento de paletas móveis. A tecnologia das células de combustível ainda está em seu estágio inicial e necessitaria de uma análise mais detalhada, a qual este trabalho não se propõe no momento. Foi feita apenas a pesquisa referente aos diversos tipos de célula existente no mercado atual e seleção do mais adequado para o presente estudo. O ciclo movido a gás natural é composto de uma célula SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) e de uma microturbina de ação, com um único estágio que utilizará os gases de escape da célula a altas temperaturas como insumo energético.

ABSTRACT

This study has as objective project a micro turbine that operates with a fuel cell, generating electrical and thermal power using only one power source. Despite being a cogeneration system, more importance will be given to the micro turbine, its process conditions, flow losses and the nozzles dimensioning. The fuel cells technology is still on its beginning and more studies are necessary to detail its parts, what this stud doesn't intend to do now. A research about the several kinds of fuel cell extant nowadays was made and the most proper was chosen. The cycle that operates with natural gas is compound by a SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) and a single-staged impulse action micro turbine that will use the fuel cell waste heat as power.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS.....	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 ESTUDO DE VIABILIDADE	13
2.1 ANÁLISE TÉCNICA	13
2.2 ANÁLISE ECONÔMICA	14
3 ESCOPO DO PROJETO	19
4 CICLOS TERMODINÂMICOS	20
4.1 BRAYTON.....	20
4.2 BRAYTON COM REGENERADOR.....	21
5 MICROTURBINAS	23
5.1 CLASSIFICAÇÃO	24
5.2 DIMENSIONAMENTO.....	26
5.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS	28
6 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....	29
6.1 INTRODUÇÃO	29
6.2 HISTÓRIA DAS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL.....	31
6.3 COMPONENTES.....	33
6.4 TIPOS DE TECNOLOGIA	36
6.4.1 <i>Célula a Combustível Alcalina – AFC (Alcaline Fuel Cell)</i>	38
6.4.2 <i>Membrana de Troca de Prótons – PEMFC (Próton Exchange Membrane Fuel Cell)</i>	39
6.4.3 <i>Ácido Fosfórico - PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)</i>	42
6.4.4 <i>Óxido Sólido – SOFC (Solid Oxide Fuel Cells)</i>	44
6.4.5 <i>Carbonato Fundido – MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)</i>	46
6.4.6 <i>Metanol Direto – DMFC (Direct Methanol)</i>	48
6.4.7 <i>Célula a combustível de Etanol Direto - DEFC (Direct Ethanol Fuel Cell)</i>	49
6.4.8 <i>Células de combustível Regenerativas (RFC) Regenerative Fuel Cells</i>	50
6.5 DESAFIOS	50
7 SISTEMA INTEGRADO DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL E MICRO TURBINA A GÁS PARA GERAÇÃO ESTACIONARIA DE ENERGIA	51
7.1 SELEÇÃO DA TECNOLOGIA DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL	52
8 COMBUSTÍVEL	62
8.1 GÁS NATURAL	62
8.2 ETANOL	64
8.3 SELEÇÃO DO COMBUSTÍVEL.....	64
PARTE II	65
9 DIMENSIONAMENTO DA MICROTURBINA.....	66
9.1 HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS.....	66
9.2 MÉTODO DE EQUACIONAMENTO	66
9.3 DADOS DE ENTRADA.....	77
9.4 PROGRAMA EM <i>VISUAL BASIC</i>	77
9.5 RESULTADOS	79
10 MATERIAIS.....	83
10.1 FLUÊNCIA E RUPTURA.....	83
10.2 DUCTILIDADE E FRATURA.....	85
10.3 FADIGA TÉRMICA	86
10.4 CORROSÃO.....	87
10.5 MATERIAIS PARA TURBINA A GÁS	88

10.6	REVESTIMENTOS PARA MATERIAIS DE TURBINAS A GÁS.....	89
10.7	AVANÇOS TECNOLÓGICOS DAS ÚLTIMAS DÉCADAS.....	90
11	COMPONENTES DO SISTEMA	97
11.1	COMPRESSOR	97
11.2	CÂMARA DE COMBUSTÃO	97
11.3	RECUPERADOR DE CALOR	98
11.4	SISTEMA DE COMBUSTÍVEL	98
11.5	SISTEMA DE PARTIDA	99
11.6	SISTEMA DE ENTRADA DE AR	99
11.7	SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO	100
11.8	CAIXA DE ENGRENAGENS DA SAÍDA DE POTÊNCIA	101
11.9	CONTROLES DE OPERAÇÃO	101
11.10	INSTRUMENTAÇÃO	102
11.11	EQUIPAMENTO PARA RECUPERAR O CALOR DE ESCAPE	102
12	INVESTIMENTO.....	103
13	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
14	ANEXOS	107
14.1	CÓDIGO DE PROGRAMA EM <i>VISUAL BASIC</i>	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tamanho das termoeletricas	11
Figura 2 - Ciclo Brayton (a) aberto, (b) fechado.....	20
Figura 3 - Estados termodinâmicos no Ciclo Brayton simples.....	20
Figura 4 - Ciclo Regenerativo ideal.....	21
Figura 5 - Ciclo regenerativo ideal x ciclo padrão simples	22
Figura 6 - Microturbina em operação	23
Figura 7 - Canais de escoamento entre as paletas fixas e móveis	24
Figura 8 - Variação de pressão, entalpia e temperatura através das paletas.	25
Figura 9 - Turbina axial de simples estágio	25
Figura 10 - Triângulos de velocidades.....	26
Figura 11 - Célula a Combustível (<i>Fuel Cell</i>) a hidrogênio da GM fornecendo eletricidade para a fábrica da Dow Chemical no Texas, EUA	30
Figura 12 - Diagrama do funcionamento básico de uma célula a combustível	30
Figura 13 - Célula de Grove.....	31
Figura 14 - Célula a combustível da Cemig.....	37
Figura 15 - PEMFC automotiva da Honda	40
Figura 16 - Célula a Combustível da UTC <i>Fuel Cell</i> (PC25) aberta.....	43
Figura 17 - Diagrama de funcionamento da Célula a Combustível SOFC.....	45
Figura 18 - Corte de uma célula a combustível SOFC Tubular.....	46
Figura 19 - Esquema simplificado de um módulo de uma SOFC: Entre cada linha é colocado um reformador que é aquecido por radiação pelas linhas adjacentes da célula.	56
Figura 20 - Diagrama de fluxo de um sistema CHP SOFC típico	57
Figura 21 - Várias células empacotadas em uma pilha, unidas por conectores de níquel.....	58
Figura 22 - Seção transversal da SOFC: os pacotes são arranjados em linhas conectadas em serie para o aumento da voltagem.	58
Figura 23 - Diagrama do ciclo SOFC/Turbina a gás.....	59
Figura 24 - Sistema integrado SOFC/Turbina a Gás.....	60
Figura 25 - 220-kW SOFC integrada com microturbina a gás, instalada na Universidade da Califórnia.....	61
Figura 26 - 300-kW SOFC/ turbina a gás, Pittsburgh, Pensilvânia.....	61
Figura 27 - Sistema de distribuição de gás natural.....	63
Figura 28 - Identificação dos ângulos e velocidades.....	67
Figura 29 - Tela inicial do programa	78
Figura 30 - “ <i>Twist</i> ” da paleta em 2D.....	82
Figura 31 - Curva de deformação sob carregamento constante em função do tempo.....	84
Figura 32 - Parâmetros de Larson-Miller para ligas de palhetas de turbina	85
Figura 33. Solidificação convencional e direcional utilizada para a preparação de palhetas.....	91
Figura 34 - Desenvolvimento da capacidade de resistência ao calor das palhetas.	92
Figura 35 - Comparativo de resistência a temperatura e resistência a corrosão do Policristalino, e Monocristalino.....	92
Figura 36 - Gráfico da Temperatura pela Tensão de Ruptura.....	93

Figura 37 - Gráfico de Temperatura por Tensão de Ruptura.....	95
Figura 38 – Gráfico de Vida Útil por Tensão de Ruptura.	96
Figura 39 – Célula de combustível.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre as células a combustível	37
Tabela 2 - Comparação entre geradores de energia.....	53
Tabela 3 - Eficiência do estágio para combinações de α e β	79
Tabela 4- Número de Mach para combinações de α e β	80
Tabela 5 – Comparação entre valores na base e no topo da paleta móvel.....	81
Tabela 6- Ligas de Alta Temperatura- Composição Nominal (%)	88
Tabela 7 – Risco da ingestão de corpos estranhos pela turbina a gás	100
Tabela 8 – Considerações de projeto e custos fixos	103
Tabela 9 – Exemplo de consumo para residência média	103

1 INTRODUÇÃO

Neste início de século, estamos presenciando mudanças freqüentes, radicais e quase diárias de hábitos, tecnologias, alimentação e trabalho, e o surgimento de novos paradigmas e instabilidades políticas, sociais e econômicas em quase todas as regiões do planeta. Não podemos negar o impacto que uma determinada região do planeta pode provocar em outra. É uma consequência do mundo globalizado e avançado.

Todos os países, sem exceção, estão procurando melhorar sua qualidade de vida e amenizar os problemas sócio-econômicos dentro e fora de suas fronteiras. No entanto, nenhum país sobrevive ou se desenvolve sem a participação externa. Estão todos procurando parcerias para suprir suas necessidades e minimizar fraquezas, pois muitas destas necessidades são globais, como a energia.

Na história moderna, os países que souberam utilizar suas fontes energéticas tornaram-se grandes potências. É o caso da Inglaterra do século XVIII, cujo desenvolvimento foi baseado no carvão, dando impulso à Primeira Revolução Industrial, e dos EUA do século XX que, com a descoberta do petróleo no final do século XIX tornou-se a maior potência do planeta, até hoje.

Acontece atualmente uma nova fase em termos de energia, como a que ocorreu com o carvão e o petróleo anteriormente. Uma nova economia de energia está surgindo, dependente da descoberta dos limites que a natureza nos impõe à utilização dos recursos fósseis, seja pela sua reserva ou pela poluição, estabelecendo a necessidade de se produzir energia mais limpa e eficientemente.

A eficiência dos equipamentos que produzem energia, bem como a utilização de outras fontes de energia que não seja o petróleo, dará a este último uma sobrevida maior. Esta sobrevida será tanto em termos de quantidade disponível de reservas, como em relação à estabilidade do preço, retardando a tendência de aumento à medida que essa fonte fóssil se torna cada vez mais escassa nas mãos de poucos países.

As maiores jazidas de petróleo do mundo estão no Oriente Médio, cuja cultura é muito diferente do mundo ocidental, e qualquer desacordo é motivo para instabilidade política, religiosas e econômicas, incluindo as guerras, o que reflete no fornecimento do produto, que por sua vez torna a economia mundial instável.

Embora não tenha sido descoberta nenhuma nova fonte abundante de energia em qualquer região do planeta, como ocorreu no passado com o carvão e o petróleo, estão surgindo diversas melhorias tecnológicas na utilização das fontes energéticas. A tendência é que tenhamos diversas fontes de energia - a maior parte renovável - e diversos equipamentos para a sua geração; e a energia será gerada próxima aos locais de consumo, ao invés de produzir-se eletricidade em grandes centrais de produção de energia, eliminando, assim as perdas que ocorrem na transmissão e, sobretudo o alto custo de construção e manutenção das linhas de transmissão.

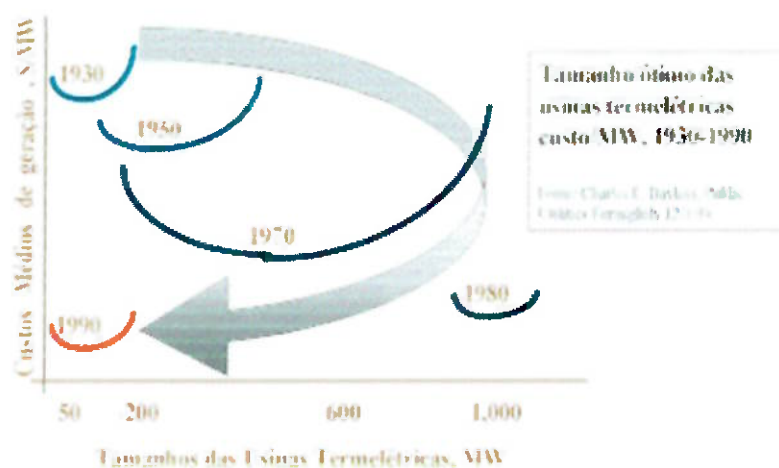


Figura 1 - Tamanho das termoeletricas

As vantagens principais do carvão e do petróleo, durante os períodos em que foram dominantes, foram a sua abundância e baixo custo. Atualmente, além do impacto ambiental, o preço no mercado está aumentando cada vez mais e as suas reservas, no caso do petróleo, estarem extintas por volta da metade do século.

No Brasil, após o “apagão” de 2001, houve uma corrida em busca de novas alternativas energéticas. Pela primeira vez percebeu-se que é necessário o investimento em novas tecnologias, preparando a matriz energética para o futuro. E o ideal é que isso seja feito com alguns anos de antecedência, de forma a atingir rendimentos aceitáveis e custos viáveis.

A geração distribuída chega como uma das melhores alternativas para o atual sistema, pois torna o consumidor independente e auto-suficiente. A Geração Distribuída é uma forma de produção na qual a energia elétrica é gerada junto ou próximo ao consumidor, de forma competitiva, independentemente de sua potência, propriedade ou fonte, usando tecnologias de elevada eficiência. Estando próxima das cargas elétricas, as unidades geradoras, além de suprir a energia local, reduzem os riscos de instabilidade e aumentam a confiabilidade do insumo. Como atualmente só alguns segmentos da economia têm a capacidade de produzir energia elétrica de forma competitiva, a maior parte dos consumidores continuará sendo dependente da concessionária, assim a geração distribuída não compromete o monopólio das grandes geradoras, mas sim, complementa e melhora a disponibilidade de energia.

Uma possibilidade para pequenas instalações comerciais ou residenciais é a utilização de microturbinas de potências entre 5kW e 30kW e/ou células a combustível para geração própria. Estas duas tecnologias estão em evidência nos últimos anos e sua utilização vem sendo largamente estudada. É factível que em um futuro não muito distante tenhamos em cada residência uma unidade geradora individual, suprida pela energia de uma microturbina e/ou de uma célula de combustível.

2 ESTUDO DE VIABILIDADE

Por se tratar apenas do projeto das unidades geradoras de uma central de geração, não será necessário investimento financeiro. Haverá somente investimentos de ordem temporal e de conhecimento técnico. Tornando assim o projeto viável, dentro dos conhecimentos adquiridos necessários e tempo hábil.

Portanto foi realizada uma análise técnico-econômica das tecnologias envolvidas, como segue abaixo.

2.1 Análise Técnica

Espalhadas pelo mundo existem algumas dezenas de instalações de pequeno porte, em fase experimental, de sistemas CHP (*combined heat and power generation*), que combinam células de combustível de 1 a 3 kW com micro turbinas a gás, com capacidade de geração de até 5 kW.

Um problema tecnológico a ser superado é a durabilidade das células a combustível. O mercado requer altíssima confiabilidade e vida útil para ter uma competição satisfatória com as tecnologias de geração de energia existentes. Como exemplo, a maior parte do mercado estacionário (geradores, motores e turbinas a diesel e gás) exige uma vida útil de mais de 40.000 horas, e em sistemas de transporte, uma vida útil de mais de 5.000 horas (170.000 quilômetros), superando questões climáticas severas, suportar condições de partida e desligamento sucessivos, e condições cíclicas transientes. Ainda não se pode dizer que as características de confiabilidade e durabilidade são satisfatórias, embora CaCs em operação em várias regiões no mundo, inclusive no Alaska, tenham demonstrado uma confiabilidade e durabilidade muito boa.

O desenvolvimento de componentes a baixo custo e de alta performance é um fator crítico e importante para o alcance de um sistema global de baixo custo e com boa eficiência para todos os tipos de CaCs e aplicações. Além disso, uma alta eficiência é necessária para ocorrer uma melhora nas dimensões (volume e peso).

No entanto a presença de uma serie de tecnologias diferentes em termos de construção e uso do combustível por parte das células de combustível, já existentes ou em desenvolvimento fornecem o suporte necessário para o desenvolvimento do projeto.

2.2 *Análise Econômica*

A principal barreira para que as células a combustível atinjam em massa o mercado mundial é seu custo, seja qual for a tecnologia ou aplicação. As reduções nos custos devem ocorrer desde as matérias-primas até a manufatura da CaC e seus componentes e a aquisição de componentes. A quantidade a ser reduzida no custo final depende muito da tecnologia e da aplicação.

Para conseguir uma redução na parte de matéria-prima, deve haver uma combinação de materiais alternativos com custos menores, preço por quantidade, e uma redução na quantidade de materiais de alto custo. O custo de manufatura pode ser reduzido parcialmente através de práticas já conhecidas. Entretanto, será necessária a introdução de uma nova tecnologia de fabricação ou desenhos que necessitem processos de manufatura mais simples. Pelo fato de os tamanhos das células e componentes não serem padronizados, os custos são altos para baixos volumes.

Para que as CaCs de pequenas aplicações estacionárias estejam disponíveis comercialmente, investimentos iniciais e financiamentos para projetos de demonstração são essenciais. Enquanto os governos americano e japonês provêm financiamentos para este setor, na Europa, através dos programas da União Européia denominadas de Framework 4, 5 e 6, há uma concentração dos investimentos e financiamentos nas áreas de transporte, infra-estrutura e de grandes aplicações estacionárias. Além disso, a maioria dos projetos de pequenas aplicações estacionárias em demonstração na Europa, com exceção dos projetos em que a empresa Sulzer Hexis está envolvida, estão baseados em tecnologia americana.

A comercialização destas células poderia ser acelerada através de incentivos para financiamentos, tal como preços especiais para energia que seja vendida para a rede elétrica. Em palavras mais claras, uma residência que tenha uma célula a

combustível poderia vender para a rede elétrica por um preço atrativo para ambos, o proprietário e a companhia de eletricidade. A Alemanha é o único país que oferece tais incentivos: o governo federal da Alemanha introduziu um programa que subsidia a eletricidade produzida por sistemas de cogeração de até 2MW. O programa inclui subsídios para a eletricidade produzida por CaCs com fornecimento de até 50kW de 0.0511 Euro por kWh durante 10 anos depois da instalação. O custo médio do preço da eletricidade é de 0.13 Euro por kW.

A Tokyo Gas Corporation, lançou em 8 de Abril de 2005 um sistema de geração de energia elétrica através de células a combustível para uso residencial. A empresa japonesa extrai o hidrogênio a partir da rede de gás natural da cidade de Tóquio o qual é distribuída às casas japonesas. Inicialmente, a Tokyo Gas planeja fazer o leasing de 100 unidades de sistemas de células a combustível. A companhia decidiu fazer o leasing dos sistemas CaCs devido ao custo de aproximadamente 2 milhões de yens (15 mil dólares) cada, se fossem vendidos, e também não se sabe por quanto tempo funcionariam com certeza. O sistema de célula a combustível, projetado para instalação em ambiente fechado, como uma casa, terá capacidade de fornecer até 1kW de energia, cobrindo parte da eletricidade necessária numa casa padrão japonesa, que é de 3 a 5 kW. O calor liberado pela célula também pode ser usado para aquecer a água para banho.

Assim como a Tokyo Gas, outras companhias de equipamentos de geração de energia e também de petróleo e gás estão na busca da comercialização de suas células a combustível, os quais produzem eletricidade a partir da reação química e sem combustão entre o hidrogênio e o oxigênio obtido a partir do ar. Em automóveis, a tecnologia CaC já está sendo comercializada.

Devido ao alto custo e riscos envolvidos nos desafios a serem vencidos, não se pode esperar que uma empresa sozinha ou consórcios de indústrias parceiras façam investimentos suficientes para, por exemplo, criar uma infra-estrutura para a tecnologia do hidrogênio.

Os esforços dedicados ao desenvolvimento tecnológico precisam estar focados com maior atenção no avanço de materiais, técnicas de manufatura, e outros detalhes que levem à diminuição dos custos, aumento de vida útil, e melhora na confiabilidade dos sistemas CaCs. Estas atividades são necessárias não somente na

célula a combustível em particular (catalisadores, membranas e eletrólitos), mas também no balanço dos subsistemas da planta de célula a combustível, como os processadores de combustível, armazenamento de hidrogênio, eletrônica de potência (controle e monitoramento), e trocadores de calor. Mais ênfase também deve ser dada à produção de hidrogênio e infra-estrutura de distribuição, legislação e padrões de desenvolvimento, além da educação, mostrando à população os benefícios, mitos e cuidados com relação ao hidrogênio.

Programas de cooperação público-privadas, onde o governo e indústrias/universidades trabalham juntas numa forma colaborativa, ajudam consideravelmente a superação das barreiras existentes para se atingir a comercialização e benefícios com a tecnologia. O governo Federal deve incentivar e ter papel forte em determinadas áreas, como em pesquisa e desenvolvimento, para chegarmos mais facilmente à comercialização.

A cooperação é a melhor estratégia para acelerar o uso das CaCs estacionárias para geração de energia em residências e centros comerciais, como parte do conceito de energia distribuída. Na verdade, seja em qual for o país, há necessidade de uma constante e forte cooperação em programas de *P&D*, como as existentes no EUA como o SECA (*Solid State Energy Conversion Alliance*), uma parceria entre o governo americano, indústria e a comunidade científica, com o objetivo de reduzir os custos das tecnologias, e aumentar a durabilidade e confiabilidade.

No Brasil, na Portaria MCT nº. 731, de 14 de novembro de 2002, foi lançado, pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), o “Programa Brasileiro de Sistemas Células a Combustível” (PROCaC), com o objetivo de organizar e promover ações de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, por intermédio de projetos associados entre entidades de pesquisa e a iniciativa privada. O Programa PROCaC está previsto no Plano de Investimentos do Fundo Setorial de Energia Elétrica (CT-ENERG/MCT) e, portanto, no momento será o principal agente financiador. Mas no atual governo do Presidente Luiz Inácio Lula da Silva, o programa ainda não decolou, pois está sendo reavaliado.

Há também agências de fomento como o MCT/FINEP, MCT/CNPq, a ANEEL, a ANP, e fundações estaduais de amparo à pesquisa como a FAPESP, investindo em projetos de células a combustível e tecnologia do hidrogênio com

universidades e empresas privadas. Há também empresas públicas como concessionárias de energia, como a COPEL, CELESC e a CEMIG, que estão em parceria com institutos de pesquisa, universidades e iniciativas privadas.

Nos EUA, há vários programas entre federal e estadual. O Departamento de Energia dos EUA (U.S.DOE), tem beneficiado programas de P&D e demonstração de sistemas de hidrogênio e células a combustível. Para o ano de 2004, foram destinados para projetos em produção, distribuição e armazenamento de hidrogênio, 205 milhões de dólares. Na Europa, a União Européia tem investido em todos os países juntamente com a Associação Francesa de Hidrogênio.

A maioria das parcerias que está ocorrendo em vários países é para analisar veículos em condições de operação reais para se buscar informações de custo, performance, confiabilidade e assim poder auxiliar outras pesquisas no futuro. A transição de uma infra-estrutura atual para a baseada na produção e distribuição de hidrogênio também está sendo um ponto de interesse dos programas. Um programa de cooperação público-privada para avaliar e consolidar uma infra-estrutura de comercialização do hidrogênio ajudaria a desenvolver e demonstrar a eficiência dos processos de produção e distribuição do hidrogênio, assim como os benefícios econômicos e ambientais.

Na Califórnia, estado americano tomado como referência para a maioria dos programas de células a combustível no Mundo, o programa “Califórnia Fuel Cell Partnership (CaFCP)”, iniciado em Abril de 1999, inclui montadoras de automóveis (DaimlerChrysler, General Motors, Ford, Honda, Hyundai, Nissan, Toyota e Volkswagen), fornecedores de energia (BP, ExxonMobil, ChevronTexaco, Shell Hydrogen), companhias de desenvolvimento de células a combustível (Ballard Power Systems e UTC Fuel Cells), e instituições do governo. Parte dessas ações se deve muito à lei “California Air Resources Board (CARB)”, que exige uma qualidade mínima no ar. Por exemplo, a partir do ano 2008, 15% dos ônibus comprados terão que ser de emissão zero de poluição.

Na Alemanha, a organização “VES - Verkehrswirtschaftliche Energie Strategie” (Transporte Estratégico de Energia), fundada por grandes montadoras de automóveis como a Volkswagen, BMW, DaimlerChrysler, MAN e a General Motors Europe (OPEL), e as companhias de energia como a ARAL, BP, RWE, Shell e

TotalFinaElf, com o suporte do governo alemão, planeja desenvolver uma estratégia de médio a longo prazo para implementar uma infra-estrutura para combustíveis alternativos.

No Brasil, mais especificamente em São Paulo, a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (Emtu) desenvolve desde 2000, o projeto Estratégia Energético-Ambiental: Ônibus com Célula a Combustível de Hidrogênio. Com o apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (Pnud), a Fase II do projeto começou em 2001. Ela consiste na aquisição, operação e manutenção de oito ônibus com célula a combustível de hidrogênio, além de uma estação de produção desse gás e abastecimento dos ônibus, o acompanhamento e verificação do desempenho desses veículos.

Programa parecido vem sendo implementado em vários países europeus pela Comunidade Européia através do programa CUTE (Clean Urban Technology for Europe). O programa pretende colocar ônibus movidos por CaCs em 10 cidades Européias durante dois anos para avaliação.

Existem, portanto, por todo o mundo, programas de incentivo ao desenvolvimento das células de combustível, tornando assim possível o projeto de uma micro unidade de produção de energia e calor doméstica utilizando esta tecnologia.

No aspecto ambiental encontramos algumas das principais vantagens do uso de instalações que utilizam células de combustível. Idealmente, o resíduo dos processos químicos ocorridos dentro destas na geração de energia é água potável. Estas células, com uma tecnologia bastante inferior a que encontramos hoje, já foram usadas pela NASA em seus ônibus espaciais, fornecendo energia para pequenas funções no interior da nave ao mesmo tempo em que servia como fonte de água para a tripulação. Em tempos de controle rígido da poluição e busca de alternativas ecologicamente viáveis para a geração de energia e substituição dos combustíveis derivados do petróleo, a célula de combustível surge como uma das principais candidatas a base energética do planeta nos próximos anos.

3 ESCOPO DO PROJETO

O objetivo deste trabalho consiste em projetar uma microturbina que opere com uma célula de combustível de forma a produzir energia elétrica e térmica, na forma de frio ou calor, suprimindo as necessidades de uma pequena instalação (residência, comércio).

O projeto limita-se apenas ao projeto básico da turbina e pesquisa e seleção das células de combustível existentes no mercado ou em desenvolvimento. Será selecionado também o ciclo no qual o sistema operará, mas os detalhes deste, tais como dimensionamento e características de componentes, não serão tratados no presente estudo.

O projeto da microturbina será dividido em duas linhas: térmica e mecânica. Na parte térmica serão definidas as condições de contorno do sistema, análise dos gases envolvidos, cálculo de eficiência, triângulos de velocidades, perfil de paletas e ângulos de entrada e saída dos bocais. A linha mecânica será responsável pelo estudo do comportamento da paletas sob operação e seleção do material adequado.

4 CICLOS TERMODINÂMICOS

4.1 Brayton

O ciclo padrão a ar Brayton é o ciclo ideal para a turbina a gás simples. Ele possui quatro processos básicos que ocorrem em regime permanente. Dois são processos isobáricos e dois isoentrópicos. Abaixo temos o diagrama esquemático de uma turbina a gás simples de ciclo aberto, um processo de combustão, e de ciclo fechado, dois processos de transferência de calor.

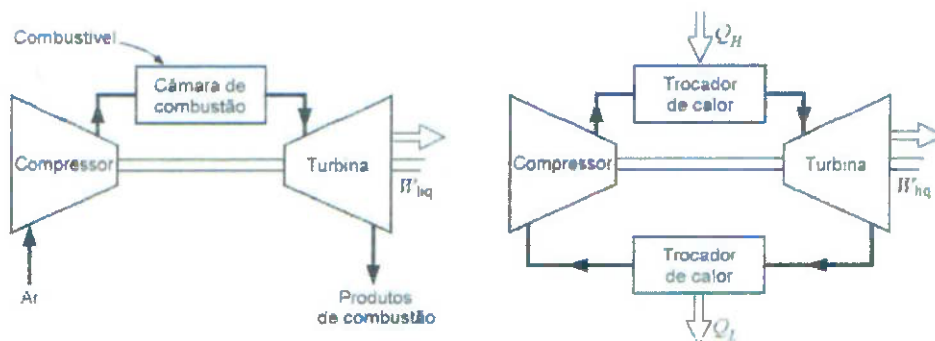


Figura 2 - Ciclo Brayton (a) aberto, (b) fechado

$$\eta_{térmico} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

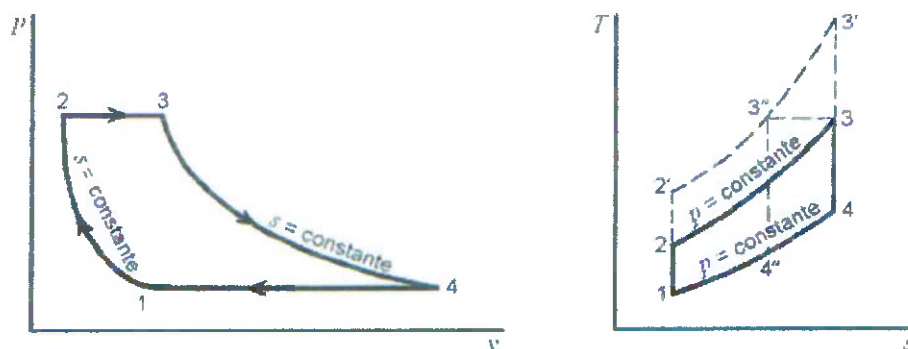


Figura 3 - Estados termodinâmicos no Ciclo Brayton simples

4.2 Brayton com Regenerador

Ao adicionarmos um regenerador ao ciclo padrão Brayton, podemos melhorar o rendimento do ciclo. Como no esquema abaixo, os gases exaustos da turbina aquecem os gases a altas pressões que deixam o compressor.

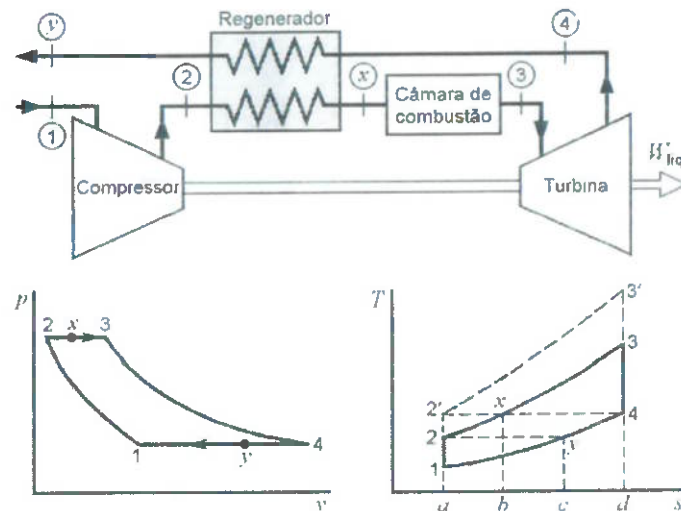


Figura 4 - Ciclo Regenerativo ideal

O rendimento do ciclo pode ser dado por:

$$\eta_{térmico} = \frac{w_{liq}}{q_h}$$

Onde as componentes w e q , representam:

$$q_h = h_3 - h_2 = c_p \cdot (T_3 - T_2)$$

$$w_t = h_3 - h_4 = c_p \cdot (T_3 - T_4)$$

Admitindo que no caso ideal não haja perdas no trocador ($T_4 = T_{2'}$):

$$q_h = w_t$$

$$\therefore \eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{w_c}{q_h}$$

Relacionando as pressões, temperaturas e a constante dos gases k , teremos:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

O rendimento térmico de um ciclo ideal com regeneração depende das relações de pressão e temperatura. Podemos perceber que o aumento da relação de pressões diminui o rendimento, efeito contrário ao ciclo Brayton simples.

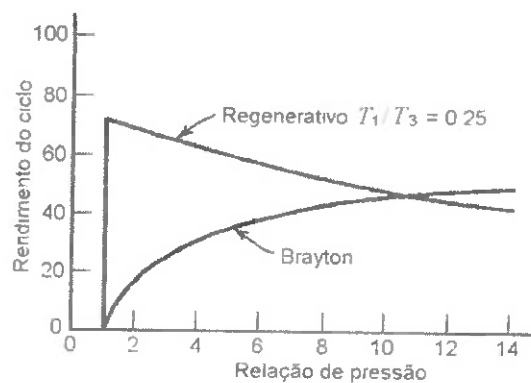


Figura 5 - Ciclo regenerativo ideal x ciclo padrão simples

5 MICROTURBINAS

Turbina a gás é uma das opções que vem sendo estudada para soluções de geração de energia elétrica e térmica. Seu funcionamento é baseado no ciclo-padrão a ar Brayton.

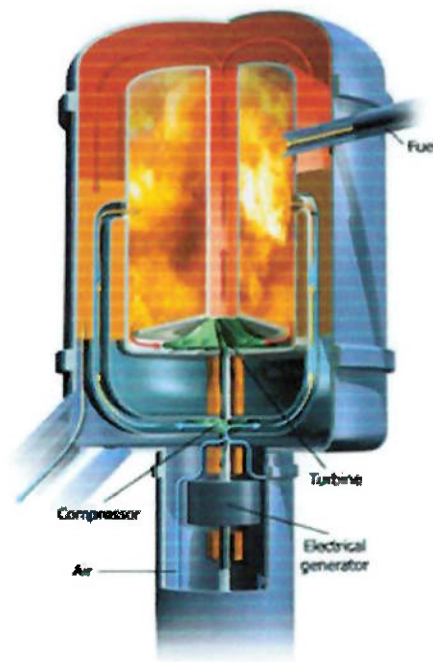


Figura 6 - Microturbina em operação

Ar é admitido e comprimido no compressor. O fluxo então se dirige para a câmara de combustão, onde combustível é adicionado à mistura e ocorre a combustão. À pressões e temperaturas elevadas, o fluxo se dirige à turbina.

Na turbina o fluxo é desviado nas paletas fixas (bocais) e então se dirigem às paletas móveis. Essa mudança de direção do fluxo exerce uma força sobre as paletas móveis. A somatória desta força faz com o eixo rotacione, produzindo potência.

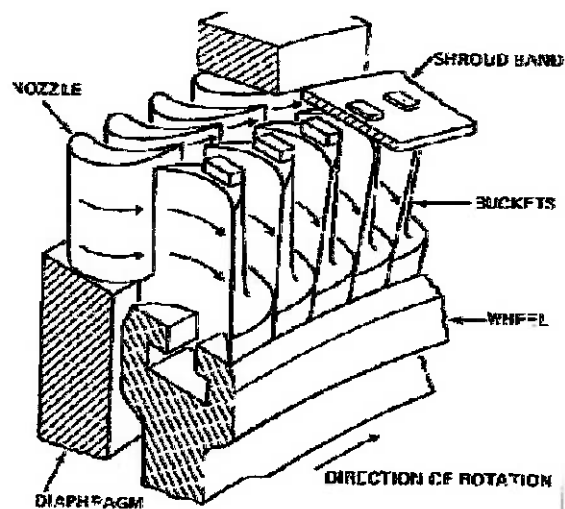


Figura 7 - Canais de escoamento entre as paletas fixas e móveis

A maior parcela desta potência gerada é utilizada no compressor, uma pequena parte vai para os gases de combustão e a energia resultante gera trabalho.

5.1 Classificação

As turbinas podem ser classificadas de acordo com seu funcionamento.

O escoamento pode ser axial, quando ocorrer perpendicularmente ao eixo, ou radial, quando paralelo ao eixo.

As pressões de saída são classificadas pelos valores de P_s . São chamadas de “contra-pressão” se tiverem pressão maior que o ambiente. “Escape ao ar livre” se P_s for igual à atmosférica. E de “condensação” para casos onde $P_s < P_{atm}$.

Serão turbinas de ação se houver variação de pressão, temperatura e entalpia apenas nas paletas fixas. E de reação se a variação das propriedades do gás (p, h, T) ocorrer em ambas paletas, fixas e móveis.

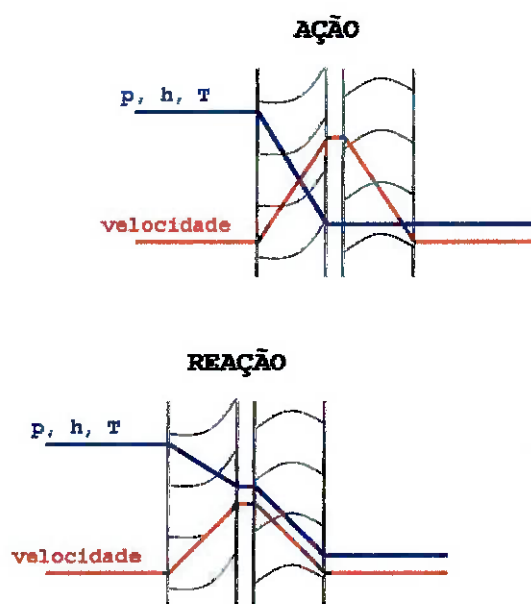


Figura 8 - Variação de pressão, entalpia e temperatura através das paletas.

As turbinas podem possuir também vários estágios de compressão e expansão, assim como ter extrações intermediárias a diferentes pressões.



Figura 9 - Turbina axial de simples estágio

O grau de reação de uma turbina é definido de acordo com a redução de entalpia nas paletas móveis.

$$GR = \frac{h_1 - h_2}{h_0 - h_2}$$

Estágios de ação são usualmente os primeiros estágios de uma turbina, pois imprimem menores velocidades às paletas, sendo menos robustos em relação aos de reação. Este fato faz com que turbinas de ação tenham menor custo inicial, porém turbinas de reação têm custos operacionais reduzidos.

Para o caso de microturbinas com um estágio e pequenas relações de pressões (entre 1:1 e 4:1), este será de ação. Assim evitam-se maiores perdas no escoamento.

5.2 Dimensionamento

Ao analisarmos o escoamento do fluido entre duas paletas verificamos os seguintes triângulos de velocidades:

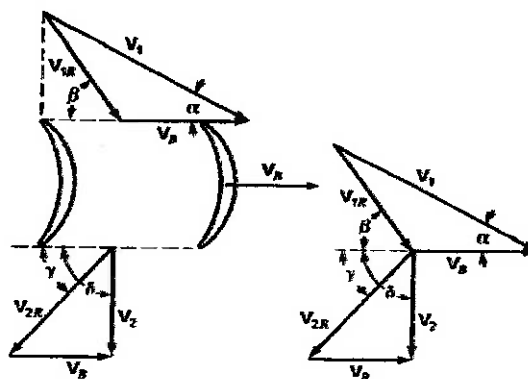


Figura 10 - Triângulos de velocidades

Esses vetores representam as velocidades absoluta, relativa e resultante do escoamento. Velocidade absoluta é aquela medida pelo observador estacionário. A velocidade relativa é medida pelo observador que se move junto a paleta.

O vetor V_1 representa a velocidade absoluta do fluido que vem dos bocais, V_{1R} é a velocidade relativa, e α e β são, respectivamente, os ângulos de entrada destas velocidades. Temos, analogamente, para a saída do fluido as velocidades V_2 , V_{2R} , e ângulos de saída δ e γ .

Da 1ª Lei da Termodinâmica, temos:

$$\dot{Q}_{VC} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) = \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right)$$

$$\dot{m} \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} \right) = \dot{W}_{VC} + \dot{m} \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} \right)$$

$$h_e + \frac{V_e^2}{2} = w + h_s + \frac{V_s^2}{2}$$

Para simplificar o equacionamento, adotaremos a denominação 0,1,2, sendo 0 referente às condições no bocal, 1 entre o bocal e paletas (transição) e 2 a região das paletas. Assim o equacionamento no bocal (0-1) fica:

$$h_0 + \frac{V_0^2}{2} = h_1 + \frac{V_1^2}{2} \Rightarrow V_1^2 = 2(h_0 - h_1) \quad (1)$$

Nas paletas móveis (observador externo):

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} + w_T \quad (2)$$

Nas paletas, como observador estacionário:

$$h_1 + \frac{V_{1R}^2}{2} = h_2 + \frac{V_{2R}^2}{2} + 0 \quad (3)$$

Considerando que a velocidade de entrada é nula ($V_0=0$) e de (2) e (3) temos que o trabalho resultante é dado por:

$$w_T = \frac{(V_1^2 - V_{1R}^2) - (V_2^2 - V_{2R}^2)}{2}$$

A eficiência do processo é definida como:

$$\eta_{est} = \frac{w_T}{(h_0 - h_2)} = \frac{h_0 - h_2 - \frac{V_2^2}{2}}{(h_0 - h_2)} = 1 - \frac{V_2^2}{2(h_0 - h_2)}$$

Sendo a velocidade característica do estágio:

$$V_C = \sqrt{2(h_0 - h_2)}$$

$$\eta_{est} = 1 - \frac{V_2^2}{V_C^2}$$

5.3 Características Gerais

Microturbinas geram potências de 1kW a 400kW. Calor é rejeitado pelos gases de exaustão a temperaturas de 150°C a 200°C, podendo ser aproveitados de diversas formas térmicas.

Podem operar com diversos tipos de combustíveis: metano, gás natural, biogás, gasolina, querosene, álcool (etanol). A alta tecnologia empregada na combustão, baixa temperatura de admissão e reduzida relação ar-combustível resultam em valores de NOx menores que 10 ppm e pequenas quantidades de CO e hidrocarbonetos provenientes da queima incompleta, especialmente quando o combustível utilizado é o gás natural.

Por operarem com menores quantidades de combustível e menor temperatura de combustão, a eficiência em carga parcial é menor se comparada à carga plena. Sua compacta montagem e peso reduzido auxiliam a instalação e facilitam sua locomoção.

Vantagens

- Turbinas tendem a ser mais compactas, isto é, tem uma maior razão potência/peso;
- Partida e parada mais rápidas;
- Projeto e manutenção mais simples;
- Menor consumo de matéria prima na fabricação;

- Menor custo;
- (Quase) não requer água de resfriamento.

Desvantagens:

- Menor potência específica;
- Menor eficiência;
- Menor vida útil (de 40.000 a 80.000 horas);
- Maior sensibilidade à qualidade do combustível.

6 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

6.1 *Introdução*

A célula de combustível é um dispositivo que converte energia química diretamente em eletricidade e calor. Podem ser comparadas com baterias que, quando providas de combustível e ar, trabalham intermitentemente, e mais eficientemente que tecnologias baseadas na combustão convencional, com emissões de poluentes reduzidas – nulas para quando hidrogênio puro é utilizado.

As células a combustível não são apenas curiosidades presentes em laboratórios. Apesar de ainda estarem em desenvolvimento para serem usadas, por exemplo, em MP3 *players*, *laptops* e na geração de energia em residências, indústrias e automóveis, elas já fazem parte de nosso dia a dia. Varias comunidades no Canadá, Alemanha, Espanha, China, Austrália, EUA, entre outros países, já utilizam ônibus movidos por células de combustível. Além disso, as células a combustível já fornecem energia limpa e eficiente, em nível experimental, a fazendas, hospitais, shoppings, indústrias e automóveis em todo o mundo, inclusive no Brasil, como é o caso de Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro.



Figura 11 - Célula a Combustível (*Fuel Cell*) a hidrogênio da GM fornecendo eletricidade para a fábrica da Dow Chemical no Texas, EUA

As diferentes tecnologias de célula a combustível têm basicamente o mesmo princípio de funcionamento. São compostas por dois eletrodos porosos, que permitem a passagem dos gases até o eletrólito: um negativo (ânodo) e um positivo (cátodo), cada um revestido num dos lados por uma camada de catalisador de platina ou níquel, que aceleram as reações e quebram as moléculas de hidrogênio, e separados por um eletrólito, material impermeável que permite movimento aos íons positivos – prótons – entre os eletrodos. A figura 12 mostra o esquema básico de uma célula de combustível genérica.

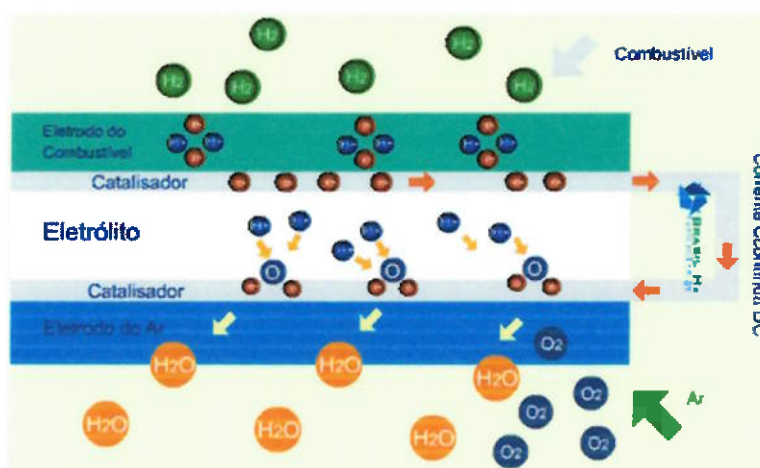


Figura 12 - Diagrama do funcionamento básico de uma célula a combustível

6.2 *História das células de combustível*

Apesar da alta tecnologia empregada para o seu funcionamento, as células a combustível são conhecidas pela ciência há mais de 150 anos. Embora tenham sido consideradas uma grande curiosidade do século XIX, elas foram alvos de intensas pesquisas principalmente durante a Segunda Guerra Mundial.

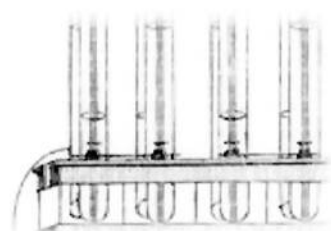


Figura 13 - Célula de Grove

A primeira CaC foi construída em 1801 por Humphrey Davy, que realizou estudos em eletroquímica usando carbono e ácido nítrico. Mas quem é considerado o “pai” das células a combustível é o advogado e cientista inglês William Grove (1811–1896). A “Célula de Grove”, como era chamada, usava um eletrodo de platina imerso em ácido nítrico e um eletrodo de zinco imerso em sulfato de zinco para gerar uma corrente de 12 amperes e uma tensão de 1.8 volts.

Grove descobriu que colocando dois eletrodos de platina com cada lado de cada eletrodo imerso num tubo contendo ácido sulfúrico diluído, e os outros dois lados separadamente conectados em tubos fechados com oxigênio e hidrogênio, uma corrente contínua circularia entre os eletrodos. Os tubos isolados e fechados produziam água e também gases, e ele notou que o nível de água aumentou em ambos os tubos onde a corrente elétrica passou.

Em seguida, Grove construiu uma fonte de energia usando vinte e seis células em série e foi o primeiro a notar e explicitar a dificuldade de produzir altas densidades de corrente elétrica em uma pilha a combustível (várias células a combustível conectadas em série), que utiliza gases como reagentes. O problema que enfrentou na época ainda está sendo estudado atualmente por pesquisadores da área. O seu empenho neste problema é demonstrado pela seguinte citação:

“Como a ação química ou catalítica só poderia acontecer com uma placa de platina comum na linha ou marca de água onde o líquido, o gás e a platina se encontram, há dificuldade em obter um dispositivo capaz de oferecer uma superfície notável de ação”.

Em 1800, os cientistas britânicos William Nicholson e Anthony Carlisle descreveram o processo de usar eletricidade para decompor a água em hidrogênio e oxigênio. Mas combinar os gases para produzir eletricidade e água foi a grande descoberta de William Grove. Logo depois ele chamou o dispositivo desta experiência de “bateria a gás” – a primeira célula a combustível.

Em 1889, O químico Ludvig Mond e seu assistente Carl Langer, descreveram a sua experiência com a CaC a hidrogênio e oxigênio. A experiência produziu uma corrente elétrica de 6 Amperes – densidade de corrente de 2,8 a 3,5 mA/cm² - numa pequena área de eletrodo de 700 cm² produzindo uma tensão de 0,73 volts. A célula a combustível de Mond e Langer usava 0,35 g de finos eletrodos de platina porosos e um eletrólito de ácido sulfúrico. Eles observaram dificuldades utilizando eletrólitos líquidos, pois somente obtinham sucesso utilizando eletrólitos em forma sólida.

Já o cientista e fundador do campo da físico-química, Friedrich Wilhelm Ostwald, contribuiu com muitas das teorias sobre as células a combustível. Em 1893, ele determinou experimentalmente as funções dos vários componentes de uma CaC: eletrodos, eletrólito, agentes de oxidação e redução, ânions e cátions.

William Grove especulava que as reações que ocorriam na sua bateria de gás ocorriam nos pontos de contato entre eletrodos, gás e eletrólito, mas não sabia explicar além disso. Já Ostwald, que desenvolveu a relação entre as propriedades físicas e reações químicas, resolveu a incógnita do funcionamento da célula de gás de William Grove. Sua pesquisa sobre o funcionamento químico das células foi a base de trabalho para as pesquisas sobre CaCs nos anos seguintes por outros pesquisadores.

Na primeira metade do século XX, o cientista suíço Emil Baur, juntamente com seus estudantes, conduziu uma grande quantidade de pesquisas com vários tipos de tecnologias de células a combustível. Parte do trabalho de Emil Baur incluiu dispositivos de alta temperatura (utilizando prata fundida como eletrólito) e um eletrólito sólido de argila e óxidos metálicos.

No final dos anos 30, Francis Thomas Bacon começou pesquisando CaCs de eletrólito alcalino (AFC- *Alkaline Fuel Cell*) de alta pressão, que parecia oferecer resultados viáveis. Em 1939, ele construiu uma célula que usava eletrodos de níquel e operava numa pressão de até 220 atm numa temperatura de 100 °C. Durante a Segunda Guerra Mundial, Bacon trabalhou no desenvolvimento de células que poderiam ser usadas nos submarinos da marinha inglesa, e em 1958 demonstrou uma CaC alcalina usando um dispositivo com eletrodo de 10 polegadas (25,4 cm) de diâmetro.

Embora fossem extremamente caras, as células a combustível de Francis Bacon provaram ser suficientemente confiáveis para atrair a atenção da Pratt & Whitney. Esta empresa se uniu com a Energy Conversion, que tinha Francis Bacon como consultor e licenciou o trabalho dele para ser utilizado no desenvolvimento de um sistema de geração de energia para as missões espaciais Gemini e Apollo da Nasa. Este sistema era constituído por três unidades de pilhas a combustível alcalinas e operavam a pressões de 3,5 atm. Na sequência do desenvolvimento tecnológico, a temperatura das células foi aumentada para 200 °C, e produziam potência de 1,4 kW cada. A tensão desenvolvida variava entre 27 e 31 volts, com uma vida útil limitada em 400 horas de operação, devido principalmente à corrosão do cátodo (eletrodo). Após as missões Apollo, a construção de novas células a combustível alcalinas operando com altas pressões, foi paralisada e tornou claro, levando em conta esse tipo de células, que sua comercialização tinha como principais obstáculos o alto custo e a pequena vida útil.

Mas atualmente, as CaCs apresentam uma evolução em durabilidade, diminuição dos custos e são uma das principais soluções energéticas ambientalmente amigáveis. É só uma questão de tempo para que as células a combustível estejam fazendo parte da vida das pessoas como ocorreu com os computadores pessoais.

6.3 Componentes

O conceito sobre o funcionamento de uma célula a combustível é relativamente simples. Hidrogênio é fornecido a um catalisador e este quebra a molécula de hidrogênio em um íon positivo e um elétron. O elétron circula por um circuito externo, e o íon positivo (próton) atravessa totalmente uma membrana,

recombinando com o elétron e mais a molécula de oxigênio (O_2) retirada do ar. Nesta combinação, forma-se vapor d'água. Um sistema de célula a combustível é composto de diversos componentes, muitos deles complexos e caros. Um pesquisador sozinho não consegue montar ou aperfeiçoar uma célula a combustível, pois é preciso ter conhecimento em diversas disciplinas, fazendo-se necessário especialistas tais como físicos, químicos, engenheiros eletricitas, mecânicos, agrícolas, químicos, técnicos em química, técnicos em oficina entre outros profissionais.

Como pôde ser observada no desenho ilustrativo, a célula a combustível é composta basicamente de placas elétricas de difusão de gases, eletrodos, catalisadores, membrana ou eletrólito, circuito externo, sensores de controle e monitoramento e, algumas vezes, um reformador para extrair o hidrogênio de um combustível.

Placas Bipolares: São placas de canais de fluxo de combustível e oxidante em ambos os lados do conjunto eletrodo-catalisador-eletrólito (MEA, *Membrane Electrode Assembly*). Cada placa de canais de fluxo contém um canal de gás simples num desenho de serpentina que maximiza o contato do gás com o MEA – conjunto eletrodo-catalisador-eletrólito. O desenho dos canais de fluxo de gases é fundamental para uma geração uniforme de potência, estabilidade da célula e correto gerenciamento do produto água. Diferentes tipos de desenhos para estes canais estão ligados aos vários tipos de aplicações

Cada placa deve ser eletricamente condutiva de forma que a corrente liberada durante as reações eletroquímicas flua de célula em célula e então até a placa onde a energia de toda a pilha a combustível (conjunto de células a combustível unitárias) flui para a carga. As placas são geralmente feitas de grafite aonde os canais de fluxo de gases são desenhados. A grafite é o material preferido devido à sua excelente condutividade, baixa contaminação e relativo baixo custo. Placas de refrigeração colocadas entre cada célula a combustível, apresentam desenhos e construções similares às placas bipolares. As placas de fluxo de gases e de refrigeração incorporam entradas de ar e gás para distribuir igualmente o combustível (hidrogênio), o oxidante (oxigênio) e o líquido de arrefecimento que entra e sai da pilha a combustível. Os isolamentos entre as placas de grafite impossibilitam que

estes gases se misturem. Os canais de fluxo geralmente têm de 0.5 a 2 milímetros de largura e até 1 milímetro de profundidade, formado na superfície da placa.

Eletrodos: Os eletrodos são as interfaces entre os gases reagentes e o eletrólito; deve permitir a difusão do hidrogênio e do oxigênio, proporcionar uma reação na superfície onde possam entrar em contato com o eletrólito, ter condutividade aos elétrons livres (íons negativos) que fluem do ânodo para o cátodo, e poder ser construído com materiais compatíveis. O papel de fibra de carbono é usualmente utilizado para esta função, pois é poroso, hidrofóbico (não fica úmido), condutivo e não corrosivo. O material do eletrodo é geralmente muito fino para maximizar o transporte de gás e água. Geralmente é feito de grafite em forma de placa plana, tem alguns problemas como ser quebradiço e pesado. Alguns pesquisadores testaram folhas finíssimas de aço, mas observaram que com o tempo ele dissolvia no conjunto membrana-eletrodo, especialmente no ânodo.

Catalisadores: responsável pela quebra da molécula de hidrogênio em H^+ e H^- ; adicionado à superfície de cada eletrodo fazendo o contato com o eletrólito de forma a aumentar a taxa de reações químicas. O catalisador não é consumido no processo. A Platina geralmente é utilizada como catalisador devido a sua alta atividade eletro-catalisadora, sua alta estabilidade e condutividade elétrica. O problema é que a platina é muito cara e com tendências de aumentar o seu custo inclusive, tendo uma participação significativa no custo final de uma célula a combustível, por isso, os pesquisadores procuram minimizar a quantidade de platina usada sem perder eficiência no processo. Geralmente a platina é utilizada em células a combustível de temperaturas de operação baixa, entre $40^{\circ}C$ e $200^{\circ}C$. Nas células a combustível em temperaturas mais altas, entre $600^{\circ}C$ e $1000^{\circ}C$, não há necessidade de um excelente catalisador, pois a alta temperatura já ativa um grande número de reações. Desta forma, o Níquel pode ser usado como um catalisador eficiente e de baixo custo nestas altas temperaturas.

Membrana ou Eletrólito: Juntamente com o eletrodo, o eletrólito é o coração de uma célula a combustível. Possui a propriedade de deixar passar somente os íons positivos – prótons. Normalmente, a temperatura de operação das células está ligada ao tipo de eletrólito utilizado, cada uma tendo vantagens e desvantagens,

dependendo da aplicação e combustíveis que podem utilizar. O eletrólito alcalino, por exemplo, precisa que o oxigênio e o hidrogênio estejam puros, sem a presença de outros compostos para que não ocorra corrosão.

Circuito Externo: O circuito externo serve para conduzir os elétrons – íons negativos – resultantes da quebra da molécula de hidrogênio. O fluxo de elétrons é conhecido como corrente elétrica, e esta corrente elétrica é a energia elétrica gerada pela célula a combustível.

Além dos componentes acima mencionados, utilizam-se sensores e componentes eletrônicos para monitorar e controlar a célula a combustível. Muitas vezes, também há necessidade de umidificadores para os gases reagentes para que ocorra uma melhor condução dos íons dentro da célula.

Reformador: A função principal do reformador é extrair o hidrogênio de um combustível ou fonte de hidrogênio, pois algumas substâncias presentes em combustíveis como o gás natural podem ser nocivas aos componentes de uma célula a combustível, comprometendo a eficiência e a vida útil.

6.4 *Tipos de tecnologia*

A classificação das células a combustível está geralmente de acordo com a natureza do eletrólito empregado. O tipo de eletrólito geralmente determina a temperatura de operação, o qual varia bastante entre as tecnologias. Cada tipo de tecnologia requer materiais e combustíveis particulares, e por causa de seus materiais e diferentes temperaturas de operação, têm benefícios, aplicações e desafios variando, mas todos compartilham do potencial para a eficiência elétrica elevada e emissões baixas, já que se operam em temperaturas suficientemente baixas não produzem essencialmente nenhum NO_x, e por não tolerar enxofre e usar combustível desulfurizado, não produz nenhum SO_x.

No Brasil, a tecnologia mais empregada para estudos de pesquisa é a PEMFC. Há também pesquisas direcionadas ao uso das SOFC's e das DEFC's (Etanol Direto) utilizando a tecnologia PEMFC.



Figura 14 - Célula a combustível da Cemig

As principais empresas e institutos de pesquisa que estão com projetos sobre a tecnologia PEMFC no Brasil são a Unitech/CEMIG, o COPEL, CENPES (Petrobrás), IPEN, Electrocel, USP/São Carlos e Univali/Celesc. Na pesquisa da tecnologia SOFC estão o IPEN, a COPPE/UFRJ/CTPetro/Petrobrás e a Universidade Federal da Bahia (UFBA).

Na pesquisa da tecnologia PAFC estão o Lactec/COPEL e o CENPES/Petrobrás. Ambas investiram na aquisição das plantas de célula a combustível da UTC Fuel Cells para avaliar e pesquisar esta tecnologia. Três células PAFC estão instaladas em Curitiba (Lactec/Copel), sendo que a terceira ainda entrará em operação no hospital Erasto Gaertner em Curitiba. No Rio de Janeiro, uma quarta célula a combustível desta tecnologia foi instalada no Cenpes/UFRJ pela Petrobrás.

Há também estudos teóricos sobre utilização do etanol em Células de combustível de Carbonato Fundido (MCFC), como por exemplo, na Unesp de Guaratinguetá, no Estado de São Paulo.

Abaixo, está apresentada uma tabela resumo das principais características destas tecnologias.

Tabela 1 - Comparação entre as células a combustível

Sigla	Eletrólito	Temp. Operação	Eficiência	Potência	Aplicações
AFC	Hidróxido de Potássio	60-90°C	45%-60%	Até 20kW	Submarinos, naves espaciais.
DMFC	Membrana Polimérica	60-130°C	40%	<10kW	Portáteis

MCFC	Carbonato Fundido Líquido	600-800°C	45-60%	>1MW	Estações de Energia
PAFC	Ácido Fosfórico Líquido	160-220°C	36-38%	>50kW	Estações de Energia
PEMFC	Membrana de Troca de Prótons	70-120°C	40-60%	Até 250kW	Carros, Ônibus, energia residencial.
SOFC	Cerâmica	800-1000°C	50-65%	Até 1MW	Pequenas Estações de Energia
DEFC	Membrana Polimérica	60-130°C	20%	<10kW	Estações de Energia

6.4.1 Célula a Combustível Alcalina – AFC (*Alkaline Fuel Cell*)

A célula a combustível alcalina é uma das tecnologias mais avançadas e já vem sendo utilizada há muito tempo para fornecer energia e água para consumo dos astronautas nas missões espaciais da NASA, mas apresenta algumas desvantagens que limitam a sua aplicação em várias áreas. Estas células utilizam uma solução aquosa e alcalina de hidróxido de potássio (KOH) como eletrólito. Podem usar uma variedade de catalisadores metálicos não-preciosos no ânodo e no cátodo (Níquel). A temperatura de operação destas células está entre 100°C e 250°C. Entretanto, as células alcalinas mais modernas estão operando em temperaturas mais baixas, entre 23°C e 70°C. Possuem pequeno volume e peso. A potência típica de saída das células alcalinas está entre 300 watts a 5kW. Uma célula apenas produz cerca de 1,1 volts a 1,2 volts de tensão contínua.

Esta relativamente alta temperatura – embora bem menor que outras tecnologias como a SOFC e MCFC – deve-se principalmente à alta taxa de reações químicas que ocorrem neste tipo de célula. Se a concentração de hidróxido de potássio for alta, a temperatura também será, e vice-versa. Esta tecnologia também apresenta uma alta eficiência - cerca de 60% nas aplicações espaciais.

O eletrólito de uma célula de combustível alcalina pode ser móvel ou imóvel. As células que utilizam eletrólito móvel utilizam um eletrólito fluido que constantemente circula entre os eletrodos, e pode apresentar problemas de vazamento. A água e o calor resultantes do processo diluem e aquecem o eletrólito líquido, mas são removidos da célula à medida que o eletrólito circula. As de eletrólito imóvel usam um que consiste em uma pasta fina retida por forças capilares dentro de uma matriz porosa tal como o asbesto (amianto). A pasta provê um isolamento dos gases nos lados das células. A água resultante do processo evapora

junto ao gás de hidrogênio no ânodo e entra em condensação. O calor que sobra é removido através de convecção forçada utilizando um líquido resfriado.

A desvantagem da célula a combustível alcalina é ela ser facilmente contaminada pelo dióxido de carbono (CO_2), formando com o eletrólito carbonato de potássio (K_2CO_3). Até uma pequena quantidade de CO_2 no ar (cerca de 370ppm) pode afetar a operação da célula, fazendo com que seja necessária uma purificação do hidrogênio e do oxigênio utilizados, o que aumenta os custos. Esta sensibilidade à contaminação afeta a vida útil da célula de combustível alcalina.

Para aplicações militares, espaciais e em submarinos, onde o oxigênio não pode ser obtido do ar, o custo para se ter oxigênio e hidrogênio puros não é tão importante. Entretanto, para competir efetivamente em outros mercados comerciais, estas células a combustível terão que apresentar custos mais atrativos além de tolerâncias a contaminações. Além disso, o combustível deve ser hidrogênio puro, pois há presença de óxidos de carbono na reforma dos combustíveis.

As células a combustível alcalinas que já foram demonstradas apresentaram ser estáveis até oito horas de operação. Mas para serem economicamente viáveis em aplicações de larga-escala as células a combustível alcalinas devem atingir um tempo de operação que exceda 40.000.

Como as outras células a combustível são mais viáveis economicamente, esta tecnologia não deve durar muito tempo.

6.4.2 Membrana de Troca de Prótons – PEMFC (*Próton Exchange Membrane Fuel Cell*)

Esta tecnologia foi criada pela General Electric nos anos 50 e foi utilizada pela NASA para fornecer energia para o projeto espacial Gemini. Foram construídos dois módulos de 1kW. Estes módulos eram responsáveis pelo fornecimento da energia primária para cada uma das sete aeronaves Gemini. É no momento a tecnologia de célula a combustível favorita das empresas automobilísticas como substituição aos motores de combustão interna. As PEMFC também são conhecidas como eletrólito de membrana polimérica ou eletrólito sólido de polímero.



Figura 15 - PEMFC automotiva da Honda

Numa célula combustível do tipo PEMFC, o eletrólito é uma fina membrana sólida de polímero orgânico (ácido poli-perfluorsulfônico), Nafion TM, permeável aos prótons, mas que não conduz elétrons. Os eletrodos são normalmente feitos de carbono. O eletrólito sólido é uma vantagem, pois reduz os problemas de corrosão e de manutenção.

O hidrogênio flui para a célula de combustível através do ânodo e então é separado pelo catalisador de platina em íons de hidrogênio (prótons e elétrons). Os prótons de hidrogênio atravessam o eletrólito no sentido do cátodo, ao mesmo tempo em que os elétrons fluem através de um circuito externo e fornecem energia elétrica (corrente elétrica) antes de voltarem até o cátodo. O oxigênio, obtido do ar, é fornecido ao cátodo e combina com os elétrons e com os íons de hidrogênio (prótons) para produzir água. Apenas lembrando, o ânodo é o terminal negativo, e o cátodo é o terminal positivo.

As células a combustível PEMFC operam numa temperatura que varia entre 50 a 100°C, tipicamente a 80°C. Nesta baixa temperatura as reações eletroquímicas, que normalmente ocorrem numa velocidade bem lenta, são catalisadas por uma fina camada de platina nos eletrodos, que faz com que as reações ocorram mais rapidamente. Além disso, proporciona uma maior durabilidade dos componentes da célula. As PEMFC's operam numa temperatura relativamente baixa, o que permite a elas um início de operação rápida, além de terem uma densidade de potência alta o que as deixa mais compactas e leves que outras tecnologias. Além disso, elas apresentam alta eficiência, produzindo de 40 a 50% da máxima tensão teórica, e podem variar a saída de potência rapidamente para atender mudanças na demanda de energia.

Esta tecnologia tem grande número de vantagens que fazem dela candidata ideal para uso em aplicações automobilísticas e domésticas, tal como substituição às baterias convencionais (pilhas) em equipamentos eletrônicos como celulares e laptops, nas áreas espacial e militar - para as quais foi desenvolvida inicialmente-, e em equipamentos estacionários e portáteis para a geração de energia em residências, comércio e indústrias.

Atualmente, há no mundo unidades de demonstração em operação gerando uma potência de 50kW e outras em desenvolvimento produzindo cerca de 250kW. Entretanto, há ainda algumas barreiras a serem vencidas para que esta tecnologia se torne acessível. A principal questão é o custo dos materiais da membrana e os catalisadores de platina que são muito caros. Mas as pesquisas estão levando constantemente à queda nos custos, e a economia em alta escala levará os custos para baixo e, conseqüentemente, à produção em massa das células a combustível do tipo PEMFC.

Outra questão que também deve ser superada é que as células a combustível PEMFC precisam de hidrogênio puro para operar, pois elas são suscetíveis à contaminação pelo monóxido de carbono e outras impurezas. Isto se deve principalmente pelo fato de operarem em temperaturas baixas e então terem que utilizar catalisadores muito sensíveis como é a platina. Desta forma, estão sendo conduzidas pesquisas em busca de catalisadores mais tolerantes e que atuem a temperaturas mais altas.

Assim, tanques de hidrogênio no carro são necessários, ou reformadores de combustíveis fósseis, fazendo aumentar os custos. A maioria dos automóveis que utilizam hidrogênio puro deve armazenar o hidrogênio dentro do carro como gás comprimido, em tanques pressurizados. Devido à baixa densidade de energia do hidrogênio, é difícil armazenar hidrogênio suficiente que permita aos veículos viajarem a mesma distância que um carro à gasolina antes de precisar ser abastecido. Aos poucos este limite está sendo superado.

Combustíveis com maior densidade de energia como a gasolina, o metanol, o etanol, o gás natural e o gás liquefeito podem ser utilizados nas células a combustível, mas um processador de combustível – reformador – deve ser utilizado para transformar etanol em hidrogênio puro, por exemplo. A utilização do

reformador libera dióxido de carbono, embora em quantidades muito menores que geradas em carros convencionais que realizam a combustão da gasolina, etanol ou gás natural. Diversas empresas atualmente estão envolvidas com o desenvolvimento de células PEM, como a canadense Ballard, a americana Plug Power e até a General Motors, que está desenvolvendo células a combustível PEMFC para aplicação em sistemas estacionários assim como para o seu tradicional mercado automotivo

6.4.3 Ácido Fosfórico - PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*)

A célula a combustível de ácido fosfórico (PAFC) é considerada a primeira geração das células de combustível modernas e é a mais avançada comercialmente. Mas deverá perder mercado em breve para outras tecnologias (MCFC; PEMF, SOFC) que apresentam rendimentos melhores, assim como menor peso e tamanho.

Mais de 250 células de combustível de ácido fosfórico já foram instaladas pelo mundo – em hospitais, clínicas, hotéis, edifícios comerciais, escolas, terminais de aeroportos, estações de lixo e de tratamento de água, ônibus, entre outros. As PAFCs geram eletricidade com eficiência de 36 a 42% e atingem aproximadamente 55% de eficiência quando há cogeração, aproveitando-se a energia térmica (calor) para gerar mais energia elétrica ou utilizá-la para aquecimento.

Como o nome sugere, estas células utilizam ácido fosfórico líquido como eletrólito, normalmente colocado em contato com uma rede de silício. Apesar de operarem em temperaturas baixas – de 150 a 220°C – ainda precisam utilizar catalisador de platina nos eletrodos para provocar as reações. As reações no ânodo e no cátodo são as mesmas que ocorrem nas células combustíveis do tipo PEMFC com as reações no cátodo ocorrendo numa velocidade maior que nestas devido a maior temperatura de operação, e o eletrólito carregando até o cátodo os prótons (íons). Os eletrodos consistem basicamente de Teflon-TM misturado à platina e carbono.

Por ter uma temperatura de operação maior que as PEMFC, uma pequena tolerância com relação às impurezas é permitida, com as células de ácido fosfórico podendo funcionar com uma porcentagem de monóxido de carbono de 1 a 2% e alguns ppm de óxido sulfuroso, o que permite uma flexibilidade na utilização de alguns combustíveis, como o gás natural.

Entre as tecnologias de células de combustível, é a que apresenta a menor eficiência, além de serem mais lentas para aquecerem e iniciarem os processos de reações. Utilizar combustíveis ao invés de hidrogênio significa que a reforma do combustível deve ser feita para se ter hidrogênio puro e então poder aplicar na célula a combustível. Muitas vezes os processos de reforma requerem temperaturas de aproximadamente 500 °C. Como os gases de exaustão (vapor d'água) das PAFC atingem cerca de 200°C, faz-se necessário a queima de combustível para aumentar a temperatura. Isto reduz a eficiência global da célula de ácido fosfórico (PAFC).

Em temperaturas menores, a célula a combustível de ácido fosfórico é um fraco condutor iônico, e a contaminação do monóxido de carbono contra o catalisador de platina se torna mais crítico. Isto ocorre quando o ácido fosfórico está mais diluído, fazendo com que a temperatura de operação abaixe.

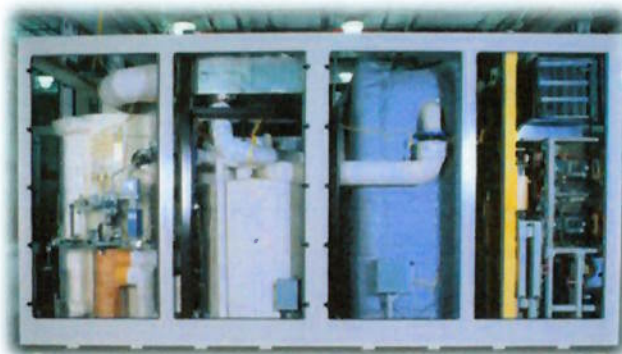


Figura 16 - Célula a Combustível da UTC Fuel Cell (PC25) aberta

As vantagens da tecnologia PAFC são que elas apresentam uma boa estabilidade devido ao eletrólito de ácido fosfórico (H_3PO_4) concentrado em 100% ser estável, baixa volatilidade do eletrólito e construção relativamente simples. As desvantagens desta tecnologia são a utilização da platina como catalisador, um metal nobre e caro; a produção baixa de corrente e tensão se comparada às outras tecnologias de células a combustível; e também o fato de ser pesada e de grandes dimensões.

As pesquisas sobre esta tecnologia nos últimos 20 anos mostram que ela é indicada para aplicações estacionárias. As PAFC que já foram desenvolvidas, testadas e instaladas estão fornecendo desde 200kW a 20MW quando instaladas em paralelo. A maioria foi produzida pela UTC FuelCells, fabricante das células a

combustível da NASA. Foi a primeira empresa a disponibilizar comercialmente uma célula a combustível, em 1996. Na Figura 16 temos uma destas células aberta.

Uma unidade de 200 kW de uma célula a combustível PAFC custa cerca de 900.000 dólares. A durabilidade é de cerca de 40.000 horas com uma pequena queda de eficiência dos eletrodos com o tempo.

No Brasil, esta tecnologia está presente em Curitiba e no Rio de Janeiro. O Lactec, em parceria com a Copel, adquiriu três unidades desta tecnologia com o objetivo de fazer pesquisas. No Rio de Janeiro, a Petrobrás adquiriu uma unidade para o Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES), com os mesmos objetivos.

6.4.4 Óxido Sólido – SOFC (*Solid Oxide Fuel Cells*)

Esta tecnologia é principalmente utilizada em aplicações em geração de energia de alta-escala incluindo indústrias e centrais de geração próximas ao consumidor. Alguns pesquisadores também vêem vantagens no uso das SOFC em veículos e estão desenvolvendo esta tecnologia para esta aplicação também.

Um sistema de célula a combustível de óxido sólido normalmente utiliza um material cerâmico, não poroso e sólido, de óxido de zircônio e um estabilizante de óxido de ítrio em pequena quantidade, ao invés de um eletrólito líquido, tal como nas MCFC's, permitindo que as temperaturas de operação atinjam até 1000°C e pressões de 15 psi (1 bar). Como o eletrólito é sólido, não há necessidade da construção de uma matriz de apoio para o eletrólito tal como é feito com outras células que utilizam eletrólito líquido.

Nestas células e em alta temperatura, o óxido de zircônio tem a capacidade de conduzir íons de oxigênio. Desta forma, a energia é gerada pela migração de íons de oxigênio provenientes do cátodo para o ânodo oxidando o gás do combustível, que geralmente é uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono. Nas tecnologias PEMFC, PAFC, a migração de íons é do ânodo para o cátodo, diferentemente das tecnologias MCFC e SOFC. No ânodo ocorre a formação de água, dióxido de carbono (CO₂) e liberação de elétrons. Os elétrons gerados no ânodo fluem através de um circuito externo em direção ao cátodo onde entram em contato com o

oxigênio, reduzindo a molécula de oxigênio (O_2) em íons de oxigênio, completando o ciclo.

A eficiência elétrica de uma célula a combustível SOFC varia de 50 a 60% na conversão do combustível em eletricidade, e com cogeração, aproveitando-se o calor do vapor d'água, pode-se atingir uma eficiência global de 80 a 85%. Potência de saída típica de uma célula SOFC padrão é de 100kW.

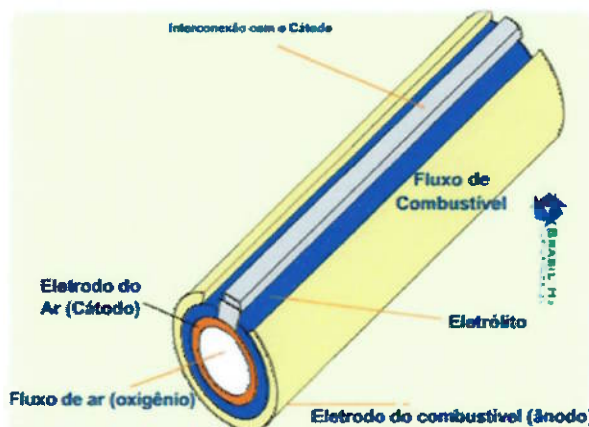


Figura 17 - Diagrama de funcionamento da Célula a Combustível SOFC

A alta temperatura de operação elimina a necessidade de utilizar um catalisador de metal precioso como platina, reduzindo-se o custo. Também permite que a reforma do combustível seja interna, dentro da própria célula, o que permite o uso de vários tipos de combustíveis e reduz os custos associados ao uso de um reformador externo para o sistema. Estas são vantagens das células combustíveis SOFC e MCFC.

As SOFC's também são as mais resistentes a componentes sulfurosos entre as células combustíveis. Além disso, estas células não são contaminadas na presença de monóxido de carbono no combustível. Inclusive pode ser utilizado como combustível o que permite que as SOFC's aceitem gases provenientes do carvão.

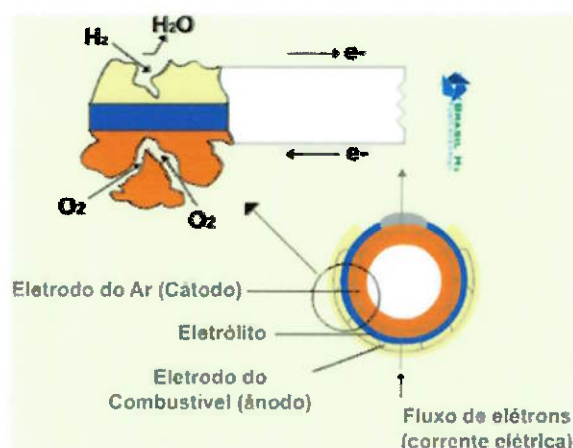


Figura 18 - Corte de uma célula a combustível SOFC Tubular

As células combustíveis de óxido sólido que estão em demonstração ou em comercialização fornecem energia desde 1kW até 300kW, e a temperatura de operação varia de 650°C a 1000 °C.

As SOFC's são construídas como os chips de computadores através de uma deposição seqüencial de várias camadas de material. A configuração mais comum é na forma tubular. O ânodo das SOFC's é feito de zircônio e cobalto ou zircônio e níquel; e o cátodo é feito de estrôncio dopado com manganeto de lantânio.

6.4.5 Carbonato Fundido – MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*)

As células de carbonato fundido (MCFC) funcionam de forma bem diferente das tecnologias PAFC, AFC e PEMFC. São consideradas de segunda geração e entre as suas principais características estão a geração de energia elétrica em alta escala, alta eficiência, flexibilidade na variedade de combustíveis, reforma interna do combustível, resistência maior a impurezas como o monóxido de carbono e baixos níveis de emissões de poluentes, entre outras.

Estas células utilizam como eletrólito sais de carbonato de sódio, lítio e potássio, ou a combinação destes misturados numa matriz de aluminato de lítio (LiAlO_2). Quando aquecido numa temperatura de 650°C estes sais se fundem e geram íons de carbonato (CO_3^{2-}) que fluem do cátodo para o ânodo – (diferentemente das PAFC e PEMFC que fluem do ânodo para o cátodo) onde combinam com o

hidrogênio para produzir água, dióxido de carbono e elétrons. Estes elétrons fluem por um circuito externo de volta ao cátodo, gerando corrente elétrica (eletricidade).

Esta alta temperatura de operação – 600 °C a 700 °C - permite que este tipo de célula a combustível seja capaz de reformar internamente os combustíveis fósseis (hidrocarbonetos), tais como o gás natural, metanol e a gasolina, produzindo hidrogênio dentro da própria célula de combustível. Isto reduz bastante os custos, diferentemente do que ocorre com as PAFC, PEMFC e AFC, que necessitam de uma reforma externa do combustível.

Nesta temperatura não há problema com a contaminação do monóxido de carbono, embora compostos sulfurosos ainda sejam um problema, e assim os catalisadores de platina podem ser substituídos por materiais mais baratos como o níquel. Desta forma, os eletrodos geralmente são porosos e feitos de níquel: ânodo de níquel (Ni) poroso contendo um aditivo antissinterizante adequado (usualmente cromo ou alumínio), e um catodo de óxido de níquel (NiO) poroso dopado com lítio.

As células combustíveis de carbonato fundido (MCFC) podem atingir uma eficiência elétrica de até 60%, podendo atingir uma eficiência térmica total de 85% quando o vapor d'água de exaustão é aproveitado. Cada célula a combustível desta tecnologia gera de 0.7 V a 1.0 V de tensão contínua. Colocadas em série, elas podem gerar até milhares de MW de potência.

Apesar das vantagens que a alta temperatura de operação propicia, há alguns problemas. A durabilidade ainda é um desafio a ser melhorado. Devido à alta temperatura e ao eletrólito corrosivo, há uma aceleração na quebra de componentes, diminuindo a vida útil das células MCFC. Também leva certo tempo para que a temperatura de operação seja atingida, fazendo com que não sejam ideais e práticas para aplicações de transporte e também são inseguros para aplicações em residências devido a alta temperatura e alguns tipos de corrosões que podem ocorrer. Assim, a sua alta eficiência é mais atrativa em aplicações industriais onde há processos em larga escala e turbinas.

Sistemas de células combustíveis MCFC estão em demonstração em vários países produzindo até 2 MW, mas já há projetos para gerar 50 e 100 MW em breve.

6.4.6 Metanol Direto – DMFC (*Direct Methanol*)

A tecnologia conhecida como metanol direto (DMFC) é uma variação da tecnologia PEMFC no qual faz uso do metanol diretamente sem a necessidade de reforma do combustível para se ter o hidrogênio puro. O metanol é convertido em dióxido de carbono e hidrogênio no ânodo. O hidrogênio se quebra em prótons e elétrons. Os prótons atravessam a membrana até reagir com o oxigênio para formar água, seguindo o mesmo padrão de reação numa típica célula a combustível PEMFC.

A maioria das células a combustível é alimentada por hidrogênio, que pode ser adicionado diretamente ou ser extraído a partir de um combustível no próprio sistema de célula a combustível através da reforma de uma fonte de hidrogênio tal como o metanol, o etanol, e hidrocarbonetos como o gás natural e gasolina. As células a combustível de Metanol Direto (DMFC), entretanto, são alimentadas por metanol, o qual é misturado ao vapor e então ao ânodo (eletrodo negativo) da célula a combustível.

As células a combustível DMFC não tem muitos dos problemas de armazenamento típicos de outras tecnologias, pois o metanol tem uma densidade de potência maior que a do hidrogênio – embora menor que a da gasolina ou diesel. O metanol também é mais fácil de transportar e fornecer para o mercado, pois pode utilizar a corrente infra-estrutura por ser um combustível líquido, como a gasolina.

Estas células operam na temperatura de 120-130°C, o qual é um pouco maior que a temperatura padrão de uma PEMFC (80°C), e atinge uma eficiência de aproximadamente 40%. A desvantagem é que a baixa temperatura de conversão do metanol para hidrogênio e dióxido de carbono precisa de uma quantidade maior de platina como catalisador do que na PEMFC convencional, o que aumenta o custo da célula a combustível. O aumento no custo é, entretanto, é compensado pela praticidade de utilizar um combustível líquido e de não necessitar de um reformador. A tecnologia existente nas DMFC's ainda está em início de desenvolvimento, mas já têm demonstrado sucesso em aplicações em telefones celulares e laptops, mercados potenciais para esta tecnologia.

6.4.7 Célula a combustível de Etanol Direto - DEFC (*Direct Ethanol Fuel Cell*)

As células a combustível com etanol utilizado diretamente são conhecidas como DEFCs – Direct Ethanol Fuel Cells/Etanol Direto. No Brasil, assim como nos EUA, existem estudos procurando viabilizar a utilização do etanol nas Células de combustível, mas ainda estão em fase de desenvolvimento.

Basicamente, a célula a combustível DEFC utiliza a tecnologia PEMFC, SOFC e a MCFC. Muitas vezes o hidrogênio é extraído de um combustível, como o gás natural, através de um reformador acoplado a uma célula de combustível. No caso das DEFCs o etanol seria aplicado diretamente no eletrodo da célula, não necessitando de um reformador externo e nem de um tanque de compressão para o hidrogênio. Porém, apresentam alguns problemas. A quebra das ligações químicas carbono-carbono requer mais energia, exigindo maior temperatura de operação e assim diminuindo a eficiência do processo de conversão energética. Mesmo assim, resultados preliminares já obtidos com os catalisadores produzidos têm sido bastante encorajadores.

Quando utilizado nas MCF's e SOFC's, a reforma do etanol ocorre internamente com a ajuda da alta temperatura de operação das células de carbonato fundido.

Nos EUA foram feitos estudos com etanol (obtido do milho) minimamente desidratado (diluído) como combustível para células a combustível de carbonato fundido (MCFC) e os resultados mostraram viabilidade técnica e econômica. Verificou-se que as composições preferidas estão na faixa de 15 a 30% de diluição (85 a 70% de água), obtendo-se eficiências elétricas de 45 a 60%. Além disso, a eficiência das células de combustível utilizando etanol ficou próxima daquelas com o uso de gás natural. Com relação à estabilidade, a operação foi de 1400 horas sem problemas. Na tecnologia MCFC, o hidrogênio é extraído através da reforma a vapor, pois a temperatura de operação de uma MCFC é alta.

6.4.8 Células de combustível Regenerativas - RFC (*Regenerative Fuel Cells*)

O conceito das células de combustível Regenerativas (RFC) é relativamente novo e vem sendo pesquisado por um número cada vez maior de empresas. Esta tecnologia funciona da mesma forma como nas outras Células de combustível, utilizando o hidrogênio e o oxigênio para produzir eletricidade, água e calor. A diferença é que as células Regenerativas também atuam na forma reversa, fazendo a eletrólise. A água produzida na célula passa por um eletrolisador que obtém energia através de painéis solares e separa a água (H_2O) em seus componentes constituintes, o hidrogênio e o oxigênio, que são realimentados para a célula de combustível, formando o ciclo. Desta forma, não há necessidade de fornecimento externo de hidrogênio.

A célula de combustível Regenerativa, abastecida por um tanque leve para armazenamento de hidrogênio, foi de longe a tecnologia com a maior densidade de energia – cerca de 450 watts/kg – dez vezes maior que as baterias de chumbo-ácido, e duas vezes maior que as baterias químicas.

As células de combustível Regenerativas poderão ser utilizadas em aplicações espaciais, militares e comerciais, principalmente nas telecomunicações. Se o conceito regenerativo obtiver sucesso, aviões poderão fazer viagens durante semanas ininterruptas, criando uma nova geração de espaçonaves que já estão sendo chamadas de “satélites atmosféricos”. Uma das aplicações para estes satélites seria no segmento de telecomunicações, fazendo com que os sinais fossem transmitidos com mais eficiência e com muito menor custo que os atuais satélites espaciais. Eles poderiam monitorar o clima, furacões, e fornecer informações sobre desastres como incêndios, inundações e terremotos.

6.5 Desafios

Especialistas acreditam que um futuro baseado em célula a combustível acontecerá dentro de uma década, mas muitos desafios devem ser superados. Para começar, programas de cooperação público-privada são necessários para demonstrar os benefícios das células de combustível e alcançar a comercialização em massa por

volta do ano 2012. Barreiras técnicas e econômicas também devem ser analisadas e vencidas para que as células a combustível sejam utilizadas em aplicações em transportes, energia portátil, estacionária, entre outras aplicações. O problema tecnológico a ser superado é a durabilidade das células a combustível. O mercado requer altíssima confiabilidade e vida útil para ter uma competição satisfatória com as tecnologias de geração de energia existentes. Como exemplo, a maior parte do mercado estacionário (geradores, motores e turbinas a diesel e gás) exige uma vida útil de mais de 40.000 horas, e em sistemas de transporte, uma vida útil de mais de 5.000 horas (170.000 quilômetros), superando questões climáticas severas, suportar condições de partida e desligamento sucessivos, e condições cíclicas transientes. Ainda não se pode dizer que as características de confiabilidade e durabilidade são satisfatórias, embora as células de combustível de ácido fosfórico de 200kW e em operação em várias regiões no mundo, inclusive no Alaska, tenham demonstrado uma confiabilidade e durabilidade muito boa.

7 SISTEMA INTEGRADO DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL E MICRO TURBINA A GÁS PARA GERAÇÃO ESTACIONARIA DE ENERGIA

A aplicação da tecnologia da célula de combustível aos sistemas avançados da geração de energia significa o avanço o mais significativo na conservação de energia e na proteção ambiental para esta década. O principal exemplo de uma tecnologia nova da célula combustível é o sistema híbrido (integrado) onde uma célula a combustível é combinada com um outro dispositivo da geração de poder para criar uma sinergia com os atributos que excedem a soma dos dois quando combinados.

Pesquisas feitas pelo Departamento Americano de Energia (DOE) revelaram que o sistema integrado de energia que combine uma turbina de gás (GT) com uma célula combustível de alta temperatura (HTFC) é capaz de fornecer eficiências notavelmente elevadas. Os vários elementos técnicos da tecnologia de GT-HTFC foram apresentados em uma série das sessões patrocinadas pelo Instituto Internacional da Turbina a Gás (ITGI) da ASME (Sociedade Americana de

Engenheiros Mecânicos), que adotou o termo "Turbo-Fuel Cell" para descrever esta tecnologia emergente.

Baseado na tecnologia de hoje, a planta híbrida, usando gás natural, teria uma eficiência de 60 por cento. Se o calor perdido for usado a eficiência total da utilização do combustível seria de aproximadamente 80 %. É razoável projetar-se que instalações de desempenho elevado e custo competitivo, com confiabilidade elevada, estarão prontos para o serviço comercial no final da primeira década do século XXI. Quando diversas microturbinas puderem ser agrupadas para aumentar o nível de energia, pode, talvez, ser mais eficaz do que o acoplamento de apenas um único módulo de turbina a gás com a célula de combustível. A maior potência resultante abre novas possibilidades de mercado, tanto em nações industriais como em países em desenvolvimento.

7.1 *Seleção da tecnologia da célula de combustível*

Após a apresentação das diversas tecnologias, chegamos à seleção da melhor alternativa dentre elas para a combinação no sistema integrado com uma micro-turbina a gás. A célula de combustível ideal para esta utilização parece ser a SOFC, célula de combustível de óxido sólido, uma vez que possui uma exaustão de gases a uma temperatura adequada para sua utilização na entrada da turbina a gás, além de ter uma das maiores eficiências para o uso de gás natural como combustível. Seguem tabelas com as principais características da SOFC, assim como uma comparação entre esta tecnologia e as demais formas de produção de energia.

Menores emissões que qualquer planta de geração de energia usando gás natural

- NO_x – menor que 0.5 ppm
- SO_x – insignificante
- CO - insignificante
- CO₂ - inversamente proporcional às altas eficiências, cerca de 50% menor que as tecnologias convencionais.

Alta eficiência elétrica em relação ao LHV (lower heating value – poder calorífico inferior) do gás natural.

- Alcança 46%, para uma pressão de 1 atm em um sistema SOFC de cogeração
- Alcança 55-60% para pressão de 3 atm para um sistema integrado SOFC/TG

Manipulação fácil, boa confiabilidade.

- Reformador de gás natural integrado na célula
- Sistema de alta confiabilidade, já demonstrada.
- Células no estado sólido: não há vazamento de eletrólito, não há corrosão.
- Robustez do ciclo térmico: mais de 100 ciclos térmicos entre a temperatura ambiente e 1000° C
- Potencial de vida útil: expectativa de 5 a 10 anos. Sistemas baseados na SOFC demonstraram vida útil de mais de 69,000 horas (cerca de 8 anos)
- Estabilidade de voltagem: degradação menor que 0.1% por 1,000 horas
- Potencial de Cogeração e Ciclo Combinado: os gases de exaustão deixam a SOFC a temperaturas maiores que 800° C

Tabela 2 - Comparação entre geradores de energia

	PEM	PAFC	MCFC	SOFC	Micro-Turbina	Motor Diesel
Eficiência elétrica usando gás natural (LHV), %	35	40	45-50	45-50*	30	35
Degradação de performance, %/1000 h.	>1	0.44	0.60	<0.10	0.20	0.20
Emissões usando gás natural:						
NOx, g/MWh	<20	<10	<10	<10	300	700
SOx, g/MWh	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1	1
Ruído, dB a 10 m	<60	60	65	65	65	80-90
Consumo de água, gal./MWh	0	90	88	0	0	0
Eficiência total do combustível usando gás natural (LHV) %	35	65	70	80-85	~75	~78

As SOFC's, podem também utilizar o monóxido de carbono (CO), o que as torna mais flexíveis quanto ao combustível, e também geralmente mais eficiente com o combustível disponível, tal como gás natural ou propano. O hidrogênio e o CO podem ser produzidos do gás natural e dos outros combustíveis reformados por

vapor, por exemplo. As células combustíveis SOFC's, que podem reformar o gás natural internamente tem vantagens significativas em eficiência e simplicidade ao usar o gás natural porque não necessitam um reformador externo.

A SOFC tem um design tubular, configurado como uma única célula por tubo. A célula é construída em camadas no eletrodo de ar (cátodo) com uma interconexão axial que deixe o cátodo acessível e permita que as células sejam conectadas em série.

Manufaturada atualmente como protótipos comerciais em uma fábrica piloto em Pittsburgh, a célula mede nominalmente 2,2 cm (0,867 polegada) de diâmetro por 150 cm (59 polegadas) de comprimento ativo com uma extremidade fechada. Para gerar eficientemente a eletricidade, a célula deve ser mantida em uma temperatura de operação de aproximadamente 1000°C, o ar deve ser fornecido ao interior da célula por um tubo de descarga e o combustível é fornecido no exterior da célula. No circuito aberto, um potencial na faixa de 900 mV a 1V será gerado por célula, assim estas são conectadas em série para gerar maiores voltagens. A potência produzida é proporcional à área de superfície ativa das células. Na pressão atmosférica, em uma temperatura uniforme de 1000°C, na utilização de uma mistura com 85% de combustível e 25% de ar, um único SOFC tubular gerará potência de até 210 Watts em corrente contínua.

Enquanto muitos aspectos do projeto e da construção das células combustíveis são patenteados e exclusivos das empresas que as desenvolvem, os materiais básicos usados em SOFC's são bem conhecidos. O eletrólito geralmente usado é um óxido de ítrio e zircônio estabilizado YSZ, escolhido por sua propriedade de transporte de oxigênio. O ânodo, ou o eletrodo do combustível, é uma liga de níquel e zircônio. O cátodo, fabricado como um tubo poroso extrudado e, como bloco de construção básico da célula tubular, é feito de manganeto de lantânio, e a interconexão do cátodo consiste em uma tira fina de cromato de lantânio.

As células de combustível trabalham com o movimento dos íons através de seu eletrólito quando o ar e o combustível são fornecidos à célula. Na SOFC, o ar é ionizado no cátodo e provoca um fluxo de íons de oxigênio através do eletrólito. Quando os íons alcançam o combustível no ânodo estes oxidam o hidrogênio a H_2O e o CO a CO_2 , liberando então os elétrons, e se o ânodo e o cátodo forem conectados

a um circuito externo, este fluxo de elétrons transforma-se em corrente contínua. Este processo continua enquanto combustível e ar são fornecidos à célula. Para fornecê-los é geralmente necessário um ventilador para o ar e um compressor de combustível. Outros equipamentos, tal como um trocador de calor, sistemas do *start-up* e de parada programada, instrumentação e controle, assim como o equipamento de segurança são também necessários para um sistema de potência seguro e confiável.

O gás natural desulfurizado é alimentado diretamente em um ejetor (*jet pump*). O ejetor cria um vácuo parcial que puxa o combustível para recirculação perto do topo da pilha. Isto captura o vapor de água necessário para reformar o gás natural. Esta mistura do combustível passa sobre um catalisador (o pré-reformador) onde todas as cadeias maiores de hidrocarboneto são convertidas em metano, hidrogênio e monóxido de carbono. A mistura do combustível é passada então através de reformadores empilhados onde o metano é convertido completamente em hidrogênio e monóxido de carbono antes que alcance as células. Esta mistura reformada do combustível entra então em um distribuidor de combustível no fundo da célula onde é distribuída à superfície exterior das células.

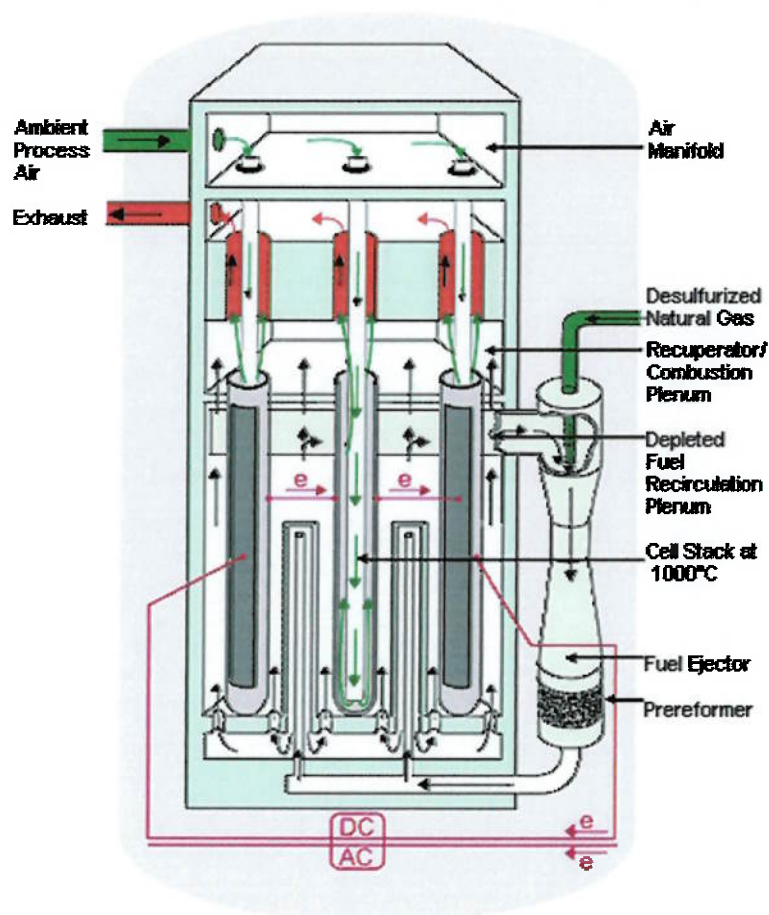


Figura 19 - Esquema simplificado de um módulo de uma SOFC: Entre cada linha é colocado um reformador que é aquecido por radiação pelas linhas adjacentes da célula.

Enquanto isto, o ar entra no módulo, passa através do distribuidor do ar e desce nos tubos de alimentação. Nesta primeira passagem do ar através do recuperador para aumentar sua temperatura e lançá-lo no fundo interno das células. Saindo do tubo de alimentação os fluxos de ar sobem pela superfície interna das células. Com combustível na parte externa e oxigênio do ar no interior a reação eletroquímica ocorre ao longo do comprimento das células, consumindo aproximadamente 85% do combustível no processo. A temperatura dentro do módulo varia um pouco, mas é mantida geralmente abaixo de 1000°C. O combustível esgotado então entra no forro de recirculação onde uma fração deste é recirculada - para fornecer o vapor necessário para reformar o combustível. Um pouco de combustão ocorre aqui ajudando a pré-aquecer o ar que flui para os tubos da

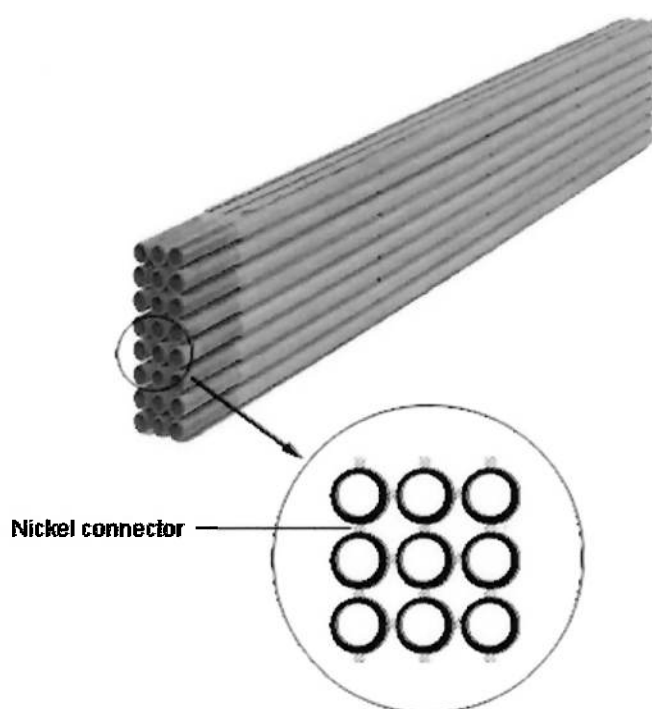


Figura 21 - Várias células empacotadas em uma pilha, unidas por conectores de níquel

Como são de um material maleável, os conectores de níquel permitem que cada célula se expanda ou se contraia independentemente das células adjacentes enquanto sua temperatura muda. Em um projeto típico da pilha, as pilhas tubulares são orientadas com o eixo vertical e a extremidade fechada para baixo.

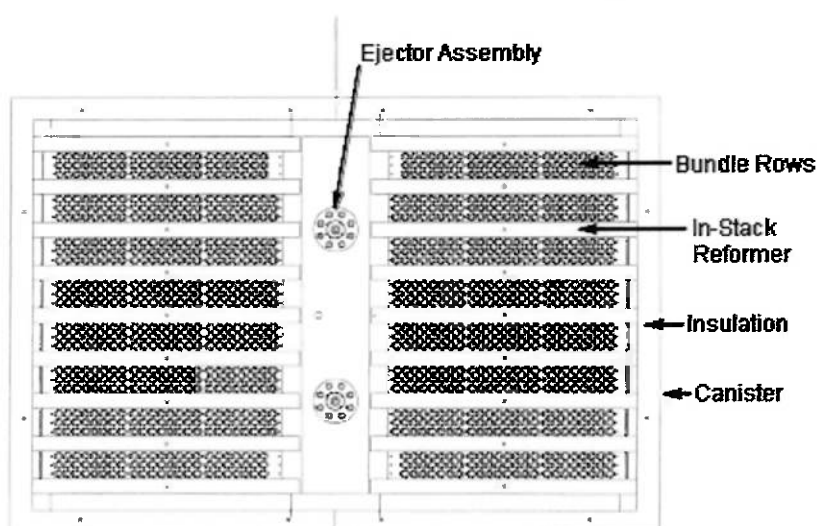


Figura 22 - Seção transversal da SOFC: os pacotes são arranjados em linhas conectadas em série para o aumento da voltagem.

Quando uma SOFC for pressurizada, têm-se como resultado um aumento da tensão, conduzindo a um melhor desempenho. Para o exemplo, a operação sob uma pressão de 3 atmosferas aumenta a produção de energia em aproximadamente 10%. Entretanto, esta melhora no desempenho sozinha não justifica a despesa com a pressurização, mas a possibilidade de integrar a SOFC com uma turbina a gás, que necessita um fluxo de gás quente e pressurizado para operar. Se uma SOFC for pressurizada e integrada com uma turbina a gás, o ar pressurizado necessitado pela SOFC pode ser fornecido pelo compressor da turbina, a SOFC pode agir como o combustor do sistema, e a exaustão da SOFC pode acionar o compressor e um gerador separado. Isto rende um ciclo integrado de geração de energia seco (sem vapor) que promove uma eficiência na geração de energia elétrica sem precedentes.

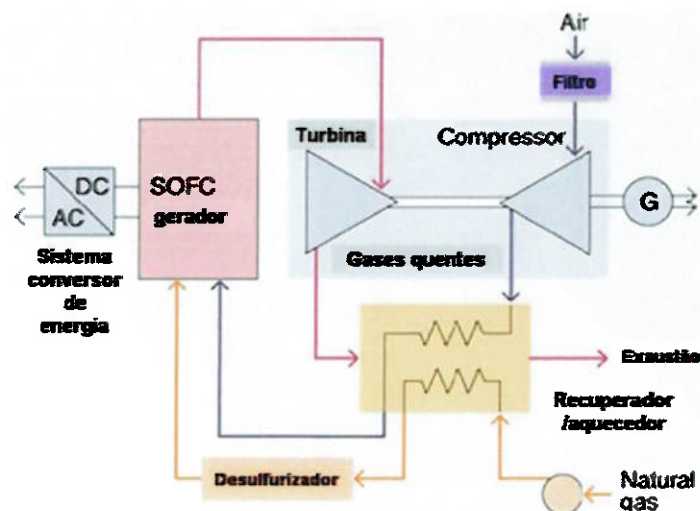


Figura 23 - Diagrama do ciclo SOFC/Turbina a gás

Durante a operação normal do integrado pressurizado de SOFC, o ar entra no compressor e é comprimido a 3 atm. Este ar comprimido passa através do recuperador onde é pré-aquecido e entra então na SOFC. O combustível comprimido na bomba de combustível entra também na SOFC e as reações eletroquímicas ocorrem ao longo das células. Os gases quentes e pressurizados da exaustão saem da SOFC e chegam diretamente à seção do expansor da turbina a gás, que dirige o compressor e o gerador. Os gases do expansor passam no recuperador e são esgotados então. Em aproximadamente 200°C a exaustão está quente o bastante fazer

o aquecimento de água. A potência elétrica é gerada assim pela SOFC (Corrente Contínua) e pelo gerador (Corrente Contínua) que usa os mesmos ar e combustível. A análise indica que com tais integrados de SOFC/GT uma eficiência elétrica de 55% pode ser conseguida nas capacidades de planta tão baixas quanto 50 quilowatts, e cerca de 60% para potência de 1 MW, usando turbinas de gás pequenas. Para capacidades de 2 a 3 MW com turbinas a gás maiores e mais sofisticadas, análises indicam que as eficiências elétricas de até 70% são possíveis.

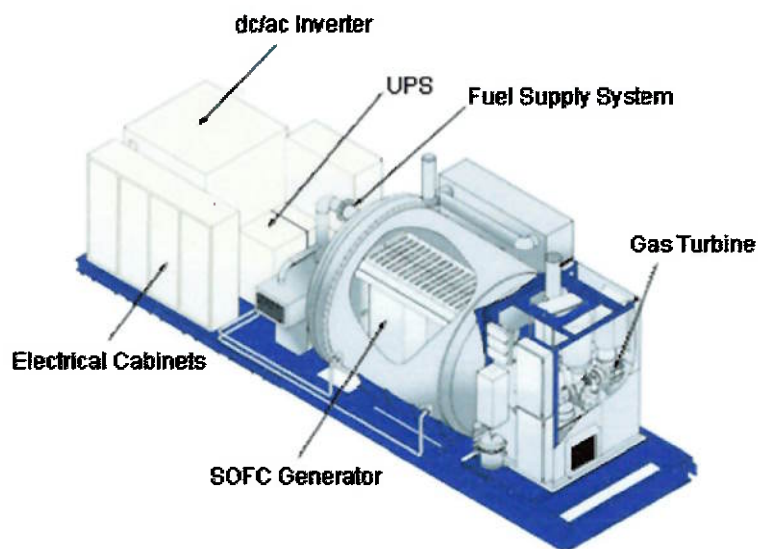


Figura 24 - Sistema integrado SOFC/Turbina a Gás



Figura 25 - 220-kW SOFC integrada com microturbina a gás, instalada na Universidade da Califórnia



Figura 26 - 300-kW SOFC/ turbina a gás, Pittsburgh, Pensilvânia.

8 COMBUSTÍVEL

Um sistema integrado composto por uma microturbina e uma célula de combustível possui várias opções de combustível. Na turbina temos que levar em consideração o desempenho do combustível antes da entrada. A eficiência do processo, pressão e temperatura de entrada e nível de emissões são fatores cruciais para a seleção do adequada.

A célula de combustível opera apenas com o hidrogênio puro, para tanto devemos considerar que o combustível passará pelo reformador antes de dirigir-se à célula. Atualmente, existentes no mercado existem reformadores para o gás natural e para o etanol. Detalhes sobre cada um destes combustíveis são dados a seguir.

8.1 *Gás Natural*

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves, que à temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece no estado gasoso. É inodoro e incolor, não-tóxico e mais leve que o ar. É uma fonte fóssil de energia limpa, encontrado em reservatórios, freqüentemente acompanhado de petróleo. As reservas de gás natural são muito grandes e estão distribuídas por todos os continentes. Sua distribuição é feita através de uma rede de gasodutos e de maneira segura, pois não necessita de estocagem de combustível.

Proporciona uma queima completa, com reduzida emissão de poluentes e melhor rendimento térmico. Sua composição pode variar bastante, o gás metano é o principal componente; etano, propano, butano e outros gases em menores proporções. Apresenta baixos teores de dióxido de carbono, compostos de enxofre, água e contaminantes, como nitrogênio. Abaixo suas principais características:

- Poder calorífico superior (PCS) a 20°C e 1atm: 8.800 a 10.200 kcal/m³;
- Densidade relativa ao ar a 20 °C: 0,55 a 0,69;
- Enxofre: 80mg/m³;
- H₂S: 20mg/m³;

- CO₂: 2 % em volume;
- Inertes: 4 % em volume;
- O₂: 0,5 % em volume;

Vantagens:

Baixo impacto ambiental: é um combustível ecológico. Sua queima produz uma combustão limpa, melhorando a qualidade do ar, pois substitui formas de energias poluidoras como carvão, lenha e óleo combustível. Contribui para a redução do desmatamento.

Facilidade de transporte e manuseio: Sua rede de distribuição vem crescendo muito nos últimos anos, e a expectativa é de continue nos anos seguintes. Além do gasoduto Brasil-Bolívia existem as reservas na bacia de Santos e no litoral do Espírito Santo.



Figura 27 - Sistema de distribuição de gás natural

8.2 *Etanol*

É o mais comum dos álcoois e caracteriza-se por ser um composto orgânico, proveniente, principalmente da cana-de-açúcar. É um líquido incolor, volátil, inflamável, solúvel em água, com cheiro e sabor característicos.

A principal utilização do álcool etílico é como combustível em veículos automotivos, substituindo a gasolina. Possui a vantagem de ser totalmente renovável e menos poluidora que os outros derivados do petróleo. É também menos inflamável e menos tóxico que a gasolina e o diesel.

8.3 *Seleção do Combustível*

Partindo das duas possibilidades acima, para o presente estudo, escolhemos o gás natural como combustível ideal. Além de possuir uma extensa rede de distribuição e em expansão, está praticamente à porta de todos os principais centros econômicos do país, na região Sudeste e no Nordeste. As principais concessionárias de gás natural no Brasil oferecem descontos na tarifa para utilizações do combustível em cogeração.

Atualmente já existem no Brasil quatro células a combustível que utilizam o gás natural como fonte de hidrogênio. Três células estão instaladas em Curitiba (Copel, Lactec e Hospital Erasto Gaertner) e a quarta no Rio de Janeiro (Cenpes, Petrobrás).

Parte II

Na segunda parte do projeto de um sistema integrado de célula de combustível com turbina a gás para geração de energia elétrica e calor em uma pequena instalação será dada ênfase à turbina a gás.

A partir deste ponto os estudos serão divididos em duas linhas, aspectos térmicos e mecânicos. Na parte térmica serão estudados ângulos de entrada e saída do bocal, perfil das paletas, triângulos de velocidades e o rendimento do estágio. A parte mecânica será responsável pela análise dos esforços e seleção do material das paletas.

9 DIMENSIONAMENTO DA MICROTURBINA

9.1 *Hipóteses Simplificadoras*

Para simplificar o estudo seguinte adotaremos as seguintes hipóteses:

- Fluido de trabalho é considerado gás perfeito e com propriedades constantes;
- Os processos ocorrem em regime permanente;
- O escoamento é uniforme, paralelo e unidimensional;
- Fluxo de massa constante;
- Situação ideal, sem perdas e reversível;
- Sem perdas por fluxos secundários (vórtices).

9.2 *Método de Equacionamento*

O método de equacionamento utilizado será baseado em Tamashiro, Nakabayashi (Projeto Básico de uma Microturbina a Gás de 30kW, 2004, p.34).

Esse método proposto considera as seguintes etapas:

- A. Estimativa inicial do trabalho específico da turbina, considerando processo isoentrópico da turbina. Para então estimar a vazão mássica necessária, e as dimensões adequadas para tal vazão mássica.
 - B. Dada a vazão mássica, estima-se a velocidade da paleta e os triângulos de velocidade. Obtêm-se então novo valor para o trabalho específico.
- Após cada iteração na etapa B, passa-se à etapa (C) para a verificação de convergência.
- C. Compara-se a vazão mássica obtida na iteração ao valor estimado, verificando sua convergência.
 - D. Ao fim do processo iterativo, os valores finais obtidos são impressos.

A seguir explicitaremos o método, demonstrando procedimentos e equações utilizadas. A figura a seguir identifica os ângulos (α, β_2, β_3) e velocidades (V_2 , V_{2R} , V_3 e V_{3R}) envolvidas no equacionamento.

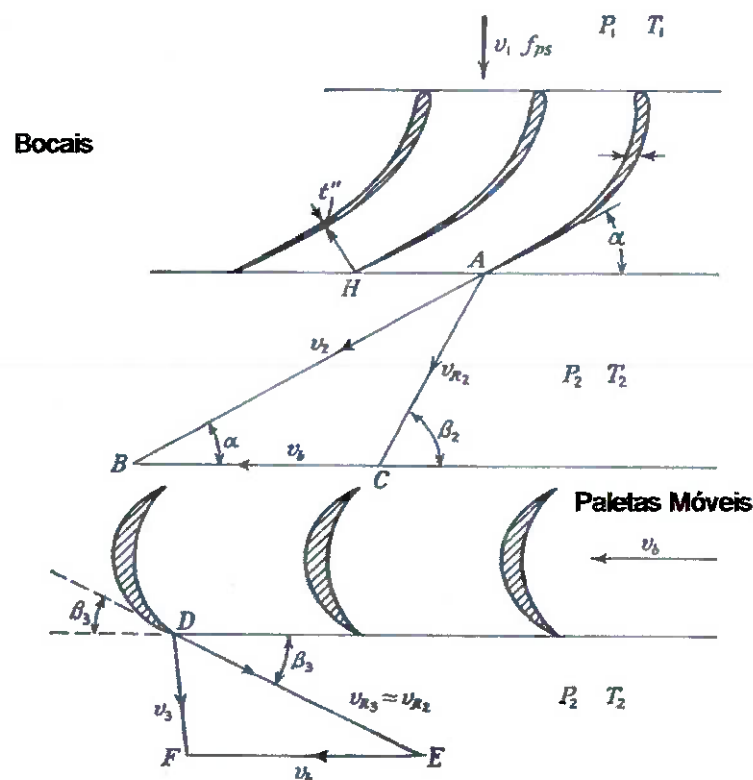


Figura 28 - Identificação dos ângulos e velocidades

Etapa A: Estimativa do trabalho específico e da vazão mássica necessária.

- Estimativa de w : Com os pontos do ciclo Brayton ideal identificados, faz-se uma estimativa do trabalho específico. Considera-se a queda entálpica num processo isentrópico (velocidade de saída é considerada desprezível).

$$w_{\text{estimado},0} = \left[(h_1 - h_2') + \frac{v_1^2}{2} \right]$$

(8.1)

- Cálculo de w_c : Calcula-se o trabalho específico do compressor através da expressão:

$$w_c = c_p (T_{\text{entrada,compressor}} - T_{\text{saída,compressor}}) \quad (8.2)$$

- Com isso faz-se uma primeira estimativa da vazão mássica que atenderia à $P_{\text{útil}}$, desejada de 1,7 kW. Como o objetivo é gerar pelo menos 5 kW com a soma das potências da turbina e da célula de combustível, estimamos 1,7 kW para a microturbina considerando o fato de que sua eficiência ficará em torno de 27%, enquanto a eficiência da célula de combustível será de aproximadamente 55%.

$$\dot{m} = \frac{1,7}{w_{\text{estimado}} - w_c} \quad (8.3)$$

Etapa B: Estimativa das dimensões, velocidade da paleta e triângulos de velocidade.

- Com o valor da vazão mássica, da constante R, e a estimativa dos valores de T_2 e p_2 (na *etapa A*, a temperatura T_2 é aproximada pela T_2' ideal; na *etapa B* ela é estimada por $\Delta h/c_p + c_p T_2'$ no bocal); estima-se a vazão volumétrica correspondente:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m} R T_2}{p_2} \quad (8.4)$$

- Calcula-se V_2 através de:

$$v_2 = \sqrt{2 \left[\eta_n (h_1 - h_2') + \frac{v_1^2}{2} \right]} \quad (8.5)$$

- A partir do valor da vazão volumétrica, calcula-se a área de escoamento necessária. Como os efeitos de atrito e vazamento foram desprezados, a área equivalente calculada (A_e) é igual à área de escoamento do bocal A_2 (na primeira iteração a velocidade axial v_a é aproximada por v_2 , nas seguintes utiliza-se o valor v_{2a} na base da paleta).

$$A_e = A_2 = \frac{\dot{V}}{v_a} \quad (8.6)$$

- Sendo D_m o diâmetro médio da seção, l a altura da paleta, e t a sua espessura e , temos:

$$\begin{aligned} l &= f(D_m) = k_l \cdot D_m \\ t &= f(D_m) = k_t \cdot D_m \\ \frac{\text{corda}}{\text{altura}} &= \text{"aspect_ratio"} = \text{"aspect"} \\ \frac{\text{corda}}{\text{passo}} &= \text{"solidity"} \\ N &= \text{número_de_paletas} \\ N &= \frac{\Pi \cdot \text{solidity} \cdot \frac{(1 - k_t)}{\text{aspect} \cdot k_l}}{\left(1 + \frac{(k_t \cdot \text{solidity})}{\text{aspect} \cdot k_l}\right)} \end{aligned} \quad (8.7)$$

- Estima-se então D_m , l e t que resultam em A_2 calculada, simplesmente sabendo que:

$$A_2 = \Pi \cdot D_m \cdot l - t \cdot l \cdot N \quad (8.8)$$

Valores na base da paleta

- Estima-se $v_{b,r}$ por

$$v_b = \Pi \cdot (D_m - l) \cdot \frac{n_{eixo}}{60} \cdot 2\Pi$$

(8.9)

- Estima-se v_{2R} por

$$v_{2R} = v_2 \cdot \sin(\alpha)$$

(8.10)

- Estima-se h_2 (real) por

$$h_2 = h_1 + \frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2}$$

(8.11)

- Estima-se o valor de T_2 correspondente a essa entalpia e p_2 igual ambiente

$$T_2 = \frac{[c_p \cdot (T_2') + h_2 - h_2']}{c_p}$$

(8.12)

- Estima-se número de Mach fazendo

$$v_s = \sqrt{k \cdot R \cdot T_2}$$

$$M = \frac{v_{2R}}{v_s}$$

(8.13)

➤ Estima-se β_2 por

$$\beta_2 = \arctg\left(\frac{v_{2a}}{v_2 \cdot \cos(\alpha) - v_b}\right), \text{ se } v_2 \cdot \cos(\alpha) - v_b > 0$$

(8.14)

$$\beta_2 = 180^\circ - \arctg\left(\frac{v_{2a}}{v_b - v_2 \cdot \cos(\alpha)}\right), \text{ se } v_2 \cdot \cos(\alpha) - v_b < 0$$

(8.15)

➤ Estima-se v_{3R}

$$v_{3R} = v_{2R}$$

(8.16)

➤ Estima-se v_{3a}

$$v_{3a} = v_{3R} \cdot \sin(\beta_3)$$

(8.17)

➤ Estima-se β_4 e v_3

$$\beta_4 = \arctg\left(\frac{v_{3a}}{v_{3R} \cdot \cos(\beta_3) - v_b}\right), \text{ se } v_b - v_{3R} \cdot \cos(\beta_3) < 0$$

(8.18)

$$v_3 = \frac{v_{3a}}{\sin(\beta_4)}$$

(8.19)

$$\beta_4 = 180^\circ - \arctg\left(\frac{v_{3a}}{v_b - v_{3R} \cdot \cos(\beta_3)}\right), \text{ se } v_b - v_{3R} \cdot \cos(\beta_3) > 0$$

(8.20)

$$v_3 = \frac{v_{3a}}{\sin(180^\circ - \beta_4)}$$

(8.21)

- Estima-se o trabalho específico na base, w

$$w = \frac{v_2^2 - v_3^2}{2}$$

(8.22)

- Estima-se a eficiência na base, η

$$\eta = 1 - \frac{v_3^2}{v_2^2}$$

(8.23)

- Estima-se $v_{w,r}$ (velocidade tangencial) na base por:

$$v_w = v_2 \cdot \cos(\alpha)$$

(8.24)

Valores na altura i da paleta

- O produto $v_{w,r}$ deve ser constante ao longo da altura. Desse modo, podemos calcular a velocidade tangencial na altura i por:

$$v_{wi} = \frac{v_{w,r} \cdot \left(\frac{D_m - l}{2} + i \cdot \frac{l}{5} \right)}{\left(\frac{D_m - l}{2} \right)}$$

(8.25)

- Estima v_2 na altura i por

$$v_{2i} = \sqrt{(v_{wi}^2 + v_{2a}^2)}$$

(8.26)

- Estima o grau de reação na altura média e no topo por

$$h_{2,n}' = h_1 - \frac{1}{\eta_n} \cdot \left(\frac{v_{2i}^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right)$$

$$\Delta h_n' = h_1 - h_{2,n}' \text{ queda entálpica ideal no bocal}$$

$$\Delta h_T' = h_1 - h_2' \text{ queda entálpica total ideal na turbina}$$

$$\Delta h_b' = \Delta h_T' \Delta h_n' \text{ queda entálpica ideal no estágio}$$

$$GR = \frac{\Delta h_b'}{\Delta h_T'} \cdot 100 \text{ (\%) grau de reação}$$

(8.27)

- Estima α na altura média i por

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{v_{2a}}{v_{wi}}\right)$$

(8.28)

- Estima v_b na altura i por:

$$v_{bi} = 2\Pi \cdot \left(\frac{D_m - l}{2} + i \cdot \frac{l}{5} \right) \cdot \frac{n_{eixo}}{60}$$

(8.29)

➤ Estima β_2 na altura média e no topo, por:

$$\beta_{2i} = \arctg\left(\frac{v_{2a}}{v_{bi} - v_{2i} \cdot \cos(\alpha_i)}\right), \text{ se } v_{2i} \cdot \cos(\alpha_i) - v_{bi} > 0$$

(8.30)

$$\beta_{2i} = 180^\circ - \arctg\left(\frac{v_{2a}}{v_{2i} \cdot \cos(\alpha_i) - v_{bi}}\right), \text{ se } v_{2i} \cdot \cos(\alpha_i) - v_{bi} < 0$$

(8.31)

➤ Estima v_{2R} na altura i por

$$v_{2Ri} = \frac{v_{2a}}{\sin(\beta_{2i})}$$

(8.32)

➤ Estima v_{3R} na altura i por

$$v_{3Ri} = \sqrt{2 \cdot \Delta h_{bi}' + v_{2Ri}^2}$$

(8.33) Onde: $\Delta h_b' = \left(h_i - \frac{1}{\eta_n} \cdot \left(\frac{v_{2i}^2 - v_i^2}{2} \right) \right)$

(8.34)

➤ Estima β_3 na altura i por

$$\beta_{3i} = \arcsen\left(\frac{v_{3a}}{v_{3Ri}}\right)$$

(8.35)

➤ Estima β_4 e v_3 na altura i por

$$\beta_{4i} = 180^\circ - \arctg\left(\frac{v_{3a}}{v_{bi} - v_{3Ri}}\right), \text{ se } v_{bi} - v_{3Ri} \cdot \cos(\beta_{3i}) > 0$$

(8.36)

$$v_{3i} = \frac{v_{3a}}{\sen(180^\circ - \beta_{4i})}$$

(8.37)

$$\beta_{4i} = \arctg\left(\frac{v_{3a}}{v_{3Ri} - v_{bi}}\right), \text{ se } v_{bi} - v_{3Ri} \cdot \cos(\beta_{3i}) < 0$$

(8.38)

$$v_{3i} = \frac{v_{3a}}{\sen(\beta_{4i})}$$

(8.39)

➤ Estima o trabalho específico w_i na altura i por

$$w_i = \frac{v_{2i}^2 - v_{3i}^2}{2} + \frac{v_{3Ri}^2 - v_{2Ri}^2}{2}$$

(8.40)

➤ Estima a eficiência na altura i por

$$\eta_i = 1 - \frac{v_{3i}^2}{v_{2i}^2}$$

(8.41)

Cálculo dos valores médios

➤ Estima os valores médios ao longo de toda paleta, por:

$$w_{\text{médio}} = \frac{\left(\sum_i w_i \right) + w_{\text{base}}}{i + 1}$$

(8.42)

$$\eta_{\text{médio}} = \frac{\left(\sum_i \eta_i \right) + \eta_{\text{base}}}{i + 1}$$

(8.43)

$$\dot{m}_{N+1} = \frac{\dot{W}_{\text{int}}}{w_{\text{médio}} - w_c}$$

(8.44)

Etapas C: Verificação de convergência.

Critério de convergência:

$$0,99 \cdot \dot{m}_N \leq \dot{m}_{N+1} \leq 1,01 \cdot \dot{m}_N$$

(8.45)

Etapa D: Ao termino do processo iterativo, os valores finais obtidos são impressos.

9.3 Dados de Entrada

De acordo com o ciclo proposto (Fig. 23) os gases de entrada da microturbina são provenientes da “exaustão” da célula de combustível, assim teremos:

- Temperatura de entrada = $800^{\circ}\text{C} = 1073\text{ K}$
- Pressão de entrada = 3 atm

E as constantes termodinâmicas utilizadas foram:

- $k = 1,400$
- $R = 0,287\text{ kJ/kg K}$
- $c_p = 1,0035$

9.4 Programa em Visual Basic

Foi criada uma rotina em Visual Basic para que fossem realizados os cálculos do equacionamento proposto. Na “tela” inicial do programa existem caixas a serem preenchidas com alguns dados de entrada da turbina, condições térmicas e constantes utilizadas. Após algumas iterações o programa gera os valores resultantes e os imprime nas caixas de saída. A rotina possui algumas iterações de forma a obter o resultado mais consistente possível.

A seguir podemos ver a “tela” inicial do programa:

MicroTurbina versão 2.0

DIMENSIONAMENTO DE MICRO TURBINA

Dados do Equipamento	Condições de Entrada	Constantes Termodinâmicas
Pot. Útil desejada (kW): 1,7	p entrada, comp (kPa): 100	k: 1,4
Relação de Pressões: 3	T entrada, comp (K): 298	cp (kJ/kg.K): 1,0035
Rotação do Compressor (rpm): 200000	T1 (entrada da turbina) (K): 1073	R (kJ/kg.K): 0,287
Eficiência do Bocal (de 0 a 1): 0,97	v1 (veloc. ent.) (m/s): 0	
Alpha (Graus): 10		
Ângulo Beta3 (Graus): 40		

CALCULAR

Resultados

Resumo

Figura 29 – Tela inicial do programa

Os dados de entrada estão listados abaixo:

Dados do Equipamento

- $P_{\text{útil, desejada}} = 1,7 \text{ kW}$
- Relação de pressões = 3
- Rotação do compressor: $n_{\text{eixo}} = 200.000 \text{ rpm}$
- Eficiência do bocal: $\eta_n = 0,97$

Condições de Entrada e Saída

- $P_{\text{entrada, compressor}} = 100 \text{ kPa}$
- $T_{\text{entrada, compressor}} = 298 \text{ K}$
- $T1 = T_{\text{entrada, turbina}} = 1073 \text{ K}$
- $v_1 = 0 \text{ m/s}$ (velocidade de entrada na turbina desprezada)

Constantes Termodinâmicas

- $k = 1,4$

- $c_p = 1,0035 \text{ kJ/(kg.K)}$
- $R = 280 \text{ kJ/(kg.K)}$

9.5 Resultados

A partir do programa desenvolvido podemos avaliar os efeitos da variação dos ângulos de saída do bocal e saída da paleta móvel, representados respectivamente por α e β sobre a eficiência do estágio e o número de Mach da solução. Estabelecemos os seguintes critérios para seleção:

- Eficiência Máxima
- Número de Mach < 1 , ou seja, queremos que o escoamento nas paletas móveis seja subsônico, de forma a evitar choques e desgaste excessivo.

Após alguns testes do programa escolhemos valores de α e β em que o dimensionamento era possível e combinamos todas as possibilidades de forma a obter as matrizes abaixo.

Tabela 3 - Eficiência do estágio para combinações de α e β

EFICIÊNCIA (%)		alpha				
		10	15	20	25	30
beta	10	72,65	64,06	59,13	55,84	53,70
	15	71,90	63,45	58,62	57,93	52,14
	20	70,85	62,59	61,02	56,52	52,14
	25	69,50	61,50	59,53	54,72	53,99
	30	67,87	60,18	55,14	52,56	52,69
	35	65,97	61,45	56,19	53,53	51,22
	40	66,51	58,96	53,11	51,80	49,62
	45	63,62	54,20	49,72	49,79	47,91
	50	60,51	53,46	50,09	47,63	45,80
	60	54,66	46,46	42,97	40,78	41,49

	70	49,07	43,69	38,10	38,19	
	80	42,16	39,44			

Tabela 4– Número de Mach para combinações de α e β

N° MACH		alpha				
		10	15	20	25	30
beta	10	1,020	1,072	1,105	1,130	1,152
	15	1,017	1,070	1,102	1,117	1,149
	20	1,014	1,066	1,084	1,117	1,149
	25	1,009	1,062	1,082	1,117	1,134
	30	1,003	1,056	1,093	1,117	1,130
	35	0,996	1,033	1,073	1,099	1,125
	40	0,966	1,027	1,073	1,093	1,119
	45	0,958	1,035	1,073	1,086	1,111
	50	0,949	1,013	1,048	1,076	1,103
	60	0,919	1,001	1,039	1,068	1,078
	70	0,882	0,946	1,007	1,019	
	80	0,877	0,911			

Os valores em cinza claro se encontram fora dos critérios estabelecidos. Os valores em amarelo representam as melhores soluções para o projeto em questão. Para α temos apenas uma opção, logo o ângulo de saída dos bocais fica definido em 10° . Para escolher β considerando as três possibilidades, selecionamos o ângulo de 40° , onde teremos a maior eficiência possível.

Ao rodarmos novamente o programa utilizando os valores dos ângulos finais, temos, para $\alpha = 10^\circ$ e $\beta = 40^\circ$:

Dados do Equipamento:

- Potência Útil: 1,7 kw
- Relação de Pressões: 3
- Rotação: 200000 rpm
- Vazão Mássica: 0,0136 kg/s
- Eficiência do Estágio: 66,516%

Dimensões:

- Diâmetro Médio: 27,39 mm
- Altura da Paleta: 4,1 mm
- Espessura da paleta: 1,36 mm
- Largura da Paleta: 3,9 mm
- Número de Paletas: 18

Condições de Entrada e Saída:

- Pressão Ambiente: 100 kPa
- Temperatura Ambiente: 298 K
- Temperatura de Entrada dos Gases da Turbina: 1073 K
- Temperatura de Saída dos Gases da Turbina: 793,4 K
- Número de Mach: 0,9661
- Velocidade da Paleta: 243,83m/s
- Velocidade de saída dos gases da Turbina: 391,48m/s

Verificando os resultados impressos na tela final do programa podemos perceber também algumas variações entre valores calculados na base da paleta e no topo desta:

Tabela 5 – Comparação entre valores na base e no topo da paleta móvel

	base	topo
Velocidades (m/s)		
Velocidade B	243,83	329,89
V2	784	586,69
V2R	545,52	276,61
V3	391,48	382,24
V3R	545,52	596,1
Ângulos		
Alpha	10°	13,41°
Beta2	14,45°	29,48°
Beta3	40°	36,03°
Beta4	63,6°	66,54°
Potência específica	230,7 kJ/kg	238,45 kJ/kg
Eficiência do Estágio	75,06%	57,55%

As variações entre os ângulos são decorrentes de uma pequena torção (*twist*) que paleta deve possuir no decorrer de sua altura de forma a obter um melhor rendimento.

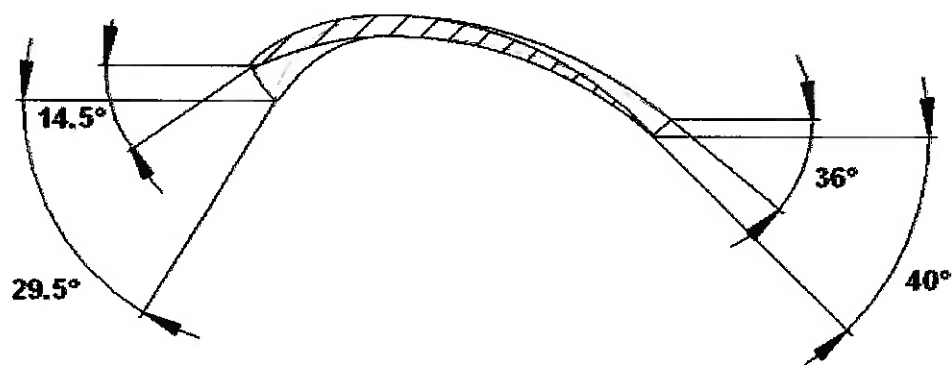


Figura 30 – “*Twist*” da paleta em 2D

Existem também variações para as velocidades entre a base e o topo. Como o produto $v \cdot r$ é constante, a medida que nos distanciamos da base temos uma redução da velocidade. É importante ressaltar que o projeto foi efetuado de forma a obtermos uma turbina de reação apenas, porém à medida que nos afastamos do raio médio surge um pequeno grau de reação. Esse fato que não descaracteriza a classificação inicial da turbina.

10 Materiais

As turbinas a gás diferem dos demais tipos de motores primários – turbinas a vapor, motores de combustão interna - uma vez que precisam operar continuamente em altas temperaturas para atingir uma eficiência razoável. Esta situação leva a uma ênfase nos problemas associados com projetos nos quais os materiais não obedecem a Lei de Hooke, e quando ocorre o fenômeno conhecido como fluência pelo qual uma deformação continua de um componente ocorre ao longo do tempo sob tensão em alta temperatura. As palhetas da turbina são os componentes mais críticos: as extremas condições de tensão, temperatura e corrosão fazem de seu material um desafio. Outras partes da turbina também apresentam problemas, mas em um grau mais baixo. A interação de tensão, temperatura e corrosão formam um mecanismo complexo, que ainda não pode ser previsto pela tecnologia existente. Materiais utilizados sob estas severas condições devem ser capazes de limitar a fluência, possuir alta tensão de ruptura, resistência à corrosão, boa tensão de fadiga, baixos coeficientes de expansão térmica, alta condutividade térmica para reduzir os esforços térmicos e alta resistência à fluência. O mecanismo de falha de uma palheta de turbina é relatado primeiramente devido à fluência e à corrosão em secundariamente devido à fadiga térmica. O material que satisfaça todos esses critérios de projeto ainda não foi desenvolvido. A demanda atual é atendida por ligas metálicas especiais. Materiais exóticos, como compósitos eutéticos e cerâmicos, estão sendo estudados para uso futuro. Antes da seleção do material, será discutido o comportamento geral dos metais.

10.1 Fluência e Ruptura

O ponto de fusão dos diferentes metais varia consideravelmente, e suas resistências em várias temperaturas são diferentes. Em temperaturas baixas, todos os materiais deformam elasticamente, então plasticamente, e são independentes do tempo. No entanto, em temperaturas altas, deformação é notada sob condições de carregamento constante. Este comportamento dependente do tempo, sob alta

temperatura é chamado ruptura por fluência. A figura 1 mostra uma curva de fluência esquemática em vários estágios. A deformação inicial ou elástica na primeira região que leva a uma região de deformação plástica em uma taxa decrescente. Então uma taxa de deformação plástica nominalmente constante é seguida pelo aumento da taxa de deformação até a fratura.

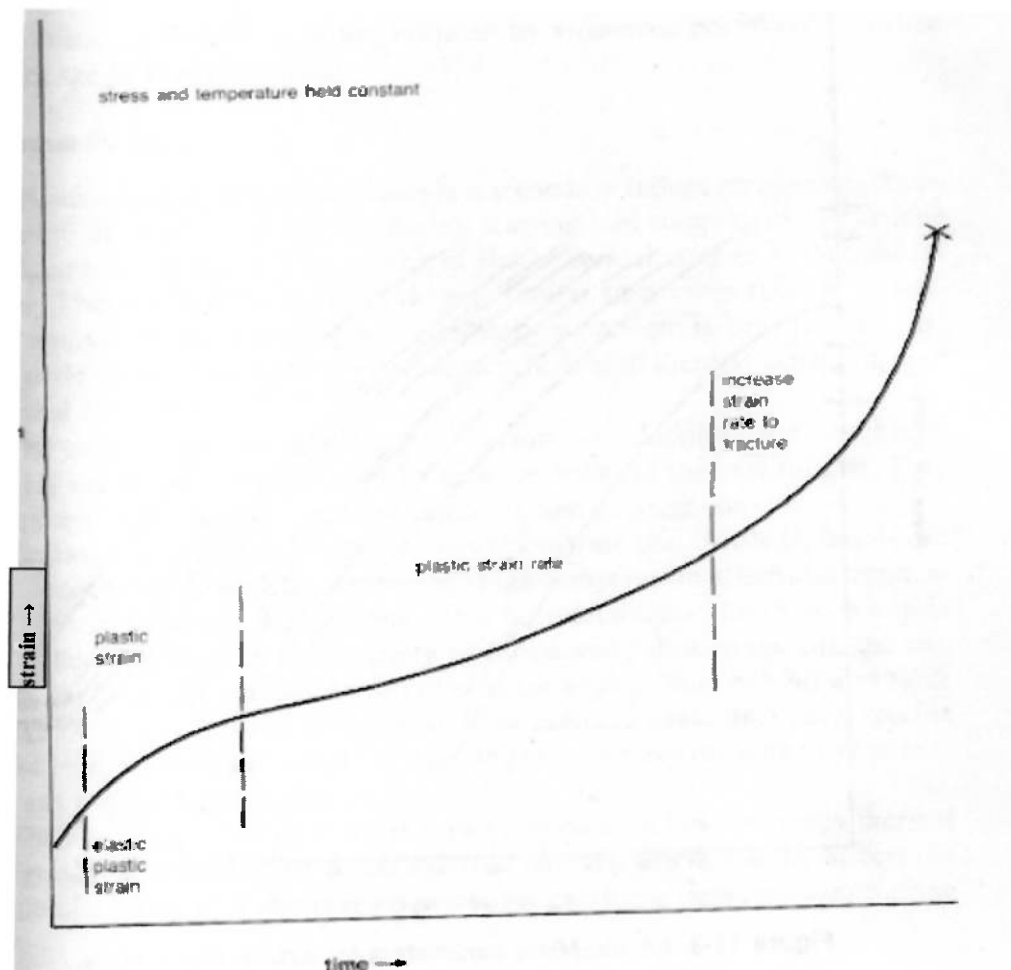


Figura 31-Curva de deformação sob carregamento constante em função do tempo

A natureza da fluência depende do material, da tensão, da temperatura, e do ambiente. Fluência limitada (menor que 1%) é desejada para aplicação em palhetas de turbina. Superligas fundidas falham com uma elongação mínima. Estas ligas falham fragilmente, mesmo operando sob temperaturas elevadas.

Dados da tensão de ruptura são frequentemente apresentadas em uma curva de Larson-Miller que indica a performance de uma liga. É amplamente utilizada para

descrever as características de tensão-ruptura de ligas, sob uma grande faixa de temperatura, vida e esforços, sendo também utilizadas na comparação das propriedades de muitas ligas em temperaturas elevadas. O parâmetro de Larson-Miller P_{LM} é dado:

$$P_{LM} = T(20 + \log t) \times 10^{-3}$$

onde T é a temperatura (Rankine), t é o tempo de ruptura, em horas.

Os parâmetros de Larson-Miller estão plotados na figura 2 para ligas de palhetas de turbina. Uma comparação das curvas ligas A-286 e Udimet 700 revela a diferença nas propriedades. O tempo de vida de operação (horas) das ligas pode ser comparado para esforços e condições de temperatura similares.

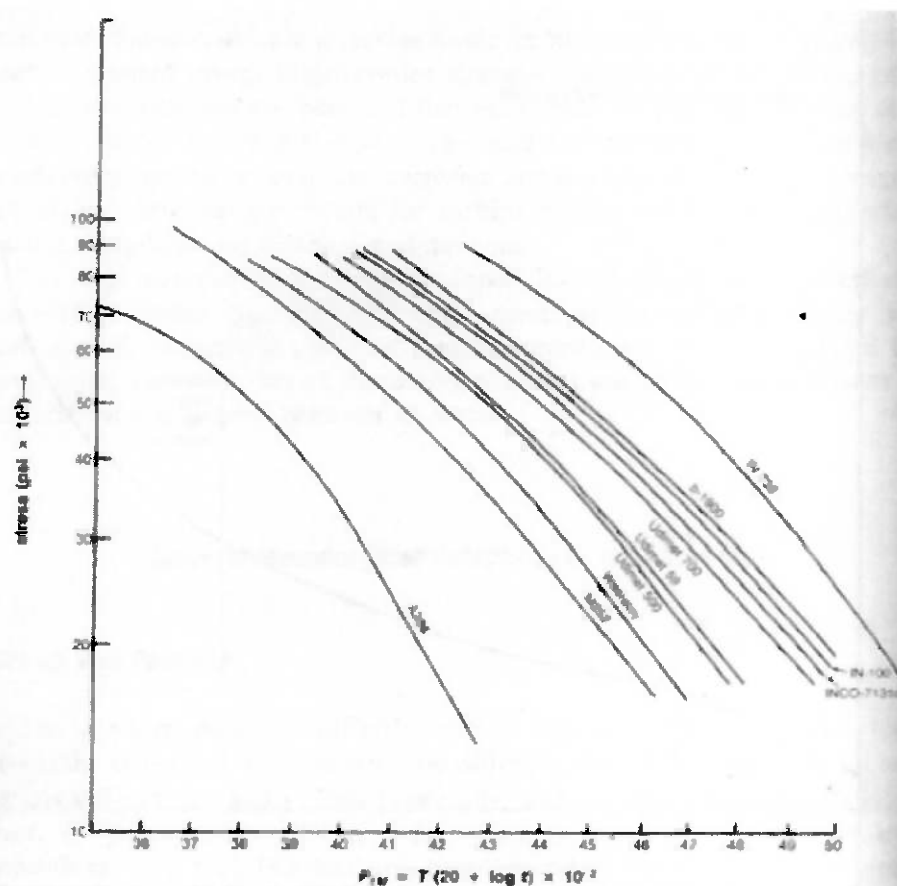


Figura 32 – Parâmetros de Larson-Miller para ligas de palhetas de turbina

10.2 Ductilidade e Fratura

A ductilidade é comumente medida pela deformação e redução em área. Em muitos casos os três estágios mostrados na figura 1 não estão todos presentes. Sob altas temperaturas ou esforços, muito pouca fluência é vista, enquanto no caso das superligas fundidas, a falha ocorre com uma pequena extensão. Esta quantidade de extensão é a ductilidade. Em uma curva fluência x tempo há duas deformações de interesse. Uma deformação é da taxa de deformação plástica, e a segunda deformação é a deformação total, ou deformação na fratura. A ductilidade é errática em seu comportamento e não é sempre reproduzível, mesmo sob condições de laboratório. É afetada pelo tamanho do grão, a forma, e as técnicas usadas na manufatura. Uma fratura que resulta da deformação pode ser de dois tipos: dúctil ou frágil, dependendo da liga. Uma fratura frágil é intergranular com pequena ou sem deformação. A fratura dúctil é transgranular. As ligas das palhetas de turbinas tendem a demonstrar baixa ductilidade nas temperaturas de operação. Como resultado, descontinuidades na superfície são iniciadas por erosão ou corrosão, e as trincas se propagam rapidamente.

10.3 Fadiga térmica

A fadiga térmica das palhetas é um mecanismo de falha secundário. Diferenciais de temperatura desenvolvidos durante a partida e a parada da turbina produzem tensões térmicas. O ciclo destas tensões térmicas é a fadiga térmica. A análise da fadiga térmica é essencialmente um problema de transferência de calor e propriedades tais como módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, e condutividade térmica. Os mais importantes fatores metalúrgicos são ductilidade e tenacidade. Materiais altamente dúcteis tendem a ser mais resistentes a fadiga térmica. Estes também se mostram mais resistentes à nucleação e à propagação das trincas.

Programas de pesquisa para demonstra que materiais frágeis podem ser bem sucedidamente utilizados para aplicações estruturais sob altas temperaturas. De estudos já realizados, estabeleceu-se que o nitreto de silício e o carbetto de silício, em sua variedade de formas e fabricações, são dois candidatos para a engenharia cerâmica futura. Ambos exibem uma disponibilidade apropriada, uma resistência

desejável sob temperaturas elevadas, e tem e fácil manufatura do fazê-los para componentes de turbinas a gás.

10.4 Corrosão

O uso de superligas a base de Níquel como palheta de turbinas em uma atmosfera real de uso final produz uma deterioração das propriedades do material, que pode ser resultado da erosão ou corrosão. A erosão resulta das partículas duras nas palhetas e removendo material de sua superfície. As partículas podem ter entrado através da entrada de ar da turbina ou dos depósitos dentro da câmara de combustão. A corrosão ocorre basicamente por dois processos: a corrosão à quente, que é uma acelerada oxidação das ligas causada pelo depósito de Na_2SO_4 , resultado da ingestão de sais na turbina e enxofre da combustão do combustível. No caso do sistema integrado com a célula de combustível, este efeito é minimizado: o gás natural é desulfurizado antes de entrar na célula de combustível, e sua quebra nesta “câmara de combustão” - que é como funciona a célula de combustível neste sistema - não é uma combustão propriamente dita, ocorrendo uma reação química de oxidação do gás natural para a produção de gás carbônico e água. Assim, é reduzido o efeito de enxofre no sistema, aumentando a vida útil das palhetas. Quando uma liga metálica é exposta a um gás oxidante, como o ar, se forma um filme de óxido contínuo na superfície do metal, que serve como uma camada de proteção contra o desgaste. Ao romper-se esta camada o desgaste ocorre de forma muito mais acelerada. Quando são usados óleos pesados, com alto teor de Vanádio, acontece a corrosão mais crítica, denominada mesmo de catastrófica: é gerada uma célula galvânica. A corrosão galvânica destrói a camada de proteção de óxido, aumenta brutalmente a taxa de oxidação e leva à falha do material.

A extensão da corrosão depende da quantidade de níquel e cromo na liga. O cromo reduz sensivelmente a corrosão nos contornos de grão, enquanto liga com altos teores de níquel tendem a oxidar ao longo dos contornos de grão. Palhetas com 10 a 20% de cromo envelhecidas sofrerão corrosão em temperaturas maiores que 760 °C. A adição de cobalto à liga aumenta a temperatura na qual o ataque ocorre.

Uma liga de alto teor de níquel é usada pra o aumento da resistência em temperaturas elevadas, e cerca de 20% de cromo é desejado para a resistência à corrosão.

Uma composição ótima para satisfazer a interação entre tensões, temperatura e corrosão ainda não foi desenvolvida.

10.5 Materiais para turbina a gás

A partir de 1950, avanços importantes foram feitos no campo das ligas para palhetas de turbinas, com um aumento da temperatura de operação que estas poderiam suportar de cerca de 8 °C por ano. Este crescimento é fruto da combinação da evolução do material, desenvolvimento do projeto, como a adição de refrigeração das palhetas a ar, e avanços na tecnologia dos combustíveis.

Ligas a base de níquel fundidas à vácuo, robustecida através de tratamentos térmicos para o endurecimento, precipitação e solução de outros materiais (principalmente cromo) têm se mostrado mais resistentes que as demais nestas severas condições de trabalho, sendo assim as preferidas para a confecção das palhetas. Ligas baseadas em cobalto são usualmente usadas nos bocais de entrada de ar na turbina. A diferença entre as resistências das ligas de níquel, como a I738 e a U500 e as de cobalto, a FSX-414 é mostrada na figura 2.

Os discos e espaçadores são construídos, com excelentes resultados, em uma liga baseada em aço austenítico, a A286. Incomel 706 e 718, duas ligas ferrosas com altos teores de níquel, cromo e cobalto tem sido cada vez mais usadas na fabricação tanto dos discos quanto das palhetas das turbinas, pelo fato de possuírem propriedades mecânicas sob altas temperaturas comparáveis as das ligas aqui já apresentadas, mostrando uma “trababilidade” maior que estas ligas, com métodos de fabricação mais simples. A tabela a seguir mostra as composições químicas nominais das principais ligas usadas para a fabricação dos diferentes componentes de uma turbina a gás.

Tabela 6- Ligas de Alta Temperatura- Composição Nominal (%)

	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	Cb	V	C	B	Ta
Palhetas													
S816	20,0	20,0	Balanço	4,0	4,0	4,0	—	—	4,0	—	0,40	—	—

NIM 80A	20,0	Balanço	—	4,0	—	—	2,30	1,00	—	—	0,05	—	—
M-252	19,0	Balanço	10,0	2,0	—	10,0	2,50	0,75	—	—	0,10	—	—
U-500	18,5	Balanço	18,5	—	—	4,0	3,00	3,00	—	—	0,07	0,01	—
RENE 77	15,0	Balanço	17,0	—	—	5,3	3,35	4,25	—	—	0,11	0,02	—
IN 738	16,0	Balanço	8,5	0,2	2,6	1,8	3,40	3,40	0,9	—	0,11	0,01	1,75
GTD 111	14,0	Balanço	9,5	—	4,0	1,5	3,00	5,00	—	—	—	0,01	3,00
Bocais													
X-40	25,0	10,0	Balanço	1,0	8,0	—	—	—	—	—	0,50	0,01	—
xX-45	25,0	10,0	Balanço	1,0	8,0	—	—	—	—	—	0,25	0,01	—
FSX	29,0	10,0	Balanço	1,0	7,0	—	—	—	—	—	0,25	0,01	—
N-155	21,0	20,0	20,0	Balanço	2,5	3,0	—	—	—	—	0,20	—	—
Discos													
Cr-Mo-V	0,1	0,5	—	Balanço	—	1,2	—	—	—	0,50	0,30	—	—
A-286	0,2	25,0	—	Balanço	—	1,2	2,0	0,30	—	0,25	0,08	0,01	—
M-152	0,1	2,5	—	Balanço	—	1,7	—	—	—	0,30	0,12	—	—
IN 706	14,5	41,0	3,0	Balanço	—	—	1,7	0,40	3,0	—	0,06	0,01	—
IN 718	17,0	45,0	5,0	Balanço	—	—	3,3	0,50	4,0	—	0,08	0,01	—

Outros materiais que têm sido bastante estudados e vêm apresentando resultados que indicam um futuro promissor são os compósitos cerâmicos. Por sua natureza, os compósitos cerâmicos são frágeis, o que impossibilitaria seu uso em turbinas pelas observações previamente feitas sobre o comportamento dos materiais em operação sob temperaturas elevadas, mas a adição de substâncias como o alumínio tem tornando-nos mais dúcteis. As principais vantagens que o uso de cerâmicas trariam ao projeto de uma turbina seriam o peso – um composto cerâmico pesa cerca de 40% menos que uma superliga metálica-; a tolerância a contaminantes como o sódio e vanádio - aumentado assim a eficiência no uso de combustíveis “pesados” (e de baixo custo)-, e sobretudo, o custo do material: cerâmicas custam cerca de 5% do custo das superligas.

10.6 Revestimentos para materiais de turbinas a gás

Revestimentos para palhetas foram desenvolvidos originalmente para a indústria aeronáutica para as turbinas de aviões. As temperaturas dos metais para serviço pesado em turbinas a gás são menores do que aquelas encontradas nas turbinas aeronáuticas, mas, no entanto, estão mais sujeitas que estas Ao ataque da

corrosão.. a presença de uma pequena quantidade de partes por milhão (PPM) de sódio e enxofre é suficiente para causar em extenso dano por corrosão à quente. O enxofre é um contaminante natural dos combustíveis, enquanto o sódio pode ser introduzido no sistema desta mesma forma, pelo combustível ou na atmosfera de locais situados próximos do mar ou em áreas contaminadas. A corrosão à quente é distintamente diferente da oxidação pura encontrada no ambiente aeronáutico. Assim, as capacidades dos revestimentos são diferentes para ambos os casos, e a evolução dos revestimentos para turbinas a gás a partir daqueles originalmente usados neste ambiente tem sido bastante grande: revestimentos de hoje são de 10 a 20 vezes melhores que os de 20 anos atrás.

Um teste comparativo foi feito com palhetas de I738 recobertas e sem nenhum revestimento em um ambiente extremamente severo. A vida útil das palhetas não recobertas foi de cerca de 25.000 horas, enquanto o revestimento adicionou a esta vida 20.000 horas. Este teste foi feito para uma fina camada de revestimento RT-22, platina uniformemente pulverizada na superfície, seguida pela deposição de uma camada de alumínio e cromo, de 0,006 mm de espessura. Funciona como uma “pele” da palheta, extremamente resistente à corrosão.

10.7 Avanços tecnológicos das últimas décadas

A partir do início dos anos 90, ocorreu uma verdadeira revolução na fabricação de palhetas de turbina. Desenvolveram-se novas técnicas aplicadas à manufatura dos componentes das turbinas a gás. Para as palhetas, a principal inovação envolve a solidificação direcional das superligas convencionais visando produzir contornos de grãos alongados ou componentes de cristais unitários (fig 33).

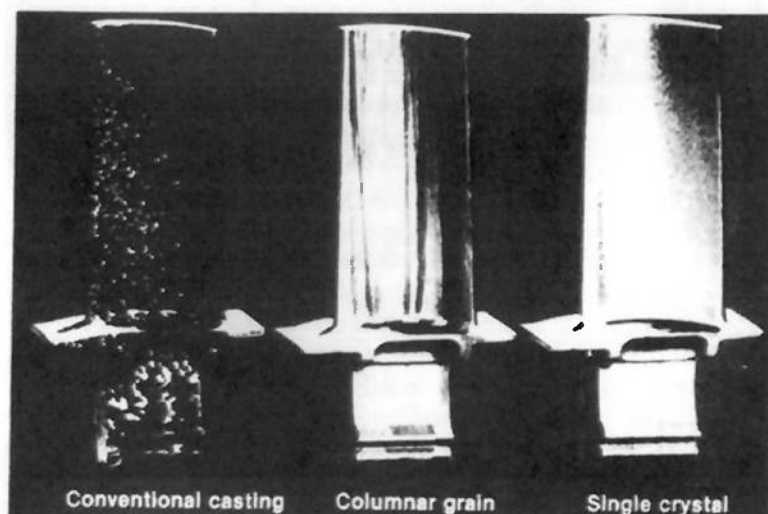


Figura 33. Solidificação convencional e direcional utilizada para a preparação de palhetas

Moldes helicoidais são usados para fabricar pás de turbinas, cuja estrutura é monocristalina; múltiplos grãos são formados inicialmente e crescem na seção helicoidal do molde. Os moldes são projetados para permitir o desenvolvimento de dois tipos de pás de turbina a partir do mesmo monocristal. O alinhamento das pás ao longo da direção do eixo $\langle 100 \rangle$ paralelo ao desgaste centrífugo permite uma redução de 40% no módulo de elasticidade associando baixa deformação plástica durante um ciclo de fadiga térmico; cerca de seis a dez vezes é aumentada a resistência à fadiga térmica. Desde que os contornos de grãos sejam eliminados, suas influências sobre escorregamento, cavitação e quebra são inutilizadas. A figura 34 mostra o desenvolvimento das ligas e sua capacidade de utilização sob altas temperaturas.

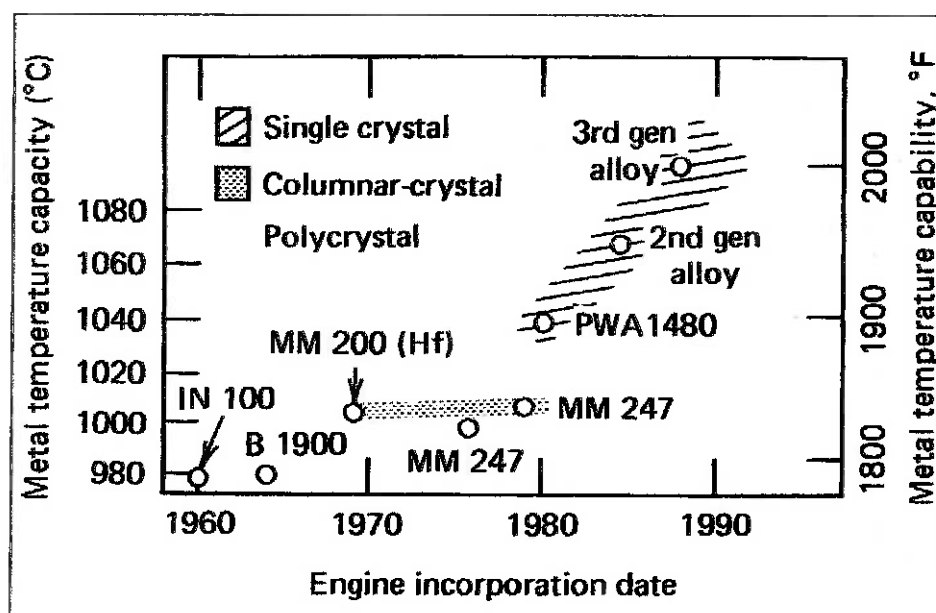


Figura 34 - Desenvolvimento da capacidade de resistência ao calor das palhetas.

A figura 35 mostra o drástico resultado do emprego da solidificação direcional na manufatura das palhetas, com aumentos de até 10 vezes tanto na resistência à fluência quanto na resistência à fadiga térmica.

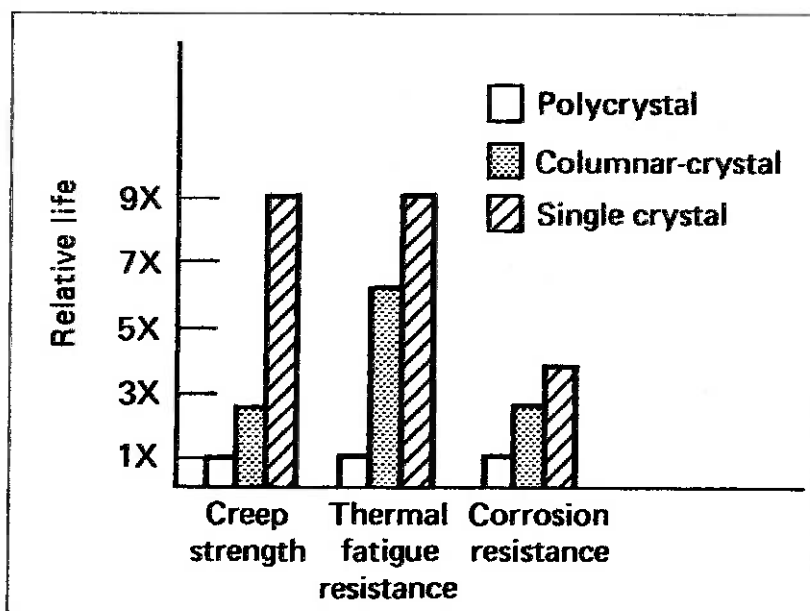


Figura 35 - Comparativo de resistência a temperatura e resistência a corrosão do Policristalino, e Monocristalino.

Além disso, não é mais necessária a adição de elementos como Hf, B, C e Zr com o intuito de aumentar a dureza à quente e ductilidade dos contornos de grãos. Sem esses elementos, o ponto de fusão é aumentado em aproximadamente 120°C e a composição das ligas é simplificada. Anexando solidificação unidirecional às composições das ligas eutéticas, é possível produzir componentes de ligas eutéticas, as quais possuem propriedades encontradas nas superligas convencionais. Estas ligas contêm uma matriz γ/γ' que é reforçada com alta resistência, essas fortes partículas são orientadas paralelamente às direções de máximo desgaste. Apesar das propriedades dessas ligas serem muito boas, as taxas de solidificação permitidas para manufatura são muito menores que aquelas permitidas de solidificação de colunas direcionalizadas ou micro-estruturas monocristalinas.

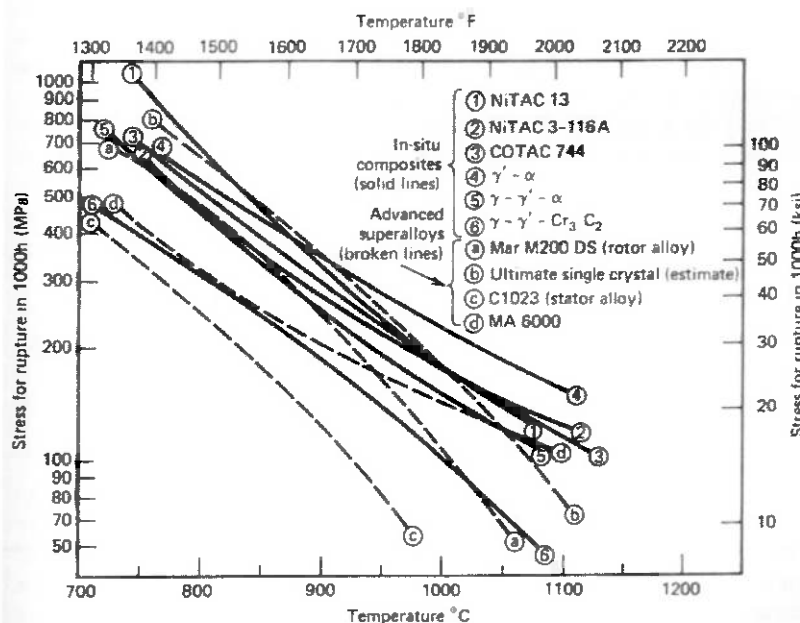


Figura 36 – Gráfico da Temperatura pela Tensão de Ruptura

Uma outra técnica nova de fabricação envolve forjamento em condições inferiores à superplástica. Neste processo, o material é primeiro extrudado à quente

até abaixo da temperatura solvus de γ , o que causa recristalização espontânea do material. Desde que os precipitados da fase γ' na solução sólida da matriz de níquel tendam a restringir o crescimento dos grãos, o diâmetro dos grãos recristalizados permanece relativamente estável entre os valores de 1 a 5 μm . Segue-se então um processo de forjamento isotérmico a uma taxa de tensão que permite que o material deforme superplasticamente. Nesse momento, o componente criado superplasticamente é tratado em solução para aumentar o tamanho do grão, com a finalidade de aumentar a resistência à fluência. Uma das grandes vantagens do forjamento superplástico é que este habilita a produção de partes próximas da dimensão final, reduzindo assim os custos finais das máquinas.

Com a adição significativa de formadores de fase γ' , tais como Al e Ti, os produtos de ligas mecanicamente endurecidas por dispersão de óxidos (MA/ODS) possuem excelente dureza dentro de um grande intervalo de temperaturas. As tensões de ruptura destas ligas são mostradas na figura 37.

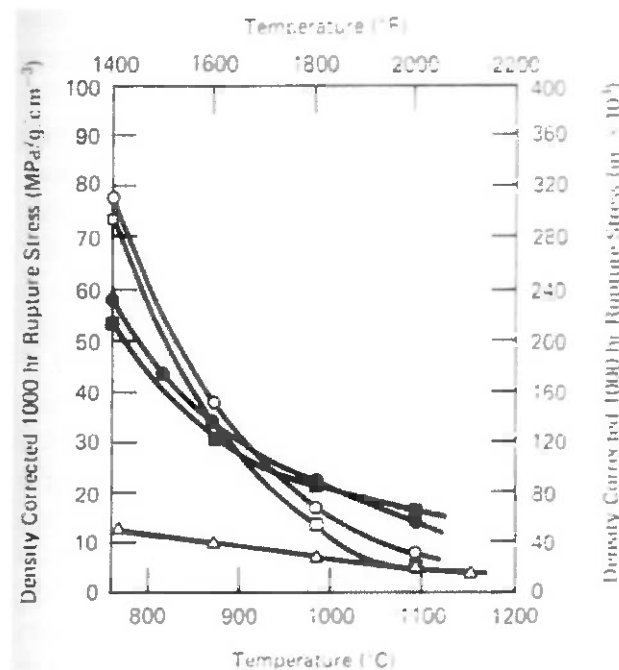


Figura 37 - Gráfico de Temperatura por Tensão de Ruptura

Como já se era esperado, ligas com solidificação direcional (DS) e monocristalinas possuem tensão de ruptura superior às duas ligas ODS até uma temperatura de aproximadamente 900°C sendo invertido após esta temperatura. A altas temperaturas, próximas da temperatura de dissolução da fase γ , as partículas dessa fase tendem a voltar a solução. A superioridade dos materiais MA com relação as ligas de solidificação direcional e monocristalinas à temperaturas superiores a 900°C deve-se a influência das partículas de Y_2O_3 que permanecem na microestrutura e não levam o material a altos índices de endurecimento.

Atualmente a atenção está focada na taxa de fluência incomum e na dependência das ligas ODS de sua resistência à fadiga. Nessas ligas a aparente energia de ativação do processo de fluência é duas ou três vezes maior do que a energia de ativação na autodifusão. A resistência à fadiga dessas ligas ODS mostram

uma forte dependência com relação à tensão aplicada e a partir de um certo ponto a resistência à fadiga aumenta com o aumento da tensão.

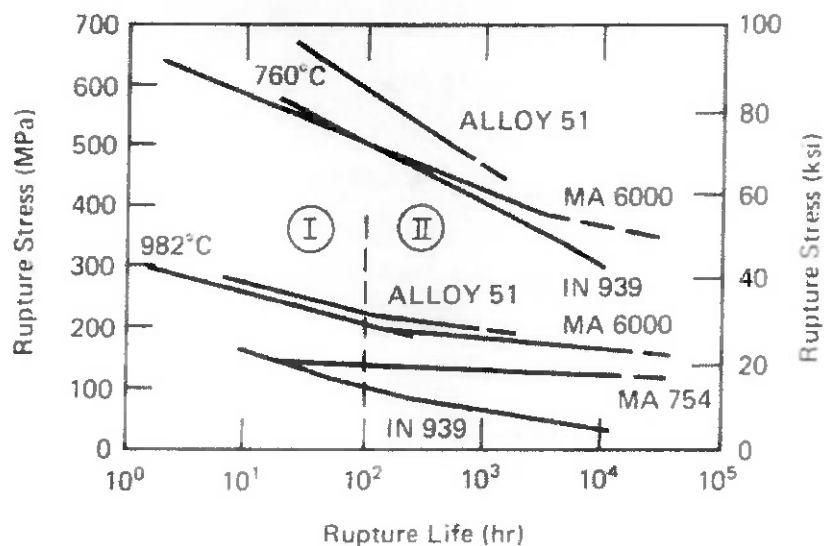


Figura 38 – Gráfico de Vida Útil por Tensão de Ruptura.

Como pode se observar na figura acima, as ligas MA6000 e ALLOY 51 apresentam duas regiões com comportamentos distintos. A região I corresponde a altas tensões e temperaturas medianas onde predominam os formadores da fase γ . A temperaturas mais elevadas, menores tensões e ciclos mais longos predomina a fase de dispersão de Y_2O_3 .

11 Componentes do sistema

A ênfase deste trabalho é o projeto da turbina de expansão. No entanto, cabe aqui uma breve descrição dos demais componentes e acessórios necessários para uma central de geração de energia, baseada na turbina a gás, e neste caso específico, baseado também na célula de combustível. A planta opera por meio de um ciclo contínuo que normalmente consiste de uma série de eventos: a compressão de ar tomado da atmosfera, aumento da temperatura do ar através da combustão à pressão constante, expansão dos gases quentes através da turbina de expansão e, finalmente, a descarga dos gases para a atmosfera. Assim temos três elementos mecânicos principais: o compressor, a câmara de combustão e a turbina de expansão, além de uma série de outros componentes que visam o aumento da eficiência do ciclo, como o recuperador de calor, e acessórios necessários para o funcionamento do sistema, como bombas de combustível, filtros de ar, sistema de lubrificação entre outros. Neste capítulo mostrar-se-ão os principais componentes e sua função na planta, sem contar, obviamente a turbina de expansão.

11.1 Compressor

O compressor é o primeiro elemento mecânico básico no ciclo da turbina a gás, responsável pelo aumento da pressão do ar admitido de atmosfera que seguirá para a célula de combustível. Maiores detalhes sobre parâmetros importantes como a rotação e relação de compressão deste componente podem ser vistos no capítulo 8.

11.2 Câmara de combustão

Não teremos uma câmara de combustão propriamente dita, a célula de combustível fará o seu papel, como dito acima com grandes vantagens, como a geração de energia já nesse ponto do ciclo e a diminuição dos efeitos da poluição, uma vez que não acontece a queima do combustível, não havendo assim a liberação de poluentes.

Aqui cabem alguns comentários sobre o dimensionamento desta câmara de combustão.

Como já dito em seções anteriores, cada célula individual de combustível é um tubo de 22 mm de diâmetro por 1500 mm de comprimento, e produz cerca de 210 W. Para que sejam atendidos os níveis de geração de potencia desejada para a instalação, precisar-se-á de um pacote com 16 destas células, dispostas num arranjo como o que se segue:

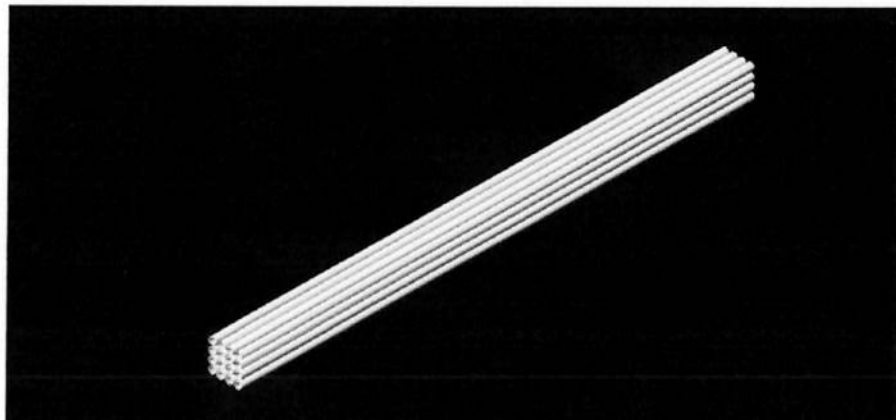


Figura 39 – Célula de combustível

11.3 Recuperador de calor

O recuperador de calor consiste de um trocador de calor que se utiliza do fluxo de gases quentes do escape da turbina para aquecer o ar que passou pelo compressor antes da entrada na célula de combustível, para aumentar a eficiência das reações químicas. Estima-se que, dependendo da eficiência do recuperador, o calor recuperado permite uma redução de 25 a 50% do consumo de combustível. Também com este intuito o gás natural é pré-aquecido no recuperador.

11.4 Sistema de combustível

O sistema de combustível consiste da tubulação, conexões e das bombas requeridas para que o combustível alcance a câmara de combustão a uma pressão suficiente para que se efetue uma injeção satisfatória, além do sistema de controle - válvulas e reguladores - disposto entre a entrada da máquina e da câmara de combustão. A pressão requerida para injetar o gás natural é essencialmente a pressão

de descarga do compressor, mais as quedas de pressão no sistema de controle e nas conexões.

11.5 Sistema de partida

A função do sistema de partida é acelerar a turbina a uma velocidade suficiente para que seja capaz de completar a partida com sua própria força. Existem muitos tipos diferentes de sistemas de arranque, com suas vantagens, desvantagens e limitações, como sistemas elétricos com motor e baterias, sistema hidráulicos e até choque em alta pressão do ar nas palhetas da turbina. Pela simplicidade, e pelo fato de termos um fonte de energia ao alcance, a célula de combustível, para nossa instalação a melhor alternativa seria o uso de um motor elétrico com um conversor de torque que torna sua partida mais suave.

11.6 Sistema de entrada de ar

Os sistemas de entrada de ar para as turbinas a gás requerem um considerável esforço de projeto para adaptar-se às necessidades da turbina. Em detalhe, estas são as seguintes: filtragem do ar, esfriamento do ar, atenuação do ruído, proteção anti-congelante, proteção contra intempéries, limpeza do compressor.

Geralmente, os sistemas de entrada de ar consistem de dutos e câmaras que introduzem o ar exterior diretamente na entrada do compressor.

Filtros de ar de entrada

A necessidade de filtrar o ar de entrada da turbina a gás é em alguns aspectos tão aguda quanto a filtragem do ar para máquinas de pistão. Sem embargo, a decisão final sobre um sistema de filtragem de ar requer um estudo das condições locais de instalação da turbina, devido às características possíveis.

A tabela que se segue sumariza os riscos da ingestão de corpos estranhos pelas turbinas e os meios de evitar os danos:

Tabela 7 – Risco da ingestão de corpos estranhos pela turbina a gás

Tipo de corpo estranho	Dano à máquina	Prevenção
Objetos pequenos (granizo, grava)	Fazer entalhes, dobrar ou romper as aletas do compressor	Peneira
Abrasivos finamente divididos (areia, pó)	Erosão das palhetas da turbina e do compressor	Filtro de pó
Objetos grandes (pássaros, papéis, trapos)	Estreitamento ou fratura das aletas do compressor ou obstrução dos dutos de ar	Filtro, inspecionar e limpar periodicamente
Insetos	Sujidade no compressor	Filtro, inspecionar e limpar periodicamente
Água	Possível fratura nas aletas do compressor	Proteção contra salpicos
Vapor saturado	Sujidade no compressor	Limpeza rotineira

A seção da turbina que sofre maior dano devido à ingestão de partículas estranhas é o compressor. A força do choque resultante quando a partícula entra em contato com as partes do compressor que giram a alta velocidade podem ocasionar um dano considerável.

11.7 Sistema de lubrificação

A lubrificação de uma turbina é feita normalmente por meio de uma bomba movida por uma caixa de engrenagens alimentada com óleo de um tanque construído dentro da base da máquina. Para partida e esfriamento na parada, assim como para uso em emergência, é necessária uma bomba auxiliar movida a alguma outra fonte de energia, como baterias ou um motor de expansão a gás. O sistema inclui válvula reguladora de pressão, indicador do nível de líquido, filtro, e um resfriador, que é

controlado por meio de uma linha de desvio operada termostaticamente na entrada do resfriador.

11.8 Caixa de engrenagens da saída de potência

Uma característica inerente das turbinas a gás é a sua alta velocidade de rotação, de até 40000 rpm para máquinas pequenas. Para que toda esta rotação seja transformada em potência útil, deve-se ter acoplada ao eixo de saída da turbina uma caixa de redução, com engrenagens de precisão para alta velocidade. O sistema de lubrificação da caixa de engrenagens faz parte do sistema geral de lubrificação da máquina.

11.9 Controles de operação

As plantas de turbinas a gás se adaptam bem a operação automática, podendo operar com pessoal inexperiente, um requisito básico do nosso projeto, uma vez que é o próprio proprietário, com pouco ou nenhum conhecimento técnico que fará a operação do equipamento. Ele deve, portanto, ser de simples operação. O sistema de controle possui um painel que mostra a causa de uma possível falha ou razão de uma parada. Uma vez corrigida a dificuldade, o mesmo painel indicará que a máquina está pronta para a partida. A operação física de partida consiste somente no apertar de um botão.

Controles de arranque: uma vez que a rotação é iniciada e se alcançou uma velocidade suficiente, ativa-se o circuito e se injeta combustível na célula de combustível para que o processo seja iniciado. O “arrancador” segue ajudando a máquina até que esta alcance 30 a 40% da velocidade total, depois do que a máquina pode continuar a trabalhar com suas próprias forças. Como regra geral, a ignição continua até que cessa ajuda quando a máquina é auto-suficiente, o que leva cerca de 20 segundos ou menos até a velocidade de regime mínimo, e o procedimento se estende por mais cerca de 5 segundos sem combustível com o objetivo de purgar a unidade antes de este ser administrado. A aceleração e parada se controlam com um limitador de aceleração que dosifica o combustível para proporcionar uma relação de aceleração dentro dos limites de projeto da turbina. Existem diversos outros tipos de

controles automáticos usados em instalações como esta, como para proteção de sobrecarga, dessarranjo da máquina, como excesso de velocidade, excesso de temperatura, etc.

11.10 Instrumentação

Em geral para um controle apropriado do funcionamento de uma instalação de geração de energia, as seguintes variáveis devem ser medidas: rotação da turbina, temperatura dos gases de escape, pressão do óleo lubrificante, pressão de admissão do gás natural, temperatura de entrada e saída do resfriador de combustível.

11.11 Equipamento para recuperar o calor de escape.

A temperatura de escape dos gases da turbina, já retirado o calor necessário para aquecer o ar e o combustível na entrada da célula de combustível é de cerca de 100 °C. Para a melhora da eficiência da planta, este gás quente será utilizado para promover o aquecimento da água a ser utilizada na residência, principalmente nos chuveiros, o que reduz bastante o consumo de energia em uma casa.

12 INVESTIMENTO

Atualmente, tanto as tecnologias para células de combustível quanto para micro turbinas estão em constante desenvolvimento. São alternativas novas para a geração de energia e por esse motivo possuem um custo inicial ainda muito alto.

No início dessa década os valores médios por unidade de energia para uma célula de combustível variavam entre 2.000 e 5.000 US\$/kW. No caso das micro-turbinas é possível obter valores melhores em torno de 600 a 1.200 US\$/kW, pois possuem o mesmo princípio das turbinas utilizadas para geração e propulsão e que existem a anos no mercado e nos centros de pesquisa. Em ambos os casos a grande dificuldade consiste em desenvolver materiais que suportem altas temperaturas às quais são submetidos no processo. Para as células é preciso maior atenção, pois os materiais envolvidos participam do processo químico, sendo cruciais no rendimento final do ciclo.

Realizamos uma estimativa dos custos envolvidos para a aquisição e manutenção da central de geração. Comparamos os valores obtidos à energia elétrica convencional comprada da rede. Para efeito de cálculo consideramos uma residência localizada no Brasil, na cidade de São Paulo, que compra energia elétrica da *Eletropaulo* e gás natural da *Comgás*. Estimamos um consumo médio mensal de 595 kWh. Os cálculos encontram-se nas tabelas logo abaixo:

Tabela 8 – Considerações de projeto e custos fixos

	Dados		Custos	
	Potência (kW)	Eficiência (%)	Instalação (\$/kW)	O&M (\$/kWh)
Célula de Combustível	3,46	55%	2000	0,0075
Micro Turbina	1,70	27%	1000	0,0065
Total	5,16		\$ 8.626	0,0140

Tabela 9 – Exemplo de consumo para residência média

	kWh/mês	m³/mês	R\$/mês	O&M/mês	Total	Redução
Gás Natural	595	73,85	184,62	20,82	R\$ 205,44	14,6%
Energia Elétrica	595	0	240,68	0	R\$ 240,68	

Para efeito de cálculo utilizamos as tarifas médias de gás natural (R\$2,50/m³) e de energia elétrica (R\$0,30/kWh) praticadas pelas concessionárias de São Paulo e os impostos PIS/COFINS e ICMS.

Na comparação realizada, ao substituírmos o sistema convencional pela mini-central de geração há uma visível redução nos custos mensais. O grande empecilho, porém, encontra-se no capital a ser investido. Com os preços atuais praticados o tempo de retorno do investimento é superior à vida útil dos equipamentos, que é de aproximadamente 15 anos. Mas existem programas de massificação da produção dessas novas tecnologias, de forma a obter uma significativa redução da relação US\$/kW até 2010. Nos EUA estão previsto investimentos federais e privados da ordem de 5,5 bilhões de dólares para os próximos 10 anos.

Vale ressaltar também que os cálculos foram feitos para uma única residência. Resultados melhores poderão ser obtidos caso a solução seja implementada em condomínios ou em conjuntos residenciais. Nessa situação poderíamos utilizar um maior número de centrais de geração e modular a operação de acordo com as necessidades dos clientes. Um maior volume de gás natural consumido reduz as tarifas praticadas pela concessionária, viabilizando ainda mais a solução.

13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros

- [1] **Hoogers G.**; "Fuel Cell Technology Handbook" CRC Press, Boca Raton, Fla, 2003.
- [2] **Wylen V.**; "Fundamentos da Termodinâmica", ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1998.
- [3] **Gomes E. H.**; "Brasil H2 Fuel Cell Energy", Brasil, 2004.
- [4] **National Renewable Energy Laboratory**; "Gas-Fired Distributed Energy Resource Technology Characterizations", Colorado, U.S., 2003.
- [5] **Boyce M. P.**; "Gas Turbine Engineering Handbook", Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1987.
- [6] **Cox, H. R.**; "Gas turbine Principles and Practice", Richard Clay and Company, Ltd, Suffolk, U.K., 1955.
- [7] **Jennings, B. H.; Rogers, W. L.**; "Gas Turbine Analysis and Practice", McGraw-Hill Book Company, New York, 1953.
- [8] **American Gas Association**: "Manual de turbinas de gas", Compañia Editorial Continental, S.A., México, 1971.
- [9] **Meetham, G. W.**: "The Development of Gas Turbine Materials", Applied Science Publishers LTD, Londres, 1981.

Teses e Publicações

- [10] **Massardo A. F., McDonald C. F., Korakianitis T.**, "Microturbine/Fuel-Cell Coupling for High-Efficiency Electrical-Power Generation", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ASME, 2002.
- [11] **Samuelsen S.**, "Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Systems ", National Fuel Cell Research Center, University of California, Irvine, 2004

Sites Internet

- [12] www.ambientebrasil.com.br

- [13] www.portalgd.com.br
- [14] www.comgas.com.br
- [15] www.fuelcell.com

14 ANEXOS

14.1 Código de Programa em Visual Basic

Declaração de variáveis:

Public potenciaUtil As Double
Public relacaoPressoes As Double
Public nCompressor As Double
Public eficienciaBocal As Double
Public alpha As Double
Public N As Double
Public pEntComp As Double
Public TEntComp As Double
Public T1 As Double
Public v1 As Double
Public k As Double
Public cp As Double
Public R As Double
Public p1 As Double
Public p2 As Double
Public TSdaComp As Double
Public wc As Double
Public T2Linha As Double
Public contador As Integer
Public relacaoComprDiam As Double
Public relacaoEspDiam As Double
Public h1 As Double
Public h2Linha As Double
Public T2 As Double
Public w As Double
Public mPonto As Double

Public mPontoNMaisUm As Double
Public v2 As Double
Public VolPonto As Double
Public Dm As Double
Public l As Double
Public t As Double
Public largura As Double
Public velocidadeB As Double
Public h2 As Double
Public v2R As Double
Public vs As Double
Public M As Double
Public beta2 As Double
Public beta3 As Double
Public v3R As Double
Public v2a As Double
Public v3a As Double
Public x As Double
Public beta4 As Double
Public wRoot As Double
Public vwRoot As Double
Public eficienciaEstagioRoot As Double
Public vwi() As Variant
Public v2i() As Variant
Public h2NLinHai() As Variant
Public deltaHBLinHai() As Variant
Public alphi() As Variant
Public beta2i() As Variant
Public v2Ri() As Variant
Public beta3i() As Variant
Public v3Ri() As Variant
Public beta4i() As Variant

```

Public wi() As Variant
Public eficienciaEstagioi() As Variant
Public GRi() As Variant
Public velocidadeBi() As Variant
Public alphaG As Double
Public beta2G As Double
Public beta3G As Double
Public beta4G As Double
Public alphasG() As Variant
Public beta2iG() As Variant
Public beta3iG() As Variant
Public beta4iG() As Variant
Public relacaoLargComp As Double
Public relacaoLargPasso As Double
Public v2aMedia As Double

```

Algoritmo:

```

Private Sub cmdCalcular_Click()

    'Entrada de Dados

    'DADOS DO EQUIPAMENTO
    potenciaUtil = txtPotenciaUtil.Text
    relacaoPressoes = txtrelacaoDePressoes.Text
    nCompressor = txtnCompressor.Text
    eficienciaBocal = txteficienciaBocal.Text
    alpha = (txtalpha.Text) / 180 * 3.14159
    beta3 = (txtbeta3.Text) / 180 * 3.14159
    beta3G = (beta3 / (3.14159)) * 180

    'CONDIÇÕES DE ENTRADA E SAÍDA
    pEntComp = txtpEntComp.Text

```

TEntComp = txtTEntComp.Text

T1 = txtT1.Text

v1 = txtv1.Text

'CONSTANTES TERMODINÂMICAS

k = txtk.Text

cp = txtcp.Text

R = txtR.Text

'Cálculos e Definições Iniciais

alphaG = (alpha / (3.14159)) * 180

relacaoComprDiam = 0.15 'altura da paleta

relacaoEspDiam = 0.05

relacaoLargComp = 0.95 'aspect ratio onde largura é a corda, em função da altura

relacaoLargPasso = 1.4 'solidity, com o passo em função da corda

$$N = (3.14159 * \text{relacaoLargPasso} * (1 - \text{relacaoComprDiam}) / (\text{relacaoLargComp} * \text{relacaoComprDiam})) / (1 + (\text{relacaoEspDiam} * \text{relacaoLargPasso}) / (\text{relacaoLargComp} * \text{relacaoComprDiam}))$$

N = Round(N, 0)

p1 = pEntComp * relacaoPressoes

p2 = pEntComp

TSdaComp = TEntComp * (relacaoPressoes) ^ ((k - 1) / k)

wc = cp * (TSdaComp - TEntComp)

T2Linha = T1 / (relacaoPressoes) ^ ((k - 1) / k)

contador = 1

'Solicitação Inicial de Dados

h1 = 1103.48

h2Linha = 786.64

'Estimativas Iniciais

```

h2 = h2Linha
T2 = T2Linha
w = cp * (T1 - T2)
mPonto = (potenciaUtil) / (w - wc)
mPontoNMaisUm = mPonto * 2 'multiplica-se por 2 para garantir que o processo
interativo não pare logo na primeira rotina
v2 = Sqr(2 * eficienciaBocal * (h1 - h2Linha) * 1000 + (v1 ^ 2) / 2)
v2a = v2 * Sin(alpha)

```

'Rotina - Verificação de Convergência

```

While mPontoNMaisUm < mPonto * 0.9 Or mPontoNMaisUm > mPonto * 1.1
And contador < 50
    If contador <= 1 Then
        mPonto = mPonto
    Else
        mPonto = mPontoNMaisUm 'se forem iguais, aborta.Caso contrário, copia
o novo valor e continua.
    End If
    If mPonto < 0 Then
        MsgBox "ERRO: Tente mudar algum parâmetro", vbInformation, "Aviso"
        Exit Sub
    Else
        mPonto = mPontoNMaisUm 'se forem iguais, aborta.Caso contrário, copia
o novo valor e continua.
    End If

'Estimativa das dimensões
VolPonto = (mPonto * R * T2) / (p2)
A2 = VolPonto / v2a
Dm = Sqr(A2 / (3.14159 * relacaoComprDiam - N * relacaoComprDiam *
relacaoEspDiam))

```



```

l = relacaoComprDiam * Dm
t = relacaoEspDiam * Dm
largura = relacaoLargComp * l

```

'Estimativa dos valores na base (root)

```

velocidadeB = 2 * 3.14159 * (Dm - l) / 2 * nCompressor / 60

```

```

h2 = (h1 * 1000 + ((v1) ^ 2) / 2 - ((v2) ^ 2) / 2) / 1000

```

```

x = v2 * Cos(alpha) - velocidadeB

```

```

If x < 0 Then

```

```

    x = -x

```

```

    beta2 = 3.14159 - Atn(v2 * Sin(alpha) / (x))

```

```

Else

```

```

    x = x

```

```

    beta2 = Atn(v2 * Sin(alpha) / (x))

```

```

End If

```

```

v2R = ((v2 * Sin(alpha)) ^ 2 + (x) ^ 2) ^ 0.5

```

```

T2 = (cp * T2Linha + h2 - h2Linha) / cp

```

```

vs = (k * R * T2 * 1000) ^ 0.5    'velocidade sônica nessas condições

```

```

M = v2R / vs    'se M<1 continua, senão pede uma relação de pressões menor!

```

```

beta2G = (beta2 / (3.14159)) * 180    'beta em graus

```

```

v3R = v2R

```

```

v2a = v2 * Sin(alpha)

```

```

v3a = v3R * Sin(beta3)

```

```

x = v3a / (velocidadeB - v3R * Cos(beta3))

```

```

If x < 0 Then

```

```

    x = -x

```

```

    beta4 = Atn(x)

```

```

    v3 = v3a / Sin(beta4)

```

```

Else
x = x
beta4 = 3.14159 - Atn(x)
v3 = v3a / Sin(3.14159 - beta4)
End If

```

```

beta4G = (beta4 / (3.14159)) * 180

```

```

wRoot = ((v2 ^ 2 - v3 ^ 2) / 2 + (v3R ^ 2 - v2R ^ 2) / 2) / 1000

```

```

vwRoot = v2 * Cos(alpha)

```

```

'eficienciaEstagioRoot = (2 * velocidadeB * (v2 * Cos(alpha) - v3 *
Cos(3.14159 - beta4))) / (((v2) ^ 2) - ((v3) ^ 2))

```

```

eficienciaEstagioRoot = 1 - (((v3) ^ 2) / ((v2) ^ 2))

```

```

ReDim vwi(5)

```

```

ReDim v2i(5)

```

```

ReDim h2NLinhai(5)

```

```

ReDim deltaHBLinhai(5)

```

```

ReDim alphai(5)

```

```

ReDim beta2i(5)

```

```

ReDim v2Ri(5)

```

```

ReDim beta3i(5)

```

```

ReDim kvpaletai(5)

```

```

ReDim kalphai(5)

```

```

ReDim v3Ri(5)

```

```

ReDim beta4i(5)

```

```

ReDim wi(5)

```

```

ReDim eficienciaEstagioi(5)

```

```

ReDim v3i(5)

```

```

ReDim GRi(5)

```

```

ReDim velocidadeBi(5)

```

```

ReDim alphaiG(5)

```

ReDim beta2iG(5)

ReDim beta3iG(5)

ReDim beta4iG(5)

Dim i As Integer

Realiza iteração para 5 valores da base ao topo da paleta

For i = 1 To 5 Step 1

$v_{wi}(i) = (v_{wRoot} * ((D_m - l) / 2)) / ((D_m - l) / 2 + i * 1 / 5)$

$v_{2i}(i) = \text{Sqr}(v_{wi}(i)^2 + v_{2a}^2)$

$h_{2N\text{Linha}}(i) = (h_1 * 1000 - 1 / \text{eficienciaBocal} * ((v_{2i}(i)^2) / 2 - (v_1^2) / 2)) / 1000$

$\Delta h_{B\text{Linha}}(i) = -h_{2\text{Linha}} + h_{2N\text{Linha}}(i)$

$G_{Ri}(i) = \Delta h_{B\text{Linha}}(i) / (h_1 - h_{2\text{Linha}})$

$\alpha_{hai}(i) = \text{Atn}(v_{2a} / v_{wi}(i))$

$\alpha_{haiG}(i) = (\alpha_{hai}(i) / 3.14159) * 180$

$v_{\text{velocidadeBi}}(i) = 2 * 3.14159 * ((D_m - l) / 2 + i * 1 / 5) * n_{\text{Compressor}} / 60$

$x = v_{wi}(i) - v_{\text{velocidadeBi}}(i)$

If x < 0 Then

$x = -x$

$\beta_{2i}(i) = 3.14159 - \text{Atn}(v_{2a} / x)$

$v_{2Ri}(i) = v_{2a} / (\text{Sin}(3.14159 - \beta_{2i}(i)))$

Else

$x = x$

$\beta_{2i}(i) = \text{Atn}(v_{2a} / x)$

$v_{2Ri}(i) = v_{2a} / (\text{Sin}(\beta_{2i}(i)))$

End If

$\beta_{2iG}(i) = (\beta_{2i}(i) / (3.14159)) * 180$

$v_{3Ri}(i) = \text{Sqr}(2 * \Delta h_{B\text{Linha}}(i) * 1000 + v_{2Ri}(i)^2)$

```

x = v3a / v3Ri(i)
beta3i(i) = Atn(x / (1 - x ^ 2) ^ 0.5) 'beta3 é o arcoseno de x
beta3iG(i) = (beta3i(i) / (3.14159)) * 180
x = v3a / (velocidadeBi(i) - v3Ri(i) * Cos(beta3i(i)))
If x < 0 Then
    x = -x
    beta4i(i) = Atn(x)
    v3i(i) = v3a / Sin(beta4i(i))
Else
    x = x
    beta4i(i) = 3.14159 - Atn(x)
    v3i(i) = v3a / Sin(3.14159 - beta4i(i))
End If
beta4iG(i) = (beta4i(i) / (3.14159)) * 180

wi(i) = ((v2i(i) ^ 2 - v3i(i) ^ 2) / 2 + (v3Ri(i) ^ 2 - v2Ri(i) ^ 2) / 2) / 1000
'eficienciaEstagioi(i) = (velocidadeBi(i) * (v2i(i) * Cos(alphai(i)) - v3i(i) *
Cos(3.14159 - beta4i(i)))) / (((v2i(i) ^ 2) / 2 - ((v3i(i) ^ 2) / 2 + 1000 *
deltaHBLinhai(i))
    eficienciaEstagioi(i) = 1 - (((v3i(i) ^ 2) / ((v2i(i) ^ 2))

Next

totalW = wRoot
totalEf = eficienciaEstagioRoot

For j = 1 To 5
    totalW = wi(j) + totalW
    totalEf = eficienciaEstagioi(j) + totalEf
Next

wmedio = (totalW) / (UBound(wi) + 1)
eficienciaEstagioMedia = (totalEf) / (UBound(eficienciaEstagioi) + 1)

```

```
mPontoNMaisUm = potenciaUtil / (wmedio - wc)
```

```
contador = contador + 1
```

Imprime resultados

```
escreveNoRtb "velocidadeB: " & Int(velocidadeB) + (Int(100 * (velocidadeB -  
Int(velocidadeB))) / 100) & "m/s", True
```

```
For j = 1 To 5
```

```
escreveNoRtb "velocidadeBi(j): " & Int(velocidadeBi(j)) + (Int(100 *  
(velocidadeBi(j) - Int(velocidadeBi(j)))) / 100) & "m/s", True
```

```
Next
```

```
escreveNoRtb "v2: " & Int(v2) + (Int(100 * (v2 - Int(v2))) / 100) & "m/s", True
```

```
For j = 1 To 5
```

```
escreveNoRtb "v2i(j): " & Int(v2i(j)) + (Int(100 * (v2i(j) - Int(v2i(j)))) / 100) &  
"m/s", True
```

```
Next
```

```
escreveNoRtb "v2R: " & Int(v2R) + (Int(100 * (v2R - Int(v2R))) / 100) & "m/s",  
True
```

```
For j = 1 To 5
```

```
escreveNoRtb "v2Ri(j): " & Int(v2Ri(j)) + (Int(100 * (v2Ri(j) - Int(v2Ri(j)))) /  
100) & "m/s", True
```

```
Next
```

```
escreveNoRtb "v3: " & Int(v3) + (Int(100 * (v3 - Int(v3))) / 100) & "m/s", True
```

```
For j = 1 To 5
```

```
escreveNoRtb "v3i(j): " & Int(v3i(j)) + (Int(100 * (v3i(j) - Int(v3i(j)))) / 100) &  
"m/s", True
```

```
Next
```

```
escreveNoRtb "v3R: " & Int(v3R) + (Int(100 * (v3R - Int(v3R))) / 100) & "m/s",  
True
```

```
For j = 1 To 5
```

```
escreveNoRtb "v3Ri(j): " & Int(v3Ri(j)) + (Int(100 * (v3Ri(j) - Int(v3Ri(j)))) /  
100) & "m/s", True
```

```
Next
```

```

    escreveNoRtb "alpha " & Int(alphaG) + (Int(100 * (alphaG - Int(alphaG))) / 100)
& "graus", True
    For j = 1 To 5
        escreveNoRtb "alphaiG(j): " & Int(alphaiG(j)) + (Int(100 * (alphaiG(j) -
Int(alphaiG(j)))) / 100) & "graus", True
    Next
    escreveNoRtb "beta2G: " & Int(beta2G) + (Int(100 * (beta2G - Int(beta2G))) /
100) & "graus", True
    For j = 1 To 5
        escreveNoRtb "beta2iG(j): " & Int(beta2iG(j)) + (Int(100 * (beta2iG(j) -
Int(beta2iG(j)))) / 100) & "graus", True
    Next
    escreveNoRtb "beta3G: " & Int(beta3G) + (Int(100 * (beta3G - Int(beta3G))) /
100) & "graus", True
    For j = 1 To 5
        escreveNoRtb "beta3iG(j): " & Int(beta3iG(j)) + (Int(100 * (beta3iG(j) -
Int(beta3iG(j)))) / 100) & "graus", True
    Next
    escreveNoRtb "beta4G: " & Int(beta4G) + (Int(100 * (beta4G - Int(beta4G))) /
100) & "graus", True
    For j = 1 To 5
        escreveNoRtb "beta4iG(j): " & Int(beta4iG(j)) + (Int(100 * (beta4iG(j) -
Int(beta4iG(j)))) / 100) & "graus", True
    Next
    escreveNoRtb "wRoot: " & Int(wRoot) + (Int(100 * (wRoot - Int(wRoot))) / 100)
& "kJ/kg", True
    For j = 1 To 5
        escreveNoRtb "wi(j): " & Int(wi(j)) + (Int(100 * (wi(j) - Int(wi(j)))) / 100) &
"kJ/kg", True
    Next
    escreveNoRtb "wmedio: " & Int(wmedio) + (Int(100 * (wmedio - Int(wmedio))) /
100) & "kJ/kg", True

```

```

    escreveNoRtb "eficienciaEstagioRoot): " & Int(eficienciaEstagioRoot * 100) +
(Int(100 * (eficienciaEstagioRoot * 100 - Int(eficienciaEstagioRoot * 100))) / 100) &
"%", True

```

```

    For j = 1 To 5

```

```

        escreveNoRtb "eficienciaEstagioi: " & Int(eficienciaEstagioi(j) * 100) + (Int(100
* (eficienciaEstagioi(j) * 100 - Int(eficienciaEstagioi(j) * 100))) / 100) & "%", True

```

```

    Next

```

```

    escreveNoRtb "Vazão Mássica: " & Int(mPontoNMaisUm) + (Int(10000 *
(mPontoNMaisUm - Int(mPontoNMaisUm))) / 10000) & "kg/s", True

```

```

    escreveNoRtb "", True

```

```

    escreveNoRtb "", True

```

```

    escreveNoRtb "", True

```

```

    escreveNoRtb "", True

```

```

Wend

```

```

    escreveNoRtb2 "", True

```

```

    escreveNoRtb2 "DADOS DO EQUIPAMENTO: ", True

```

```

    escreveNoRtb2 "Potência Útil: " & CStr(potenciaUtil) & "kw", True

```

```

    escreveNoRtb2 "Relação de Pressões: " & CStr(relacaoPressoes), True

```

```

    escreveNoRtb2 "Rotação: " & CStr(nCompressor) & "rpm", True

```

```

    escreveNoRtb2 "Vazão Mássica: " & Int(mPontoNMaisUm) + (Int(10000 *
(mPontoNMaisUm - Int(mPontoNMaisUm))) / 10000) & "kg/s", True

```

```

    escreveNoRtb2 "Eficiência do Estágio: " & Int(eficienciaEstagioMedia * 100) +
(Int(10000 * (eficienciaEstagioMedia * 100 - Int(eficienciaEstagioMedia * 100))) /
10000) & "%", True

```

```

    escreveNoRtb2 "Diâmetro Médio: " & Int(Dm) + (Int(100000 * (Dm - Int(Dm))) /
100000) & "m", True

```

```

    escreveNoRtb2 "Altura da Paleta: " & Int(l) + (Int(100000 * (l - Int(l))) / 100000)
& "m", True

```

```

    escreveNoRtb2 "Espessura da paleta: " & Int(t) + (Int(100000 * (t - Int(t))) /
100000) & "m", True
    escreveNoRtb2 "Largura da Paleta: " & Int(largura) + (Int(100000 * (largura -
Int(largura))) / 100000) & "m", True
    escreveNoRtb2 "Número de Paletas: " & Int(N) + (Int(100 * (N - Int(N))) / 100),
True
    escreveNoRtb2 "", True
    escreveNoRtb2 "", True
    escreveNoRtb2 "", True
    escreveNoRtb2 "CONDIÇÕES DE ENTRADA E SAÍDA: ", True
    escreveNoRtb2 "Pressão Ambiente: " & Int(pEntComp) + (Int(100 * (pEntComp -
Int(pEntComp))) / 100) & "kPa", True
    escreveNoRtb2 "Temperatura Ambiente: " & Int(TEntComp) + (Int(100 *
(TEntComp - Int(TEntComp))) / 100) & "K", True
    escreveNoRtb2 "Temperatura de Entrada dos Gases da Turbina: " & Int(T1) +
(Int(100 * (T1 - Int(T1))) / 100) & "K", True
    escreveNoRtb2 "Temperatura de Saída dos Gases da Turbina: " & Int(T2) +
(Int(100 * (T2 - Int(T2))) / 100) & "K", True
    escreveNoRtb2 "número de Mach: " & Int(M) + (Int(10000 * (M - Int(M))) /
10000), True
    escreveNoRtb2 "velocidade da Paleta: " & Int(velocidadeB) + (Int(100 *
(velocidadeB - Int(velocidadeB))) / 100) & "m/s", True
    escreveNoRtb2 "velocidade de saída dos gases da Turbina: " & Int(v3) + (Int(100
* (v3 - Int(v3))) / 100) & "m/s", True

    escreveNoRtb2 "contador:" & CStr(contador), True
    escreveNoRtb2 "", True

```

End Sub

Sub escreveNoRtb(str As String, flPulaLinha As Boolean)

If flPulaLinha Then rtb1.Text = rtb1.Text & vbNewLine


```
    rtb1.Text = rtb1.Text & str  
End Sub
```

```
Sub escreveNoRtb2(str As String, flPulaLinha As Boolean)  
    If flPulaLinha Then rtb2.Text = rtb2.Text & vbNewLine  
    rtb2.Text = rtb2.Text & str  
End Sub
```